



FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA

CURSOS INSTITUCIONALES

**REHABILITACIÓN  
Y CLAUSURA DE  
TIRADEROS A  
CIELO ABIERTO**

Del 07 al 18 de Octubre de 2002

***APUNTES GENERALES***

CI - 357

**DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS URBANOS  
OCTUBRE DEL 2002**

# **La Disposición Final de los Residuos Sólidos Municipales en el Distrito Federal**

**Secretaría de Obras y Servicios  
Dirección General de Servicios Urbanos  
Dirección de Transferencia y Disposición Final  
Subdirección de Operación de Disposición Final**

**Ponentes:**

**Arq. Arturo Bastidas Acuña**

**Ing. Javier Licea Nogues**

2001

# CLAUSURA DEL RELLENO SANITARIO PRADOS DE LA MONTAÑA

## RESUMEN

---

El Relleno Sanitario Prados de la Montaña está ubicado dentro de la Delegación Álvaro Obregón, al poniente de la Ciudad de México, ocupa una superficie de 25 hectáreas.

Durante sus 7.3 años de vida útil, recibió 5'635,000 toneladas de desechos municipales, durante ese tiempo dio servicio a 3'000,000 de habitantes de las zonas poniente y centro de la Ciudad. Al principio de su operación laboraban pepenadores, los cuales fueron reubicados en las plantas de selección y aprovechamiento que actualmente opera el GDF.

En octubre de 1994 se dio inicio a las obras de clausura de este relleno, con la colocación de 437,000 m<sup>3</sup> de materiales diversos, en 6 capas de espesores variables, en enero de 1996 se construyeron 1,500 m de caminos interiores de 8 m de ancho y 4,460 m de canales de sección trapecial, para drenaje pluvial y se sembró pasto en 22 hectáreas.

El sistema de pozos de extracción de biogás de la masa de basura consta de 112 pozos conectados mediante cabezales de control de flujo y puertos de medición a una red de tuberías y accesorios de PVC, cédula 80, de 4, 6,8 y 10 pulgadas de diámetro. Se instalaron conectores flexibles con la finalidad de que admitiera las deformaciones propias del relleno. De marzo a diciembre de 1996, se realizó la última etapa de perforación de pozos para la captación de biogás y la construcción del sistema de extracción forzada de biogás.

La red de captación de biogás es superficial y fue instalada sobre soportes tipo "H", se construyeron también como parte de la red, trampas para el drenado de condensados.

## ANTECEDENTES

---

La explotación de minas de arena fue la única actividad económica que se dio en la zona de Santa Fe por varias décadas y a su vez la responsable para la década de los setentas de una profunda alteración de la topografía y devastación del entorno. La minería dejó como consecuencia inmediata un conjunto de enormes socavones, algunos de los cuales fueron utilizados como tiraderos de basura a cielo abierto, cuyas consecuencias más inmediatas fueron el mayor deterioro de la calidad ambiental del entorno.

Al detectar el Gobierno del Distrito Federal (antes Departamento del Distrito Federal) éstas y otras condiciones críticas en Santa Fe, se procedió a rescatar la zona y disminuir los riesgos inherentes a su deterioro global. Actualmente Santa Fe se ha posicionado como un gran polo de desarrollo urbano integrado a la dinámica de la Ciudad de México.

En materia de desechos sólidos, el Departamento del Distrito Federal procedió al cierre y saneamiento de barrancas y socavones empleados como tiraderos a cielo abierto, destacando el cierre del tiradero de Santa Fe, en marzo de 1987. Pero el éxito de esta medida demandó sustituir paralelamente estos sitios por un relleno sanitario, diseñado y operado con la mayor eficiencia posible.

De esta manera surge el Relleno Sanitario Prados de la Montaña, cuyo historial y características principales se exponen a continuación, por lo que su clausura representa una experiencia pionera en este campo para la Ciudad de México y el país, especialmente si se considera todo el trasfondo socioeconómico y urbano en que esto ha ocurrido.

## **UBICACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DEL RELLENO**

---

El 26 de julio de 1986 se inician los trabajos para conformar y acondicionar un socavón producto de la actividad minera como relleno sanitario. El sitio se ubica en los límites de la Delegación Alvaro Obregón y la Delegación Cuajimalpa, sus límites son la Calle Coral al este, la prolongación Tamaulipas al sur, la Avenida Prados de la Montaña al oeste y la Avenida Cruz Manca al norte, haciendo un total de aproximadamente 25. Ha: la excavación original de la cantera cubría un área aproximada de 21 Ha., la cual fue usada posteriormente como relleno sanitario.

La decisión de seleccionar y acondicionar el socavón estuvo sustentada por una serie de estudios topográficos, geotécnicos, geofísicos, climatológicos y geohidrológicos; sin embargo, en el fondo del relleno se construyó un estrato de baja permeabilidad mediante material arcilloso compactado para limitar la migración de lixiviados y se le dotó con un sistema de canales colectores que descargan a cárcamos de concreto de donde se pueda extraer el lixiviado.

Adicionalmente, fue instalada sobre la ladera occidental del relleno (Av. Prados de la Montaña) un tendido de geomembrana (HDPE) con el fin de reducir la migración de biogás a través de los materiales granulares altamente permeables de dicha ladera. Esta característica del sitio motivó que posteriormente se le dotará con una red perimetral de 54 pozos de monitoreo de biogás, cada uno de ellos habilitado para la toma de muestras en tres profundidades diferentes.

De este modo, en un predio de 25 Ha. quedó habilitada una superficie neta de 22 Ha. destinadas a la disposición final de desechos sólidos.

## OPERACIÓN DEL RELLENO

---

En marzo de 1987 se inicia el depósito de desechos sólidos municipales en Prados de la Montaña, recibiendo los procedentes de las Delegaciones Alvaro Obregón, Azcapotzalco, Benito Juárez, Cuajimalpa, Cuauhtémoc, Iztapalapa, Gustavo A. Madero, Magdalena Contreras, Miguel Hidalgo y Venustiano Carranza, además de la Secretaría de la Defensa Nacional y la Dirección General de Servicios Urbanos del antes Departamento del Distrito Federal. Desde su inicio hasta su cierre como sitio de disposición final se depositaron en Prados de la Montaña un total de 5'635,019 toneladas de desechos sólidos.

### INGRESO DE DESECHOS EN LA OPERACIÓN DEL RELLENO SANITARIO PRADOS DE LA MONTAÑA

AÑO	TONELADAS
1987	355,879
1988	412,687
1989	553,288
1990	689,768
1991	670,721
1992	1'260,931
1993	1'168,177
1994	523,568
<b>TOTAL</b>	<b>5'635,019 ①</b>

La operación del sitio se realizó mediante los métodos de área y trinchera, conformando celdas con un promedio de 3.0 metros de altura, la cobertura de los desechos se realizó por medio de la excavación del propio sitio hasta 1991 y posteriormente de las minas cercanas. Se trabajó en más de un frente, debido en gran parte a la pepena controlada que desde un inicio se practicó en el lugar por los grupos que se desplazaron desde el tiradero de Santa Fe; los cuales realizaban su labor en horario diurno (7 a 19 horas), mientras que las operaciones técnicas propias de un relleno sanitario se ejecutaban en horario vespertino y nocturno.

① Fuente: La Jefatura de Unidad Departamental de Clausura. SODF

Paralelamente a la operación del sitio, se construyeron pozos de venteo pasivo del biogás generado; estos se construyeron en la mayoría de los casos con tubería de PVC de 4" de diámetro ranurada, que se extendía verticalmente de manera paulatina de acuerdo a la variación del nivel del relleno. Posteriormente muchas de estas estructuras fueron sustituidas por pozos perforados y construidos con especificaciones más rigurosas y dispuestos en tres redes (circuitos) de captación sectorizadas.

Finalmente, y en función de los requerimientos urbanísticos de Santa Fe las autoridades del entonces Departamento del Distrito Federal tomaron la decisión de proceder al cierre del sitio para recepción de desechos sólidos, el cual inició en julio de 1994. Pero este fue solo el primer paso dentro de una amplia serie de medidas que debieron instrumentarse para llegar a la clausura del sitio propiamente dicha. Algunas de las más importantes se describirán a continuación:

Hasta este punto resulta convencional el desarrollo de las actividades en Prados de la Montaña, el vértice del que parten las acciones específicas de mayor interés radica en la comercialización de los terrenos de la zona de Santa Fe, que circundan al relleno sanitario. Diversos inversionistas entraron en negociaciones con SERVIMET (organismo del entonces Departamento del Distrito Federal, facultado para comercializar propiedades del D.D.F.) a fin de adquirir terrenos destinados a desarrollos urbanos de un ambicioso proyecto de alto nivel conocido como la Zona Especial de Desarrollo Controlado (ZEDEC) de Santa Fe, cuya extensión total es de unas 650 Ha.

El predio del relleno sanitario ocupa una posición casi central dentro de la ZEDEC, cuya forma es alargada y paralela al tramo contiguo de la Autopista México-Toluca, es evidente su influencia sobre el conjunto y consecuentemente la calidad de los trabajos para su clausura debe ser alta, segura y eficiente.

Uno de los inversionistas de la ZEDEC Santa Fe, que adquirió terrenos adyacentes al relleno sanitario dentro del contrato de compra - venta celebrado con SERVIMET estipuló una cláusula que establece que la clausura del Relleno Prados de la Montaña, deberá apegarse a la normatividad que la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) aplica en el estado de California, conocida por ser una de las más rigurosas de ese país, hecho que queda justificado por las grandes inversiones involucradas y por el interés de autoridades y particulares en la preservación y mejora ecológica del entorno.

A continuación se presenta un resumen de las principales actividades llevadas a cabo:

- **Control de fauna nociva**

El control de roedores se realizó mediante la colocación de cebos rodenticidas, cuyo efecto más destacado es el de "secar" los cuerpos de los animales eliminados por este medio, evitándose generar malos olores. El control de olores y de insectos se efectuó con asperjado manual y mecánico de diversos productos químicos, especialmente recomendados para esta función. Todas estas medidas redundaron en una notoria mejoría de la calidad ambiental del sitio, facilitando las subsecuentes operaciones técnicas de clausura.

- **Reubicación de pepenadores**

En el relleno sanitario se ejerció pepena controlada durante el proceso de su operación, los pepenadores se agruparon alrededor de dos líderes distintos, llegando a sumar aproximadamente 1,100 personas. Todas ellas dependían para su sustento familiar de los subproductos que seleccionaban en el sitio y de su posterior comercialización.

Estos grupos sociales no podían ser ignorados por el entonces D.D.F; con el cierre del relleno se terminaba la fuente de sus ingresos. Por ello era indispensable lograr un acuerdo entre las partes, con el objetivo de que se pudiera garantizar un trabajo para ellos. Se lograron concretar compromisos que permitieron a los Pepenadores incorporarlos como personal operativo en las Plantas Industrializadoras de desechos sólidos en San Juan de Aragón y Bordo Poniente, percibiendo sus ingresos exclusivamente de la comercialización de los subproductos, esto por si mismo constituye un avance dentro de los esquemas de manejo de desechos sólidos en la Ciudad de México.

## CUBIERTA FINAL

---

Se realizó un diseño final de la cubierta que contempló el aspecto visual, tomo en cuenta las condiciones para el drenaje pluvial, y particularmente la aplicación práctica de estabilidad de taludes conformados por desechos sólidos; de este modo se sacrificó un poco de vida útil conformando el sitio de modo que no presentara superficie muy visibles desde algunos puntos exteriores, que en el futuro serán ocupados por distintos desarrollos. También cabe destacar la aplicación práctica de la experiencia adquirida por el Departamento del Distrito Federal en el campo de la geotecnia, al determinar un ángulo de reposo seguro para los taludes de la configuración final y compatible con la operación de la maquinaria pesada empleada para compactar. Ver fotos No. 1 y 2.

Los taludes se dejaron con una relación horizontal vertical 3:1 y plataformas con una pendiente dominante del 3% para favorecer el escurrimiento pluvial dentro de márgenes que eviten encharcamientos e infiltración por una parte y erosión por otra. En aquellos puntos donde aún hacía falta relleno para llegar a los niveles de clausura, se hizo uso de material inerte.

# Colocación de Cubierta Final



Foto No. 1

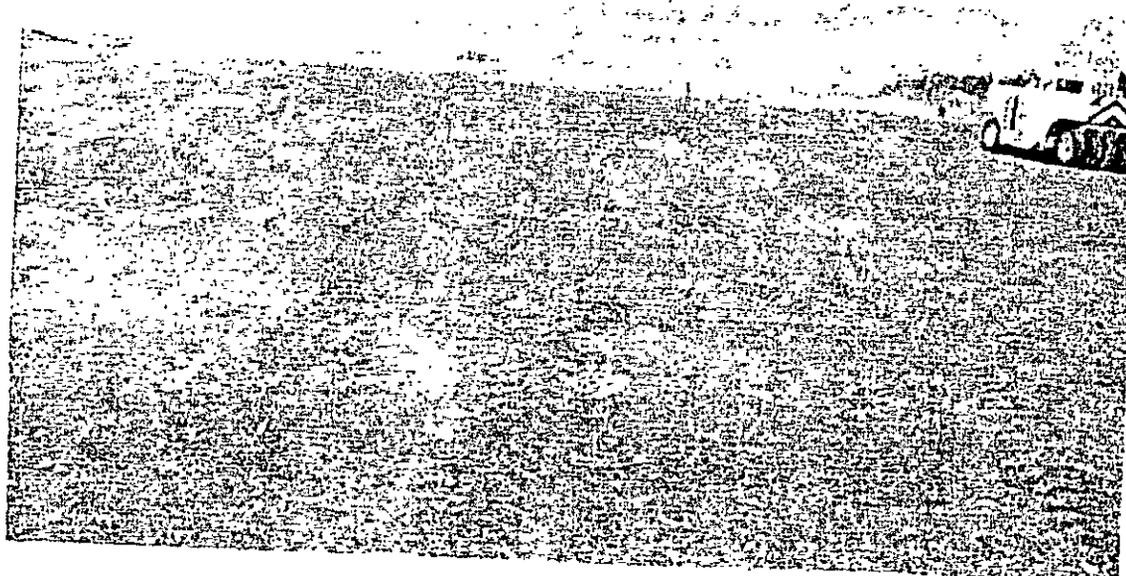


Foto No. 2

- **Estándares de diseño**

La parte más importante de la cubierta final, es formar una capa continua de arcilla de baja permeabilidad, llamada capa sello que actúa como sello hidráulico para las aguas pluviales y a la escorrentía superficial.

A continuación se presenta un breve resumen, de los criterios y requerimientos básicos de clausura establecidos por la EPA-California para la construcción de cubiertas permanentes en rellenos de desechos sólidos municipales:

1. La capa de sello debe ser construida inmediatamente sobre la parte superior de una superficie de trabajo; esta superficie denominada capa base, debe ser lo suficientemente firme para proporcionar un área estable de trabajo.
2. El espesor mínimo de la capa base es de 60 cm, la cual debe ser construida con material de relleno compactado al menos 95%, 8% compactación relativa, de la máxima densidad seca ( valor Proctor), como fue determinado mediante los ensayos realizados, siguiendo las especificaciones contenidas en ASTM D-698, Proctor Estándar, esta capa puede ser construida con cualquier material apropiado.
3. La capa de sello con un espesor mínimo de 30 cms; debe ser construida por un sello arcilloso con una permeabilidad in-situ no superior a  $1.0 \times 10^{-6}$  centímetros por segundo. La compactación relativa de esta capa debe ser de al menos 95%.
4. La capa de sello, debe ser protegida por una capa de erosión de al menos 20 cm de espesor y debe ser compactada a una densidad relativa no menor al 95%.
5. La capa de erosión debe ser protegida por una cubierta vegetal, con un alto contenido orgánico, de al menos 10 cm de espesor.
6. La superficie final debe ser plantada con pasto resistente.

## Espesores de la Cubierta Final y Volumen Depositado ②

CAPA	VOLUMEN
TIERRA VEGETAL e = 20 cm	50,000 m3
PROTECCIÓN CONTRA EROSION e = 20 cm	54,087 m3
SELLO e = 30 cm	62,717 m3
2ª CAPA BASE e = 30 cm	64,650 m3
1ª CAPA BASE e = 30 cm	64,650 m3
MATERIAL PARA DAR NIVELES E = variable	140,359 m3
TOTAL	436,463 m3

② Fuente: Jefatura de Unidad Departamental de Clausura. SODF

- **Construcción de la cobertura final**

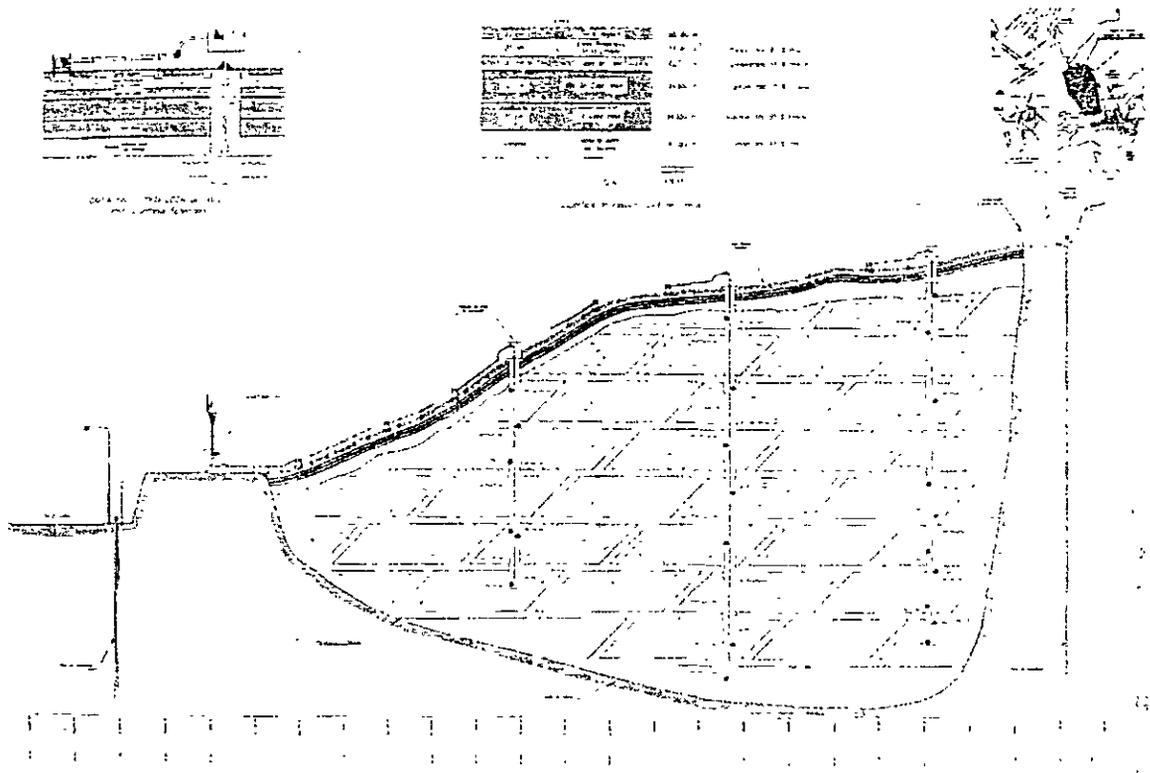
Esta fase es probablemente una de las más significativas y cruciales en todo el proceso de clausura, pues de ello depende en gran medida el eficiente control de algunos elementos que afectan al ambiente. Por ejemplo, la formación de lixiviados está en directa relación con la precipitación pluvial, y de aquí que una cobertura altamente impermeable sea premisa ante la disyuntiva entre generar más lixiviados que son altamente contaminantes cuya captación y tratamiento son difíciles y costosos, o resolverlo con un buen sello y adecuado proyecto de canalización y descarga de aguas pluviales. Por otra parte, la baja permeabilidad de la cobertura es un excelente factor de eficiencia para los sistemas de captación de biogás.

Para lograr lo anterior, se planteó la necesidad mínima de construir de abajo hacia arriba: Una capa base de material compactado de al menos 60 cm de espesor, una capa de sello con material cuya permeabilidad no exceda de  $1 \times 10^{-6}$  cm/seg de 30 cm de espesor, y finalmente una capa de al menos 30 cm de espesor como protección contra la erosión. Siguiendo estos lineamientos, el diseño final para la cubierta registró las siguientes modificaciones; se emplearía directamente sobre la basura conformada que ya contaba con una cobertura de unos 30 cm una capa de material de baja calidad con espesor variable para conformar los niveles finales, y la capa base se colocó en dos fases, cada una de 30 cm para facilitar su compactación, la capa de protección contra la erosión disminuiría su espesor a 20 cm pero compensándose con una capa adicional de tierra vegetal de también 20 cm mínimo para favorecer la pastización del sitio.

Los trabajos en campo se iniciaron con la prospección de los posibles bancos de material para cubrir la demanda. Se realizaron muestreos de material para someterse a distintas pruebas geotécnicas de laboratorio, y aquellos sitios que resultaron favorablemente dictaminados fueron evaluados sobre la base del volumen disponible y su factibilidad de explotación. Las minas más cercanas al relleno sanitario conocidas como "La Ponderosa" y la "Loma" resultaron las más adecuadas. De estos bancos y de excavaciones aledañas se extrajo todo el material necesario.

La capa de suelo provisional fue requerida para aislar a los desechos sólidos del medio ambiente; la capa de sub-base es considerada como un refuerzo de soporte y su finalidad, es de darle forma a la base del relleno sanitario para así obtener los gradientes de 3% en las terrazas, por tal motivo no se requirió que la cubierta provisional o el relleno de la sub-base cumplieran con especificaciones. La cubierta final se construyó con un espesor mínimo de 1.2 metros, cumpliendo con las especificaciones de diseño. Ver Cuadro No. 1

## Seccionamiento del Relleno



ESPESORES DE 16 M A 40 M.

Cuadro No. 1

Con excepción de la capa de tierra vegetal, todos los estratos recibieron una compactación al 95%, producto de acuerdo al procedimiento establecido por la ASTM-698-91 y el rango de tolerancia para su humedad óptima se fijó en + 2% respecto a las encontradas en laboratorio.

Cabe comentar la experiencia que se tuvo en estos trabajos con la aplicación de un biocatalizador o enzimas soluble en agua, mediante aspersado desde camiones cisterna sobre la capa base previamente roturada con arado de disco; para luego utilizar vibrocompactadores que restituyeran la textura de la superficie. El origen de esta medida se encuentra en los daños que causaba la lluvia a esta capa y que con la aplicación de esta enzima se puede evitar ya que la misma produce un considerable incremento en la dureza del suelo compactado, y en su impermeabilidad así como una considerable disminución en los trabajos de mantenimiento y reparación de la capa base.

- **Control de calidad geotécnico**

Para llevar este control se contrató una supervisión, a la que se le solicitó realizar una retícula de 100 X 100 m. Sobre todo el relleno, y que definiera espacios muestrales, donde se tomarían muestras inalteradas de cada capa; y que sometidas a pruebas de laboratorio corroborase la eficiencia de la compactación lograda, esta comprobación de calidad era requisito para continuar con los trabajos. Además se realizaron pruebas de permeabilidad en laboratorio y en sitio mediante cilindros de 30 y 60 cm de diámetro según el procedimiento ASTM-D-3885-88.

Cabe destacar que la permeabilidad lograda en la capa de sello superó las especificaciones rectoras, obteniéndose un valor promedio de aproximadamente  $1.5 \times 10^{-7}$  cm/seg.

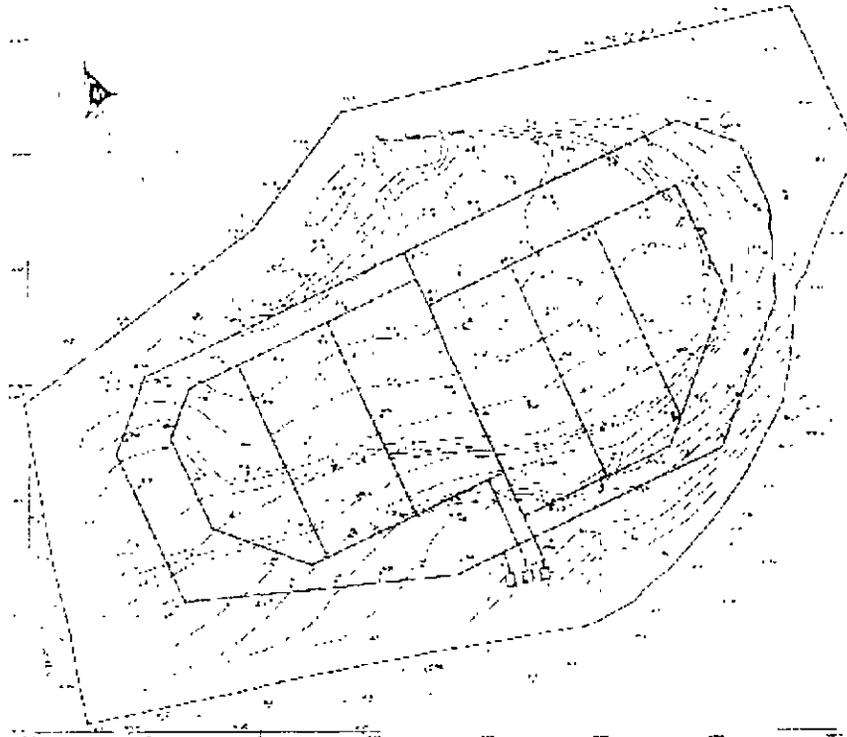
## BIOGÁS Y LIXIVIADOS

---

El relleno de Prados de la Montaña tiene una importante reserva de biogás, producto de la descomposición de la fracción orgánica de las cinco y medio millón de toneladas de desechos sólidos ahí depositados. Para efectos de clausura fue necesario dotar al sitio de un completo sistema de extracción; aunque originalmente éste se concibió exclusivamente con fines de protección contra las migraciones hacia las colindancias, al construirse baterías de pozos perimetrales, el eficiente manejo del biogás demandó contar con un sistema basado en 112 pozos interconectados por 5,650 metros de tuberías fabricadas en PVC cédula 80, con uniones flexibles e instaladas sobre silletas ajustables en la superficie, evitándose con esto el tendido subterráneo que comprometería la continuidad de la capa de sello y dificultaría el mantenimiento; lo anterior resulta en una densidad media de un pozo y 50 metros lineales de ducto por aproximadamente cada 2000 m<sup>2</sup> de superficie clausurada, lo cual es congruente con el criterio americano que recomienda en términos generales de 1 a 4 pozos por cada 2 acres (8,094 m<sup>2</sup>) de superficie clausurada. Ver Cuadro No.2

La planeación y el diseño de este sistema debió considerar los distintos espesores del relleno (los mayores de hasta 44 metros) y las edades de los desechos para estimar los volúmenes de biogás a captar y conducir, así como recomendaciones prácticas tomadas de la experiencia que se tiene en los Estados Unidos de América y que fueron adaptadas al caso Mexicano. El sistema se completo con dos estaciones de extracción y quemado de 650 ft<sup>3</sup>/mínimo a las que se suma una tercera de 2,300 ft<sup>3</sup>/mínimo dando una mayor eficiencia. La meta a cumplir fue prevenir emisiones atmosféricas riesgosas ya que el biogás puede contener cantidades trazo de compuestos no metano génicos y el propio bióxido de carbono puede contribuir al calentamiento global del planeta por efecto invernadero. Ver Fotos No. 3 y 4.

## Red de Captación y Conducción de Biogás ③



POZOS CONECTADOS 102  
LONGITUD 5500 M.  
DIAMETRO 4", 6", 8" Y 10"  
PVC CÉDULA 80

Cuadro No. 2

③ Fuente: Jefatura de la Unidad Departamental de Clausura y Saneamiento. SODF

Quemadores de 650 Ft3/Min

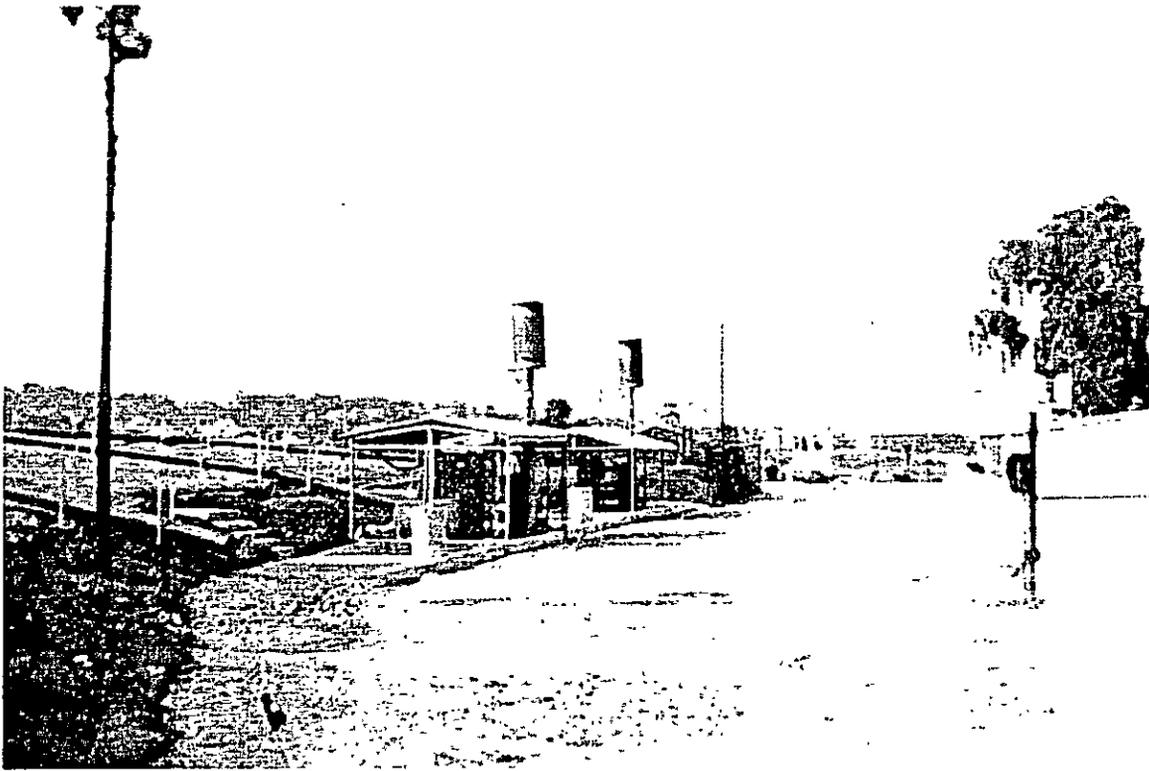


Foto No. 3

Quemadores de 2300 Ft3/Min

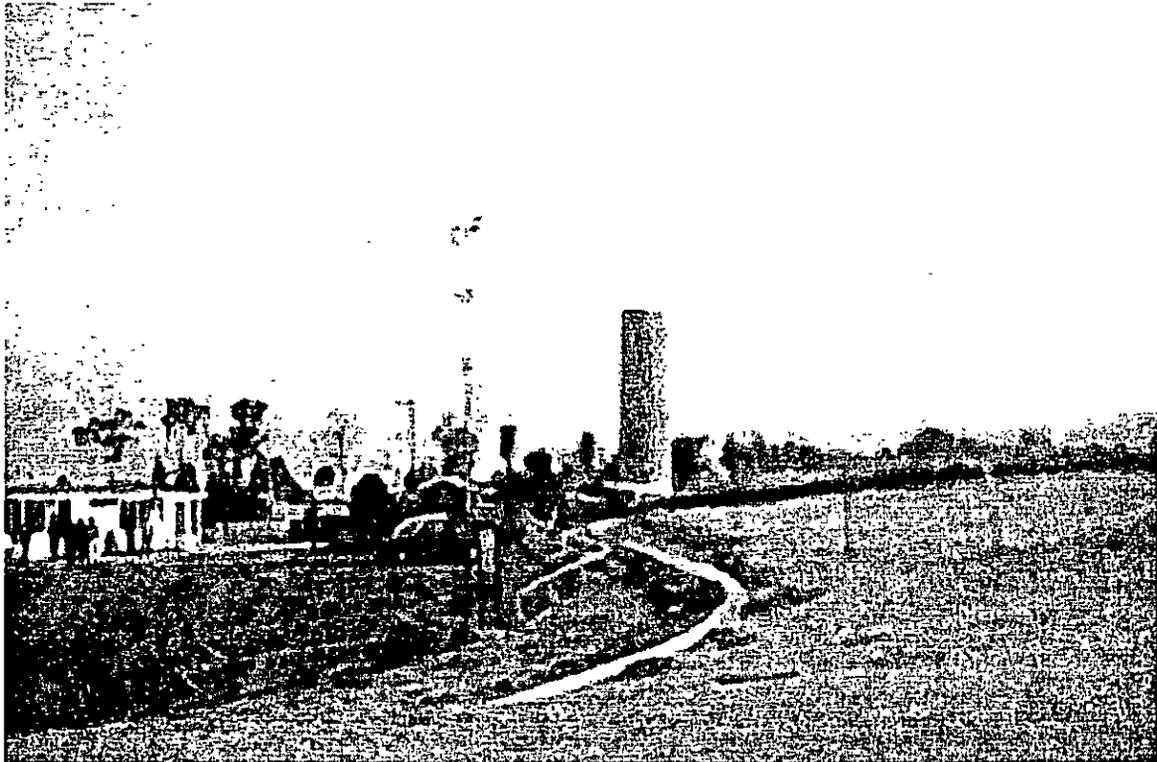


Foto No. 4

- **Control de lixiviados**

La presencia de lixiviado en el relleno es muy importante, al ser una depresión topográfica y no contar en un inicio con adecuados controles de escurrimientos pluviales, funcionó como una cuenca cerrada captando la precipitación de un área superior a la propia.

Evaluaciones recientes han hecho estimarse en casi dos millones de metros cúbicos la cantidad de lixiviados que se mantiene cautivo en el interior del relleno, del que quizá solo un 50% sea recuperable. Aún se estudia el esquema de manejo y tratamiento de los mismos, pues una extracción repentina y acelerada podría producir una consolidación de los estratos de desechos y dañar por asentamientos diferenciales la impermeabilidad de la cubierta final y reabrir el problema de incorporación del agua de lluvia y fuga de biogás; bajo esta consideración se plantea la conveniencia de extraer lixiviado durante un periodo de por lo menos diez años y conducirlo a la planta de tratamiento de aguas residuales que actualmente se construye en Santa Fe, en la que se pretende diluir el lixiviado en la proporción adecuada para no alterar la eficiencia del proceso de tratamiento.

## OBRAS COMPLEMENTARIAS

---

Otras actividades que se llevaron a cabo son la construcción de un camino de acceso perimetral asfaltado que facilite el acceso de los vehículos y personal necesarios para el mantenimiento de la infraestructura existente como el de la construcción de una red de drenaje pluvial, de un sistema de captación y conducción de biogás. Aunado a esto se construyó una red de aspersión para el riego y conservación de la cubierta vegetal.

El aislamiento del predio fue más allá de limitar el acceso por razones de seguridad a todo personal ajeno al mantenimiento y supervisión del sitio clausurado, sino que se buscó integrarlo paisajísticamente al entorno, mediante bardeados especialmente diseñados y cortinas arbóreas perimetrales distribuidas de acuerdo a estrictos requerimientos estéticos.

- **Uso posclausura del sitio**

Resulta evidente que todo uso a futuro del predio que ocupa el relleno sanitario se verá limitado por las condicionantes de no poder alojar estructuras pesadas, ni desarrollo alguno que interfiera con la segura captación del biogás mientras éste se siga produciendo. De este modo, se prevé que por un período mínimo de diez años se mantendrá cerrado el acceso del público y que cualquier uso a futuro deberá responder de manera acorde y compatible a las necesidades que en ese momento se presenten en el entorno social y urbano de la ZEDEC, Santa Fe. Ver Fotos No. 5 y 6.

Vista Actual del Relleno

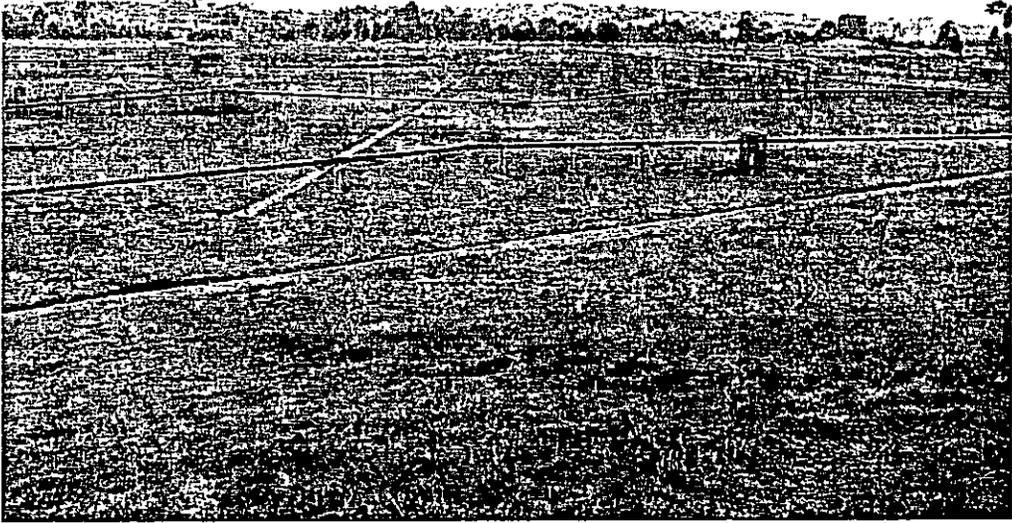


Foto No. 5



Foto No. 6

## CONCLUSIONES

---

Prados de la Montaña es un caso muy singular, se construyó y operó bajo criterios mucho menos exigentes que los que rigieron su clausura; al momento del inicio de ésta no se contaba con normatividad nacional aplicable y su clausura demandó en cambio el apego a criterios de diseño y medidas de protección que representaron un gran esfuerzo innovador que ha dejado una valiosa experiencia a los cuadros técnicos y administrativos participantes en este importante proyecto. Sin embargo, no debe tomarse este caso como un ejemplo rígido para la clausura de otros rellenos en cuanto a las acciones emprendidas y sus respectivos alcances, si no más bien como un ejemplo de la capacidad de respuesta y adaptación a circunstancias especiales, mismas que pueden variar significativamente a lo largo y ancho del país. Así, esta experiencia ha sido de gran valor para la Ciudad de México y aún más para la conservación ecológica de uno de sus más importantes y recientes polos de desarrollo.

# 1. INTRODUCCIÓN AL MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS<sup>1</sup>

## ➤ Introducción

México al igual que muchos países del mundo enfrenta grandes retos en el manejo de sus desechos municipales. Esto debido al elevado índice de crecimiento demográfico e industrial del país y las costumbres de la población, orientadas al consumo de artículos desechables, así como la tendencia de la población a abandonar las zonas rurales para concentrarse en los centros urbanos. Lo anterior ha modificado de manera sustancial la cantidad y composición de los Residuos Sólidos Municipales (RSM). Por lo que, la generación per capita de residuos sólidos aumentó de 300 gramos por día en la década de los cincuentas, a 865 gramos en promedio en el año 2000; asimismo, la población se incrementó en el mismo periodo de 30 a más de 97.3 millones, llegando a la fecha una generación nacional estimada de 84,200 toneladas diarias.

En cuatro décadas, la generación de residuos se incrementó aproximadamente 9 veces (de 9,000 a 84,200 ton) y sus características se transformaron de materiales mayoritariamente orgánicos, a elementos cuya descomposición es lenta y requiere de procesos físicos, biológicos o químicos complementarios para efectuarse.

Actualmente se estima que se recolecta únicamente el 83% del total de los residuos generados, mismos que representan 69,800 toneladas, quedando dispersas diariamente 14,400 toneladas. Del total generado, solo poco más del 53% se deposita en sitios controlados, esto es, 44,600 toneladas por día, lo que quiere decir que 39,600 toneladas, se disponen diariamente a cielo abierto en tiraderos no controlados o en tiraderos clandestinos. De seguir esa tendencia, la situación de por sí ya grave, puede adquirir un perfil crítico. Los impactos ambientales y en la salud humana debido al inadecuado manejo y disposición de los residuos sólidos, ha llevado a establecer estrategias nacionales las cuales incluyen la definición de un marco normativo que permita un control más eficiente de la contaminación al ambiente, el desarrollo de políticas para reducir su generación, estimular su reutilización y reciclado de materiales, el fortalecimiento a las instituciones involucradas con el manejo y operación de los residuos; y la búsqueda de esquemas de financiamiento adecuados a las capacidades de pago de los municipios.

---

<sup>1</sup> Tomado de Sancho y Cervera J. Y Rosiles G. **Situación Actual del Manejo Integrado de los Residuos Sólidos en México**. SEDESOL. 1999

## ➤ Manejo integral de residuos sólidos

El manejo adecuado de residuos es el conjunto de operaciones que mejoran la efectividad financiera y la adecuación social y ambiental del almacenamiento, barrido y limpieza de áreas públicas, recolección, transferencia, transporte, tratamiento, disposición final u otra operación necesaria además de contribuir para minimizar las cantidades de residuos generados a nivel domiciliario, agrícola, comercial, industrial y de las instituciones públicas.

Para que haya un manejo adecuado es necesario que las políticas y programas nacionales apoyen e incentiven la reducción de la generación de residuos sólidos, el reciclaje y estimulen la adopción de tecnologías limpias de producción industrial.

El manejo de los residuos sólidos debe incluir una adecuada planificación, diseño y utilización de tecnologías y prácticas apropiadas para ser fuente de beneficio social y económico a través de la creación de nuevas oportunidades de empleo local y de generación de ingreso por la venta de materiales usados, ahorro de energía por el reprocesamiento de materiales reutilizables segregados de los desechos, y la prevención de costos generados por la degradación ambiental, la seguridad y la asistencia médica de personas contaminadas.

Desde el punto de vista económico, la minimización de residuos puede generar, si las condiciones de mercado lo permiten, un ahorro monetario a la sociedad al extender la vida útil de rellenos sanitarios y, por ende, postergar en costos de reemplazo futuro para disposición final.

Un buen manejo de residuos optimiza la utilización de los recursos naturales, especialmente los no renovables, y puede contribuir para la recuperación de áreas degradadas, por ejemplo por la minería, mediante la implantación de rellenos sanitarios bien construidos que queden integrados al paisaje natural.

Uno de los principales impactos benéficos del manejo adecuado de los residuos sólidos es la recuperación de materiales reciclables y reutilizables, que además de contribuir para resolver el problema de los residuos, tiene el potencial de crear conciencia comunitaria en las campañas de recolección selectiva. El manejo adecuado de residuos sólidos debe considerar los siguientes aspectos:

- Las características físicas y el volumen de basura a ser manejado.
- Características urbanísticas: uso del suelo, tendencias, proyección de la población, del volumen y de las características de la basura considerados en un plazo futuro de 8-10 años, disponibilidad de terreno apropiado para instalaciones de tratamiento y disposición final de los residuos, aspectos culturales y de comportamiento locales en relación al manejo de la basura (segregación y reuso de desechos), grado de organización comunitaria.

- Planificación apropiada que refleje la vida útil de los equipos mecánicos y del sistema de disposición final.
- Características operacionales del sistema actual de manejo de residuos, su efectividad y conveniencia.
- Organización institucional, arreglos financieros y fuentes de ingresos.
- Actividades industriales presentes y futuras.
- Estado actual de las calles y avenidas, planes de mejoramiento y extensión de las mismas.
- Recursos hídricos que deben ser protegidos de la posible contaminación originada por los sitios de disposición de residuos.
- Mercado potencial para materiales de reuso o reciclables.

Muchos de los impactos negativos pueden evitarse mediante el diseño apropiado y las prácticas de construcción y mantenimiento adecuadas. La mayoría de los impactos negativos relacionados directamente con las actividades de construcción de un relleno, por ejemplo, pueden ser mitigados, para evitar o reducir el daño ambiental. La ubicación correcta, el diseño adecuado, la buena operación de un sitio de tratamiento o disposición final de residuos, junto con el monitoreo y vigilancia, son aspectos fundamentales que se deben considerar para evitar impactos ambientales adversos.

➤ **Generación y composición de los residuos.**

Si bien la generación per capita de RSM en nuestro país, es inferior a la generación de otros países del mundo, su volumen diario sobrepasa las capacidades instaladas de los municipios (Tabla 1).

**Tabla 1. Tasa de generación per cápita en diferentes países.**

<b>País</b>	<b>Generación per cápita (Kg/hab/día)</b>
E.U.A.	1.970
Canadá	1.900
Finlandia	1.690
Holanda	1.300
Suiza	1.200
Japón	1.120
México	0.853

La generación de residuos sólidos varía de 0.68 a 1.33 kg/hab/día. Los valores inferiores corresponden a zonas en su mayoría semirurales o rurales, mientras que los valores superiores, representan la generación para zonas metropolitanas como el Distrito Federal.

La tendencia de incremento de generación se estima que puede variar de 1 a 3% anual dependiendo de la localidad. En el centro del país junto con el Distrito Federal producen el 62 % de los residuos generados en el país.

La composición de los residuos sólidos municipales (RSM) no es homogénea en todo el territorio nacional (Tabla 2), sino que responde a la distribución de hábitos de consumo y poder adquisitivo de la población. Así, la composición en el sur del país (estados como Chiapas y Tabasco) tiene mayores contenidos de residuos de jardinería, mientras que en las zonas urbanas este mismo producto aparece en menor proporción.

**Tabla 2. Composición de los residuos por zona geográfica  
( valores en %)**

<b>Subproducto</b>	<b>Frontera Norte</b>	<b>Norte</b>	<b>Centro</b>	<b>Sur</b>	<b>D.F.</b>
Cartón	3.973	4.366	1.831	4.844	5.360
Residuos finos	1.369	2.225	3.512	8.075	1.210
Hueso	0.504	0.644	0.269	0.250	0.080
Hule	0.278	0.200	0.087	0.350	0.200
Lata	2.926	1.409	1.700	2.966	1.580
Material ferroso	1.183	1.476	0.286	0.399	1.390
Material no ferroso	0.226	0.652	0.937	1.698	0.060
Papel	12.128	10.555	13.684	8.853	14.580
Pañal desechable	6.552	8.308	6.008	5.723	3.370
Plástico película	4.787	5.120	1.656	1.723	6.240
Plástico rígido	2.897	3.152	1.948	1.228	4.330
Residuos alimenticios	26.972	21.271	38.538	16.344	34.660
Residuos de jardinería	16.091	19.762	7.113	26.975	5.120
Trapo	1.965	2.406	0.807	2.157	0.640
Vidrio de color	2.059	0.934	4.248	0.599	4.000
Vidrio transparente	4.590	5.254	5.051	3.715	6.770
Otros	11.500	12.267	12.326	14.102	10.410
<b>Total</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>

La evolución en la composición de los subproductos durante el período 1991 a 1997 muestra un incremento importante en productos desechables como plástico, papel y vidrio, 4.57, 3.06 y 1.14 % respectivamente, mientras que en los residuos orgánicos (comida y jardinería principalmente) han tenido un decremento del 7.62%.

Un factor importante a considerar en la selección de alternativas de manejo de los RSM es su peso volumétrico in situ. Este puede variar de 170 a 330 kg/m<sup>3</sup> sin compactar y depende en gran medida del contenido de materia orgánica y su grado de humedad.

### ➤ Almacenamiento

El diseño correcto de proyectos y equipos para el almacenamiento de los residuos sólidos, para su posterior recolección, puede prever contenedores individuales o comunales, dependiendo de la disponibilidad de espacio, como es el caso de áreas densamente pobladas y con acceso limitado.

Son pocas las ciudades en donde se tiene un almacenamiento adecuado en comercios, mercados, e industrias. Algunos municipios han preferido como método de recolección, el sistema de contenedores en la vía pública. Este sistema no ha logrado los resultados planeados en la mayoría de los casos por carecer de la infraestructura para recolectar la basura de su interior con la frecuencia requerida y los equipos de limpieza y mantenimiento necesarios. Esta situación ha provocado que se generen pequeños tiraderos alrededor de los contenedores, con la consecuente proliferación de fauna nociva, malos olores, afectación al paisaje, y consecuentemente, el rechazo de la población. Sin embargo no por ende deja ésta, de ser una alternativa viable para hacer eficiente los métodos de recolección de muchas ciudades de nuestro país. Lo que se requiere es realizar adecuados análisis técnicos y económicos (planes maestros de inversión), para planear el uso de los contenedores dentro de un marco de manejo integral en el cual, se dimensionen adecuadamente las inversiones necesarias para mitigar los efectos negativos que éstos pueden generar.

El almacenamiento domiciliario mediante el uso de bolsas de polietileno (bolsas de supermercado) constituye uno de los principales problemas de operación en los procesos de recolección, transporte y disposición final, debido a su poca resistencia y bajo peso específico, lo que ocasiona que se rompan constantemente al intentar ser trasladadas al camión recolector o que vuelen al ser trasladadas o depositadas en los rellenos sanitarios o tiraderos a cielo abierto, lo cual baja la eficiencia de los procesos, incrementa los costos, contamina y da mala imagen a los municipios.

### ➤ **Barrido**

El barrido mecánico, se utiliza generalmente en vías principales y secundarias bien pavimentadas. Se registran rendimientos de 25 a 30 km/barredora/turno. Sin embargo se han reportado eficiencias de 8 km/barredora/turno debido a las deficiencias en el mantenimiento de los equipos, cuyos principales problemas se encuentran en las bandas y los ródillos de las barredoras.

El barrido manual se realiza en los zócalos, las plazas principales y las zonas turísticas. El rendimiento del personal va de 0.6 a 2.0 km/turno de calle (1.0 a 3.0 km de cuneta), dependiendo del apoyo del barrido mecánico, la orografía, el clima, el grado de dificultad del barrido y fundamentalmente de la cooperación de la comunidad. El costo del barrido varía de 12 a 18 \$/km, y esta sujeto a factores tales como el número de personal empleado y sus condiciones contractuales.

### ➤ **Recolección**

Un sistema adecuado de recolección debe prever, en lo posible, recipientes colectores apropiados que hayan sido diseñados según el perfil de los usuarios de los trabajadores, y de las características del local. Se deben evitar contenedores pesados difíciles de maniobrar que puedan producir daño a los usuarios y recolectores al moverlos. El servicio de recolección, en la mayoría de los países en desarrollo, consume alrededor del 30% al 60% del presupuesto municipal asignado para aseo urbano. El servicio, en relación a la frecuencia de recolección, está condicionado al nivel de ingresos de la población servida, lo que significa, por veces, un sistema de recolección esporádico y deficiente en las zonas marginales de bajos ingresos, y prácticamente nulo en los asentamientos ilegales.

Para la recolección de desechos sólidos se requieren equipos, camiones colectores/compactadores, tractores, y en algunos casos, estaciones de transferencia (usadas para mejorar la eficiencia de los servicios y disminuir los costos de recolección y transporte), vehículos recolectores de lodo séptico y de residuos de los sistemas especiales de tratamiento de agua y aguas servidas. Además, debe contar con oficinas para el mantenimiento y reparación del parque automotor recolector.

Las prácticas y técnicas de recolección deben ser apropiadas a las características del vecindario, de las condiciones topográficas y del acceso, de las vías públicas, y distancia a caminar por los residentes para descargar sus desechos sólidos. La recolección debe ser más frecuente en localidades de climas cálidos y húmedos para prevenir riesgos a la salud, ocasionados por la descomposición rápida de la basura con alto tenor orgánico.

Los proyectos de residuos sólidos deben prestar especial atención a las zonas de bajos ingresos, y prever métodos de recolección en los cuales participe la comunidad, campañas de educación para el manejo, almacenamiento y transporte

de la basura, y proveer contenedores adecuados para la recolección de desechos en las unidades residenciales y manzanas, con la cooperación de los residentes especialmente cuando hay programas de reciclaje y separación en la fuente.

La eficiencia de los sistemas de limpieza urbana puede estar condicionada a aspectos de la participación del sector privado, educación del público usuario y factores técnicos tales como; apropiadas de recolección, optimización del tamaño de los equipos, planificación de rutas, limitación del traslado directo a distancias económicamente viables y la prolongación de la vida útil de los vehículos.

Las políticas de los países y los proyectos deben atender a los compromisos de la Agenda 21 en lo que se refiere a priorizar para cada localidad formas sostenibles de manejo de los residuos.

La cobertura en población servida promedio a nivel nacional se estima en 83%. Para las zonas metropolitanas se ha calculado en 95%, mientras que para ciudades medias entre el 75 y 85%. En áreas urbanas pequeñas se ubica entre el 60 y 80%. Los métodos más utilizados son: el de campaneo, parada en esquina y el de acera.

La recolección por lo general se realiza en dos turnos y ocupa entre 2 y 5 trabajadores por camión incluyendo chofer, macheteros y voluntarios (pre-pepenadores), esto depende de factores como la generación por zona o sector, la concentración urbana, el grado de dificultad de la ruta así como las condiciones climáticas y topográficas de la localidad y sobre todo de las actividades de pre-pepena. En promedio cada machetero (personal destinado a actividades exclusivas de recolección), recolecta entre 3.0 a 6.9 toneladas/turno. Los equipos más utilizados son los camiones compactadores con capacidad de 13.0 a 15.3 m<sup>3</sup>, (17 a 20 yd<sup>3</sup>) con los cuales se recolectan de 5.8 a 6.9 toneladas por viaje. En municipios con marginalidad mayor es común encontrar que su flota de camiones son de tipo "volteo" hasta en un 50%, cuya capacidad oscila entre 6 y 8 m<sup>3</sup> y recolectan de 1.2 a 1.6 toneladas por viaje, con capacidad de carga y potencia subutilizadas, ya que puede ser de 9 a 12 toneladas; y consecuentemente mayores costos de consumos y operación, así como, mayor esfuerzo de los macheteros y por lo tanto baja eficiencia.

La mayoría de los camiones tienen un rango de operación entre 8 y 12 años, lo cual sobrepasa la vida útil de los mismos (estimada en siete años). En general el 25% de la flotilla de camiones se encuentra en buen estado, el 50% en regulares condiciones y el resto en muy malas condiciones de operación. La falta de mantenimiento preventivo en muchos municipios del país mantiene en condiciones críticas el parque vehicular.

En la gran mayoría de los municipios es recurrente la pre-pepena de materiales de mayor valor comercial, tales como el aluminio, vidrio y cartón, además del cobro informal ("propina") al usuario.

Los costos de recolección en las ciudades medias varían de \$130.00 a \$250.00 por tonelada, dependiendo principalmente de la cobertura del servicio, la cantidad de recolecta, el estado físico de los camiones; y el diseño de las rutas de recolección.

Los costos de recolección representan el 95 % de los costos totales del servicio cuando este no incluye los procesos de transferencia o disposición final controlada (Tabla 3).

**Tabla 3. Porcentajes de distribución de los costos en los diferentes procesos**

Proceso	TCA	Relleno sanitario	Relleno Sanitario con transferencia	
	México	México	México	EUA
<b>Recolección/Barrido</b>	95%	82%	53%	64%
<b>Transferencia</b>	- 0 -	- 0 -	29%	14%
<b>Disposición Final</b>	5%	18%	18%	22%
<b>TOTAL</b>	100%	100%	100%	100%

La informalidad en este servicio es tal, que en la ciudad de México una familia llega a gastar alrededor de mil 600 pesos al año por concepto de propinas que entrega a los recolectores para que se lleven la basura de su casa, mientras que con un servicio estructurado el gasto sería de 500 pesos al año, agregó. Esto agrava la disposición de los residuos, ya que hay alrededor de 57 mil toneladas diarias que quedan en tiraderos a cielo abierto, "lo que significa que en dos semanas llenaríamos hasta el borde el estadio Azteca".

Sumado a todo esto, los residuos peligrosos hospitalarios e industriales son mezclados con la basura de las casas y llegan a tiraderos municipales. Se tienen detectados 21 estados donde hay 124 sitios abandonados y contaminados con estos desechos, con un volumen de alrededor de 33 millones de toneladas. "Siguiendo el ejemplo del estadio Azteca, con esta cantidad de residuos peligrosos se llenaría 34 veces el coloso de Santa Ursula".

Para el tratamiento de la basura únicamente existe una norma mexicana que está dirigida a la etapa final de disposición en los rellenos sanitarios, pero para las fases de recolección, reciclaje o minimización no existe ningún tipo de normatividad. Frente a esta situación, agregó, es necesario enfrentar tres puntos críticos, que son el apoyo institucional en la gestión municipal de manejo de los desechos, la capacitación y el financiamiento para la creación de infraestructura.

### ➤ **Recolección de desechos tóxicos y peligrosos**

La recolección de los desechos tóxicos puede ser hecha de manera similar a la de los residuos domiciliarios, teniendo la precaución de recolectar en forma separada los materiales tóxicos y peligrosos. A menudo, los sitios municipales de descarga no cuentan con las facilidades técnicas y control adecuado para segregar los desechos tóxicos y peligrosos en forma sanitaria y segura, la mayoría de los rellenos sanitarios de los países de la región carecen de control sobre el acceso a los sitios, sobre la naturaleza y el volumen de los desechos recibidos. Puesto que, en general, no existe supervisión, los trabajadores o rebuscadores no reciben ninguna advertencia sobre los riesgos a que pueden estar expuestos. Tampoco son frecuentes medidas especiales para implantar plantas de tratamiento y sitios de disposición de desechos tóxicos.

### ➤ **Estaciones de Transferencia**

Las grandes distancias que existen entre los centros geográficos de las poblaciones a los sitios de disposición final, han obligado a los municipios al uso creciente de estaciones de transferencia. Esta situación comienza a presentarse con mayor frecuencia en las poblaciones medias del país que presentan actividades económicas importantes, ya que esto trae de igual forma el crecimiento de los asentamientos humanos en las periferias de las ciudades y con ello la difícil tarea de localizar sitios para disposición final cercanos al centro de población.

Aunado a ello, los costos de los terrenos y el rechazo de la población para la construcción de rellenos sanitarios, dificulta la selección de terrenos en lugares periféricos de las localidades.

La finalidad de las estaciones de transferencia, es la de disminuir los costos de recolección, para ello se utilizan tractocamiones equipados con cajas de transferencia para llevar los residuos de sitios ubicados en la mancha urbana a los sitios de disposición final, cuyas distancias superan generalmente los 15 kilómetros.

Las capacidades de las cajas de transferencia varían de 40 a 70 m<sup>3</sup>, por lo que en ellas se puede transportar entre 10 y 30 toneladas de residuos si se considera un peso volumétrico de 250 kg/m<sup>3</sup>. Se sabe que en las zonas metropolitanas, más del 75% de los residuos recolectados pasan por estaciones de transferencia. Ciudades como Querétaro, Qro., Cd. Juárez, Chih., Tepatitlán, Jal., San Luis Potosí, SLP, Cd. del Carmen, Camp., Guadalupe, NL, y el DF, cuentan con este tipo de instalaciones.

Los costos de la transferencia representan aproximadamente el 29% del monto total del servicio integral (considerando que opera el relleno sanitario), los montos varían en función de la cantidad de residuos manejados y la distancia que se

recorre al sitio de disposición final. Los costos tienen un amplio espectro de variación reportándose desde \$40.00 hasta \$90.00 por tonelada.

### ➤ **Tratamiento y disposición final**

El tratamiento y la disposición final son las últimas etapas del ciclo de manejo de los residuos sólidos. Tratar y disponer sanitariamente una porción cada vez mayor de las basuras es una meta que todos los países asumieron en Río 92 (CNUMAD-92). Las formas más usuales de tratar y disponer los residuos sólidos urbanos son el relleno sanitario, la incineración, el compostaje y el reciclaje (véase Cuadro 3).

Los procesos de incineración y producción de composta en el ámbito municipal en nuestro país no han tenido el resultado esperado. Cinco municipios han comprado plantas para producir composta, en un municipio nunca se instaló el equipo, quedando abandonado el proceso; y en los cuatro restantes (Guadalajara, Monterrey, Oaxaca y D.F.), han cesado sus operaciones por falta de mercado, altos costos de operación y mala calidad del producto terminado. No obstante, algunas compañías siguen experimentando para mejorar el proceso, incluyendo únicamente residuos de jardinería y lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales.

Hasta ahora ningún municipio ha intentado aprovechar el biogás como fuente de energía, sin embargo en el estado de Nuevo León y el Distrito Federal, se está estudiando la posibilidad de incorporar este sistema en su proceso de disposición final.

Se estima que en México, los materiales recuperados para su venta, representan del 6% al 10% de la basura generada. El proceso de segregación es una actividad que se realiza principalmente en los camiones recolectores (pre-pepena) y en los tiraderos a cielo abierto (pepena). Cabe señalar que los municipios no se benefician de los ingresos resultantes de la pre-pepena y pepena, ni del reciclaje de los materiales recuperados. Aunque en forma indirecta, el beneficio consiste en el aumento de la vida útil en los sitios de disposición final, y ahorro en los consumos por operación de los mismos.

En la tabla 4 muestra las tendencias mundiales de los diferentes procesos de tratamiento y la disposición final en el mundo.

**Tabla 4. Tendencias mundiales de diferentes tratamientos (cifras expresadas en %)**

País	Relleno sanitario	Incineración	Composteo	Reciclaje
Estados Unidos	73	14	1	12
Japón	27	25	2	46
Alemania	52	30	3	15
Francia	48	40	10	2
Suecia	40	52	5	3
México	94	- o -	- o -	6 al 10

➤ **Relleno sanitario**

Es una técnica de disposición de residuos sólidos muy utilizada en la región, que consiste en la disposición de capas de basura compactadas sobre un suelo previamente impermeabilizado para evitar la contaminación del acuífero y recubiertas por capas de suelo. Una ventaja del relleno sanitario sobre otros métodos de tratamiento de residuos es la posibilidad de recuperación de áreas ambientalmente degradadas por la minería o explotación de canteras, así como de terrenos considerados improductivos o marginales. Otras ventajas de un relleno sanitario son: baja inversión de capital comparada con otros métodos de tratamiento, generación de empleo de mano de obra no calificada, flexibilidad, en cuanto a capacidad, para recibir cantidades adicionales de desechos y la posibilidad de utilizar el gas metano producido como fuente alternativa de energía.

Los rellenos sanitarios mal ubicados y/o contruidos pueden generar contaminación ambiental e impactos a la estética, a la salud pública y ocupacional. En la planificación y construcción de los rellenos sanitarios se deben tomar precauciones para no alterar el medio ambiente natural en forma negativa o causar impactos adversos en la población circundante. Para evitar la contaminación de las aguas subterráneas y superficiales más cercanas se deben utilizar áreas donde la permeabilidad del suelo subyacente sea reducida y materiales aislantes adecuados.

La descomposición de la materia orgánica en los rellenos sanitarios produce gases y líquidos contaminados que son filtrados por el suelo y pueden comprometer al acuífero. El grado en que el suelo reduce la carga de contaminación dependerá de sus características físicas y químicas tales como porosidad, capacidad de intercambio de iones, así como su habilidad para absorber y precipitar los sólidos disueltos. No todos los contaminantes son

retenidos o filtrados por el suelo. Por ejemplo, aniones como cloruro y nitrato, pasan fácilmente a través de la mayoría de los suelos sin atenuación.

Los suelos arcillosos y con humus tienen mayor poder de retención de contaminantes que los suelos arenosos. Bajo ciertas condiciones hidrológicas la filtración de los líquidos percollados (lixiviación), puede pasar a través del suelo no saturado, que se halla debajo de los rellenos, y contaminar las aguas subterráneas.

En los rellenos sanitarios existe el riesgo de accidentes y desastres por explosiones debido a la acumulación del gas metano, producido por la descomposición natural o putrefacción de los desechos sólidos en forma anaeróbica. El gas metano tiende a acumularse en los espacios vacíos dentro del relleno pudiendo migrar a las áreas vecinas con el consiguiente peligro de explosión. Estos riesgos deben evaluarse y abordarse con planes de contingencia apropiados que consideren la construcción de un sistema de drenaje para liberar los gases a la atmósfera.

Al diseñar un relleno sanitario se deben considerar los aspectos socioculturales del vecindario, especialmente en relación a las dimensiones de las instalaciones, que deben estar en conformidad con los planes maestro de uso de suelo urbano. Los impactos estéticos y sonoros (ruidos de tránsito) deben ser evaluados especialmente en las áreas próximas a urbanizaciones. La migración de gases y polvo (olor y humo) según la dirección prevaleciente de los vientos, el flujo de las aguas subterráneas (que pueden contaminar a los pozos de agua potable) y las características de los cuerpos de aguas superficiales son elementos importantes a ser considerados en los proyectos de residuos sólidos.

El estudio de alternativas para la elección del sitio más apropiado, además de considerar los criterios técnicos de ingeniería y los aspectos anteriormente mencionados, debe tomar en cuenta la opinión pública. Desde el inicio del proyecto la comunidad debe tener la oportunidad de participar, comentar y objetar. Es esencial asegurar el apoyo de los distintos sectores de la comunidad durante todas las fases de selección, diseño, construcción, operación, mantenimiento y uso futuro del relleno sanitario. A menudo, este aspecto es ignorado, lo que crea problemas posteriores. La instalación de un relleno sanitario puede causar rechazo por la comunidad y, por consiguiente, es importante efectuar campañas de información pública y medidas compensadoras.

La selección de la alternativa más adecuada no debe implicar impactos irreversibles a la flora nativa o a especies en extinción. En lo posible, se debe preservar la vegetación suprimiendo el mínimo que sea necesario. Para minimizar los impactos negativos en la salud y seguridad de los trabajadores de limpieza urbana se puede realizar un Plan para Prevención de Riesgos relacionado al manejo de residuos sólidos.

### ➤ **Rehabilitación de tiraderos**

Las prácticas de disposición de las basuras en orillas de los caminos, minas abandonadas, rívera de los ríos, y otros locales inadecuados han generado tiraderos clandestinos y áreas degradadas con contaminación de agua superficial y subterránea. La recuperación de tiraderos a cielo abierto trata de recubrir y recuperar las áreas degradadas, según normas de seguridad, para reintegrar el botadero al paisaje y minimizar sus impactos ambientales negativos. Antes de recuperar un botadero se debe conocer el tipo de material que contiene, y sus posibles riesgos para planificar las intervenciones técnicas.

## 2. SITUACIÓN ACTUAL DE LA DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS EN MÉXICO

De acuerdo con los reportes más recientes de las autoridades responsables, se deposita de forma adecuada el 53% de los residuos sólidos municipales generados en el país. El resto se deposita en tiraderos a cielo abierto o en sitios clandestinos, lo que representa graves riesgos para la salud de la población y la degradación ambiental. Adicionalmente, en los últimos años se han impulsado acciones para mejorar la disposición de los RSM, ya que, en ciudades medias la disposición final mediante el uso de rellenos sanitarios se ha incrementado en los últimos 8 años en un 20%.

Se cuenta con 51 rellenos sanitarios en ciudades medias y zonas metropolitanas; y 14 en localidades pequeñas de todo el país, que operan de forma satisfactoria. El resto de los sitios no cumple con las normas mínimas, por lo que se consideran tiraderos a cielo abierto.

Los costos de operación de un relleno sanitario tienen un amplio espectro de variación dependiendo del volumen de residuos a disponer, el origen de los recursos empleados para la construcción del relleno y el nivel de responsabilidad asignado a quien lo opera, entre otros. Quizás el más significativo de estos factores sea el volumen de residuos a disponer, ya que en los costos de operación e inversión aplican fuertemente las economías de escala. Por esto las autoridades estatales y federales han puesto mucho énfasis en la construcción de rellenos sanitarios regionales, siempre y cuando las distancias entre los diferentes centros de población lo permitan. Los costos de operación de un relleno sanitario en nuestro país representan aproximadamente el 18% del costo total del proceso.

En la lista siguiente se presentan algunos municipios que cuentan con rellenos sanitarios con eficientes sistemas de administración y operación.

1. Aguascalientes, Ags.
2. Tijuana, B. C.
3. Piedras Negras, Coah.
4. Sabinas, Coah.
5. Saltillo, Coah.
6. Armería, Col.
7. Cd. Juárez, Chih.
8. Chihuahua, Chih.
9. Ojinaga, Chih.
10. Durango, Dgo.
11. Bordo Poniente, D. F.
12. Tlalnepantla, Mex.
13. Cuautla-Oaxtepec, Mor.
14. ZM de Monterrey, N. L.
15. Linares, N. L.
16. Puebla, Pue.

17. Cancún (Benito Juárez), Q. Roo.
18. Tequixquiapan, Qro.
19. Querétaro, Qro.
20. San Juan Del Río, Qro.
21. San Luis Potosí, S. L. P.
22. Culiacán, Sin.
23. Los Mochis, Sin.
24. Puerto Peñasco, Son.
25. Agua Prieta, Son.
26. Hermosillo, Son.
27. Nogales, Son.
28. Cd. Victoria, Tam.
29. Matamoros, Tam.
30. Nuevo Laredo, Tam.
31. Río Bravo, Tam.
32. Calpulalpan, Tlax.
33. Acuamanala Miguel Hidalgo, Tlax.
34. Santa Ana Chiautempan, Tlax.
35. Tlaxcala (Regional), Tlax.
36. Orizaba, Ver.
37. Mérida, Yuc.

Como se había mencionado en la introducción, se deposita de forma adecuada el 53% de los residuos sólidos municipales generados en el país. El resto se deposita en tiraderos a cielo abierto o en sitios clandestinos, lo que representa graves riesgos para la salud de la población y la degradación ambiental.

En los últimos años se han impulsado acciones para mejorar la disposición de los RSM. Por ejemplo, en ciudades medias la disposición final mediante el uso de rellenos sanitarios se ha incrementado en los últimos 8 años en un 20%.

La normatividad vigente (NOM-083-ECOL-1996), busca impulsar la utilización de predios con vocación natural y establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de residuos sólidos municipales, indicando que los que operan actualmente (y no cumplen con dicha Norma), tienen un plazo de tres años a partir de su publicación en el Diario Oficial de la Federación para regularizar su situación de acuerdo a los preceptos de esta Norma, así como su entrada en vigor (26 de noviembre de 1996). Por lo que para el año 2000, todos los municipios deberán contar con instalaciones para realizar la disposición final adecuada de sus RSM, bajo condiciones que no produzcan molestias, afectaciones al medio ambiente, ni a la salud humana.

En la frontera norte del país, se estima una generación de 199 mil toneladas mensuales, de las cuales se recolecta aproximadamente el 73%. De esta generación, solo el 67.9% se deposita en rellenos sanitarios como son: Tijuana, Nogales, Cd. Juárez, y Nuevo Laredo entre otros, lo que significa que 64 mil toneladas mensuales, permanecen en tiraderos a cielo abierto.

Las 84,200 toneladas diarias de basura que se producen en el país, requerirían 112,250 m<sup>3</sup> por día para depositarlas. Esto da una idea de la necesidad de terreno y de la importancia de diseñar estrategias para su manejo integral, que incluyan acciones como la de reducir la cantidad de basura desde la fuente.

En localidades rurales y semiurbanas de menos de 20,000 habitantes, se han construido rellenos sanitarios de operación manual como es el caso de la Sierra Gorda de Querétaro. Este tipo de obras se debe complementar con acciones de capacitación y educación ambiental, así como de estrategias de reducción en la fuente, sobre todo dirigidas a los residuos orgánicos los cuales pueden ser transformados en composta a nivel domiciliario. Es necesario fomentar este tipo de rellenos y estrategias, debido a que la mayoría de los municipios del país se encuentran en este rango de población.

### 3. PROBLEMAS DE SALUD Y AMBIENTALES ASOCIADOS AL MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS<sup>2</sup>

#### ➤ Impactos en la salud pública

El manejo inadecuado de los residuos sólidos puede generar significativos impactos negativos para la salud humana. Los residuos son una fuente de transmisión de enfermedades, ya sea por vía hídrica, por los alimentos contaminados por moscas y otros vectores. Si bien algunas enfermedades no pueden ser atribuidas a la exposición de los seres humanos a los residuos sólidos, el inadecuado manejo de los mismos puede crear condiciones en los hogares que aumentan la susceptibilidad a contraer dichas enfermedades.

Por otro lado, prácticamente no existen sitios adecuados para procesamiento y disposición de residuos tóxicos. Los contaminantes biológicos y químicos de los residuos son transportados por el aire, agua, suelos, y pueden contaminar residencias y alimentos (por ejemplo: carne de cerdo criados en tiraderos que transmite cisticercosis) representando riesgos a la salud pública y causando contaminación de los recursos naturales. Las poblaciones más susceptibles de ser afectadas son las personas expuestas que viven en los asentamientos pobres de las áreas marginales urbanas y que no disponen de un sistema adecuado de recolección domiciliar regular. Otro grupo de riesgo es el de las personas que viven en áreas contiguas a tiraderos clandestinos o tiraderos a cielo abierto. La población más expuesta a los riesgos directos son los recolectores y pepenadores que tienen contacto directo con los residuos, muchas veces sin protección adecuada, así como también a las personas que consumen restos de alimentos extraídos de la basura. Los pepenadores, y sus familias, que viven en la proximidad de los tiraderos pueden ser, a su vez, propagadores de enfermedades al entrar en contacto con otras personas.

La disposición final de residuos en un tiradero a cielo abierto constituye una amenaza para la salud pública, principalmente por la proliferación de vectores. En un tiradero a cielo abierto es común la presencia de animales que se alimentan con los residuos ahí depositados y que muchas veces amenazan la seguridad de la aviación civil, cuando están en las proximidades de los aeropuertos. El polvo transportado por el viento desde un tiradero a cielo abierto puede portar patógenos y materiales peligrosos. En estos sitios, durante la biodegradación o quema de la materia orgánica se generan gases orgánicos volátiles, tóxicos y algunos potencialmente carcinógenos (por ejemplo, bencina y cloruro vinílico), así como subproductos típicos de la biodegradación (metano, sulfuro de hidrógeno y bióxido de carbono). El humo generado de la quema de basura en tiraderos a cielo abierto constituye un importante irritante respiratorio e influye en que las poblaciones expuestas sean mucho más susceptibles a las enfermedades respiratorias.

---

<sup>2</sup> Adaptado de: **Guía para Evaluación de Impacto Ambiental Para Proyectos de Residuos Sólidos Municipales**. Banco Interamericano de Desarrollo Diciembre, 1997.

Los residuos sólidos pueden contener sustancias orgánicas e inorgánicas perjudiciales a la salud humana, (Tabla 5), y al ambiente natural. Un número alto de enfermedades de origen biológico o químico están directamente relacionados con la basura y pueden transmitirse a los humanos y animales por contacto directo de los desechos o indirectamente a través de vectores (Tabla 6).

**Tabla 5**  
**Ejemplos de residuos peligrosos y sus efectos sobre la salud humana**

<b>Tipo de sustancia</b>	<b>Síntoma/enfermedad</b>
Bario	Efectos tóxicos en el corazón, vasos sanguíneos y nervios
Cadmio	Acumulación en el hígado, riñones y huesos
Arsénico	Toxicidad crónica o aguda (por acumulación), pérdida de energía y fatiga, cirrosis, dermatitis. Se acumula en los huesos, hígado y riñones.
Compuestos orgánicos (benceno, hidrocarburos, plaguicidas, etc.)	Cancerígenos
Cromo	Tumores de pulmón
Mercurio	Vómitos, náuseas, somnolencia, diarrea sanguinolenta, afecciones al riñón
Plaguicidas organofosforados, organoclorados, carbamatos, clorofenóxidos	Afecciones al cerebro y sistema nervioso
Plomo	Anemia, convulsiones, inflamaciones

**Tabla 6**  
**Enfermedades transmitidas por vectores relacionados con residuos sólidos**

<b>Vectores</b>	<b>Forma de transmisión</b>	<b>Principales enfermedades</b>
Ratas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A través del mordisco, orina y heces.</li> <li>• A través de las pulgas que viven en el cuerpo de la rata.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peste bubónica</li> <li>• Tifus murino</li> <li>• Leptospirosis</li> </ul>
Moscas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Por vía mecánica (a través de las alas, patas y cuerpo).</li> <li>• A través de la heces y saliva.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fiebre tifoidea</li> <li>• Cólera</li> <li>• Salmonelosis</li> <li>• Amebiasis</li> <li>• Disentería</li> <li>• Giardiasis</li> </ul>
Mosquitos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A través de la picazón del mosquito hembra.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Malaria</li> <li>• Leishmaniosis</li> <li>• Fiebre amarilla</li> <li>• Dengue</li> <li>• Filariosis</li> </ul>
Cucarachas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Por vía mecánica (a través de alas, patas y cuerpo) y por la heces.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fiebre tifoidea</li> <li>• Cólera</li> <li>• Giardiasis</li> </ul>
Cerdos y ganado.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Por ingestión de carne contaminada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cisticercosis</li> <li>• Toxoplasmosis</li> <li>• Triquinosis</li> <li>• Teniasis</li> </ul>
Aves	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A través de las heces</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Toxoplasmosis</li> </ul>

Fuente: **Manual de Saneamiento e Proteção Ambiental para os Municípios**, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA/UFMG). Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM/MG), 1995.

En la mayoría de las ciudades del país no existe una recolección segura para los desechos tóxicos y peligrosos, lo que aumenta los riesgos a la salud de los trabajadores de recolección que, además de carecer de protección especial, no toman las precauciones necesarias para el manejo de esos desechos. Es común que los residuos hospitalarios e industriales sean descargados junto con la basura doméstica en los puntos de disposición final municipal, sin ninguna medida especial para proteger a los trabajadores formales e informales.

La exposición humana a los residuos peligrosos puede ocurrir:

- a) en los sitios de su producción (exposición ocupacional o exposición durante accidentes);
- b) durante el transporte de residuos en el caso de accidentes, y
- c) en los sitios donde se almacenan o se depositan para su tratamiento.

Los trabajadores formales e informales se encuentran expuestos a diversos factores de riesgos generados por las tareas de manejo y transporte de los residuos sólidos. La falta de medidas de prevención y control de riesgos, especialmente en la recolección manual de los mismos y debido a las condiciones poco seguras del manejo de la basura, falta de hábitos y condiciones de higiene entre los trabajadores aumenta la incidencia de accidentes y enfermedades asociadas, tales como los cortazos por materiales punzocortantes, las infecciones y otras enfermedades asociadas a exposición a productos peligrosos.

Entre las medidas de prevención y protección de la salud de los trabajadores se debe incluir la vacunación de todas las personas en contacto con la basura, la protección individual con equipos apropiados, programas de educación sanitaria y el acceso limitado a los tiraderos.

#### ➤ **Impactos sobre el medio ambiente natural**

La importancia de los impactos ambientales asociados a los residuos sólidos depende de las condiciones particulares de la localización, geomorfología, y demás características de los medios físico, biótico y antrópico, así como las características de los materiales desechados. De una manera general el manejo de los residuos sólidos pueden producir impactos sobre las aguas, el aire, el suelo, la flora y la fauna y ecosistemas tales como:

- **Contaminación de los recursos hídricos.** El vertimiento de residuos sólidos sin tratamiento puede contaminar las aguas superficiales o subterráneas usadas para el abastecimiento público, además de ocasionar inundaciones por obstrucción de los canales de drenaje y del alcantarillado.

La contaminación de las aguas superficiales se manifiesta en forma directa con la presencia de residuos sobre los cuerpos de agua, incrementando de esta forma la carga orgánica con la consiguiente disminución de oxígeno disuelto, incorporación de nutrientes y la presencia de elementos físicos que imposibilitan usos ulteriores del recurso hídrico y comprometen severamente su aspecto estético. En forma indirecta, la escorrentía y lixiviados provenientes de los sitios de disposición final de residuos sin tratamiento, incorpora tanto a las aguas superficiales, como a los acuíferos, los principales contaminantes caracterizados por altas concentraciones de materia orgánica y sustancias tóxicas. La contaminación de los cursos de agua puede significar la pérdida del recurso para consumo humano o

recreación, ocasionar la muerte de la fauna acuática y el deterioro del paisaje. Estos factores y las respectivas medidas de mitigación deben ser considerados en un plan de manejo eficiente de los residuos sólidos. En caso de disposición en manglares la contaminación hídrica puede ocasionar su deterioro.

- **Contaminación atmosférica.** Los principales impactos asociados a la contaminación atmosférica son los olores molestos en las proximidades de los sitios de disposición final y la generación de gases asociados a la digestión bacteriana de la materia orgánica, y a la quema. La quema al aire libre de los residuos o su incineración sin equipos de control adecuados, genera gases y material particulado, tales como, furanos, dioxinas y derivados organoclorados, problemas que se acentúan debido a la composición heterogénea de residuos con mayores tenores de plásticos.
- **Contaminación del suelo.** La descarga y acumulación de residuos al aire libre en sitios producen impactos estéticos, malos olores y polvos irritantes. El depósito de residuos en sitios frágiles o inestables y en depresiones causadas por erosión puede ocasionar derrumbes y residencias construidas en áreas de riesgo o suelos con pendiente. Además, el suelo que subyace los desechos sólidos depositados en un tiradero a cielo abierto o en un relleno sanitario se contamina con microorganismos patógenos, metales pesados, sustancias tóxicas e hidrocarburos clorinados que están presentes en el lixiviado de los desechos.
- **Amenazas a flora y fauna.** Los impactos ambientales directos sobre la flora y fauna se encuentran asociados, en general, a la remoción de especímenes de la flora y a la perturbación de la fauna nativa durante la fase de construcción, y a la operación inadecuada de un sistema de disposición final de residuos.
- **Alteraciones del medio antrópico.** El aspecto sociocultural tiene un papel crítico en el manejo de los residuos. Uno de los principales problemas es la falta de conciencia colectiva y/o conductas sanitarias por parte de la población para disponer sus residuos, dejándolos abandonados en calles, áreas verdes, márgenes de los ríos, playas, deteriorando así las condiciones del paisaje existente y comprometiendo a la estética y al medio.

Por otro lado, la degradación ambiental conlleva costos sociales y económicos tales como la devaluación de propiedades, pérdida de turismo, y otros costos asociados, tales como, la salud de los trabajadores y de sus dependientes. Impactos positivos pueden ser la generación de empleos, el desarrollo de técnicas autóctonas, de mercados para reciclables y materiales de reúso.

#### 4. DECISIÓN SOBRE LA CLAUSURA O REHABILITACIÓN<sup>3</sup>

De acuerdo con la realidad que se vive en la mayoría de las localidades en el país, gran parte de la disposición final de los residuos sólidos municipales tiene lugar en los llamados tiraderos a cielo abierto, los cuales constituyen una importante fuente de contaminación ambiental y a la salud pública.

Por tal motivo, los procesos para rehabilitar sitios de disposición final no controlada, con el fin de que reinicien trabajos bajo esquemas de operación programada y vigilancia, son de gran importancia debido al punto de la curva de aprendizaje en que se encuentran los encargados de los servicios de limpia en los municipios en lo relacionado al manejo adecuado de los residuos sólidos.

La clausura y saneamiento ambiental de los sitios que se encuentran en operación pero que han llegado a los límites de vida útil o que están en situaciones inadecuadas para rehabilitarlos, constituye el último paso del ciclo de vida de los residuos sólidos municipales. Sin embargo, esta etapa es la que representa la continuidad en el que los aspectos de monitoreo, mantenimiento y control son fundamentales para garantizar las medidas sanitarias básicas a largo plazo.

Antes de rehabilitar, clausurar y/o sanear un sitio de disposición inadecuada (tiradero), se debe tener un buen diagnóstico en lo referente al tipo de basura arrojada, los riesgos potenciales y posibles emisiones al ambiente. Una correcta toma de decisiones esta basada en este diagnóstico, además de que es el punto de partida para la planeación de acciones tendientes a mitigar los riesgos ambientales y a la salud. A continuación se presenta la definición de estos tres conceptos básicos:

- **Rehabilitación:** es la acción de recuperar o restituir la capacidad de un sitio de disposición final para continuar con el confinamiento de residuos sólidos municipales, siempre y cuando se cumpla con un mínimo de requisitos en cuanto a la capacidad volumétrica del sitio, forma de operación, mecanismos de control, protección al ambiente y a la salud pública.
- **Clausura:** Etapas correspondientes al cierre definitivo de un sitio de disposición final de residuos sólidos municipales al término de su vida útil, cumpliendo con los requisitos mínimos para procurar la estabilidad, monitoreo sanitario y ambiental a largo plazo.

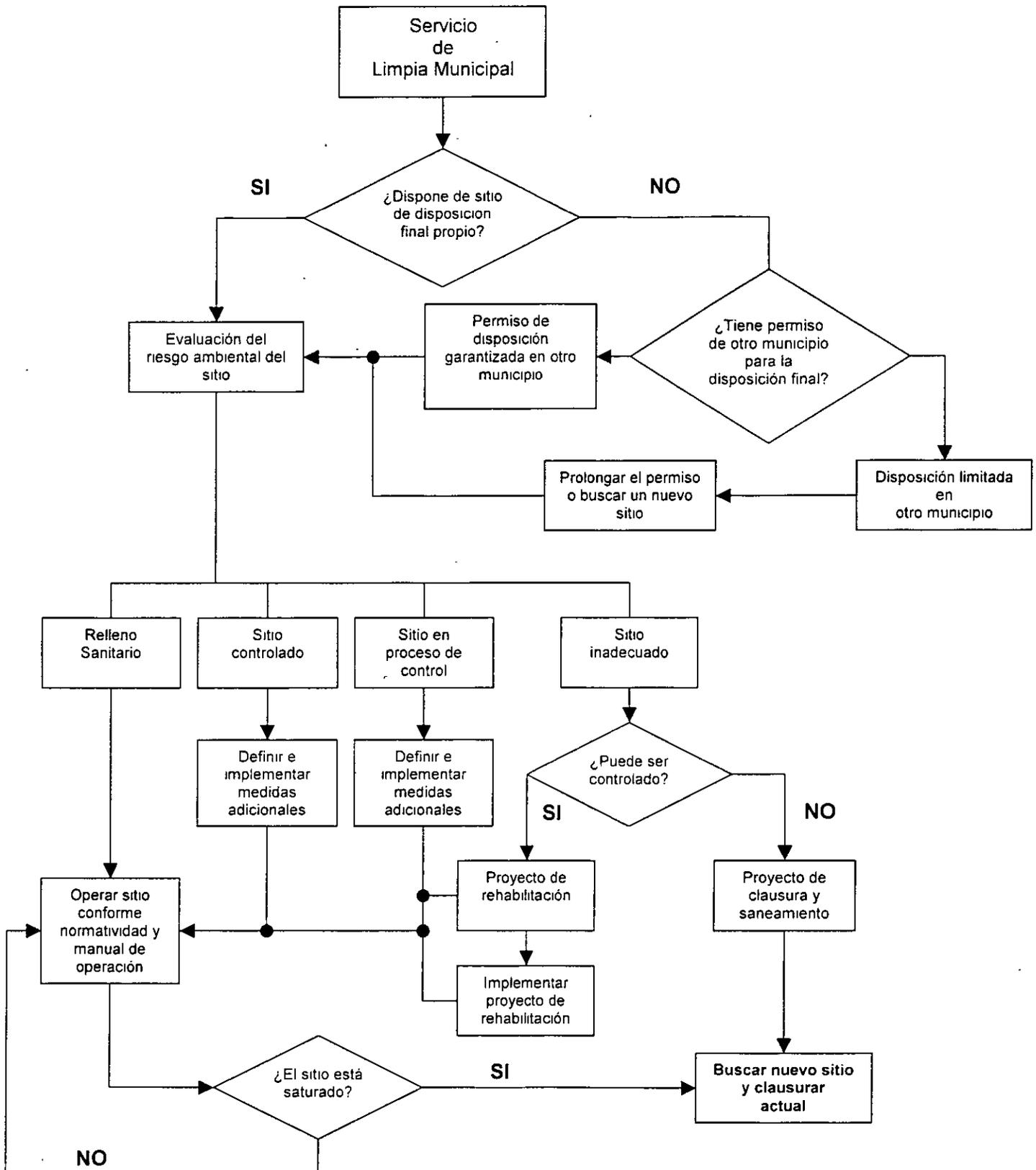
---

<sup>3</sup> Adaptado de **Manual para la Rehabilitación, Clausura y Saneamiento de Tiraderos a Cielo Abierto en el Estado de México**. Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación del Agua, Suelo y Residuos y Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GMBH (Agencia Alemán de Cooperación Técnica). Diciembre del 2000.

- **Saneamiento ambiental:** acciones de remediación y reparación tendientes a devolver, mediante el control ambiental, las características naturales al sitio utilizado como depósito final de los residuos sólidos municipales, una vez que este ha sido clausurado, de manera tal que esté en armonía con el entorno y no ofrezca riesgos a la salud de la población ni de contaminación al ambiente. Las entidades gubernamentales deben ser consideradas en la elaboración y autorización de un proyecto de rehabilitación, clausura y/o saneamiento de tiraderos. Además, se recomienda involucrar a todos los grupos sociales en este proceso, para tener en cuenta la información particular de cada sector en las necesidades y procedimientos a los que debe darse seguimiento.

Con el fin de que los sitios de disposición final reúnan los criterios fijados por la normatividad y aspectos técnicos y operativos vigentes, la Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación del Agua, Suelo y Residuos de la Secretaría de Ecología del Estado de México ha diseñado una metodología con la que se evalúan las acciones que buscan la rehabilitación, clausura y saneamiento ambiental de los sitios de disposición final.

## Toma de decisión sobre las medidas necesarias a implementar en los sitios de disposición final de RSM (rehabilitación, clausura y saneamiento)



### ➤ **Evaluación de la situación de la disposición final de RSM en el municipio**

La primera pregunta a plantear, en cuanto a la disposición final de los residuos sólidos generados en una localidad es si se cuenta con un sitio de disposición final. En caso negativo, el municipio no precisa tomar medidas para la rehabilitación, clausura y/o saneamiento, pero es indispensable verificar si realmente no existen sitios antiguos, abandonados o ilegales que puedan requerir acciones específicas. En caso afirmativo los municipios deben tomar medidas descritas en los párrafos siguientes.

Aún los municipios que no disponen de un sitio de disposición final propio, tienen que garantizar que sus RSM sean depositados adecuadamente. Esto puede ser en sitios en otras entidades, generalmente pagando por el servicio prestado. Los permisos para la disposición generalmente son limitados hasta el final de una administración. Es obligación por parte del municipio generador de basura garantizar este servicio en forma permanente, sin que se vea afectado por los cambios de administración en el Ayuntamiento.

Si el municipio dispone de un sitio de disposición final, la autoridad competente debe, en conjunto con el municipio, verificar que con qué tipo de sitio cuenta. La clasificación del tipo de sitio de disposición final está en función de la información particular del municipio, ya que un sitio controlado puede convertirse nuevamente en tiradero si no se tiene el cuidado de operarlo conforme al proyecto ejecutivo y normatividad vigente.

### ➤ **Evaluación del riesgo ambiental**

Para definir la categoría a que pertenece el sitio de disposición final, es necesaria la elaboración de un diagnóstico profundo de la situación que este guarda. Esto implica documentar el estado en que se encuentra el sitio y sus alrededores, incluyendo la contaminación del aire y agua, la dispersión de residuos, aspectos visuales, afectación en asentamientos vecinos, usos del suelo, impacto en flora y fauna, etc. Si ya existe el conocimiento suficiente, la clasificación bajo un nuevo diagnóstico no es necesaria.

La primera evaluación se debe hacer mediante visitas al campo, de preferencia, en conjunto con un técnico especialista y personal del municipio que conozca bien el sitio y su historia. Los resultados deben ser documentados incluyendo la descripción de las medidas a realizar. Esta lista de verificación debe complementarse con el levantamiento de información documental de fácil acceso. La investigación debe incluir:

- Planos de la zona donde se ubica el tiradero y sus alrededores (escala 1:25,000; 1:10,000 y 1:5,000).

- Documentación de la extensión del sitio (dimensiones)
- Documentación de la profundidad y morfología (relieve) del tiradero.
- Planos geológicos y/o hidrogeológicos del área afectada.
- Evaluación de riesgo ambiental del sitio.
- Información de la situación geológica y de agua subterránea debajo del tiradero.
- Documentación fotográfica de la situación real y, si existen, de la antigua forma en que operaba el sitio o de la situación local antes de la creación del tiradero.
- Información sobre la contaminación del suelo, del agua y aire en el sitio y sus alrededores.
- Historia del sitio (desde cuando funciona, uso anterior).
- Tipo y cantidad de basura arrojada al tiradero. De ser posible identificar las fuentes y lugar de procedencia.
- Información sobre la forma de operación.
- Información acerca de responsables de la operación (municipio, empresa, etc.).
- Equipo existente en el sitio (maquinaria permanente y/o temporal, tipo y cantidad).
- Medidas de monitoreo o posibilidades de realizarlas cerca del sitio.
- Re - evaluación del potencial de peligrosidad del sitio.
- Clasificación actual según criterios de SEGEM.

Este diagnóstico es una base indispensable para la decisión del futuro del sitio, es decir, la posibilidad de rehabilitación, la necesidad de mover residuos (peligrosos) del sitio, el tipo de cubierta y uso posterior que se dará al área.

El diagnóstico y la evaluación deberán incluir una propuesta referente a las medidas previstas y proyectadas, así como la calendarización de actividades.

Su elaboración puede ser por las autoridades responsables del manejo del sitio o por un profesional especializado que sea contratado para tal fin. Si el sitio de disposición final está clasificado como relleno sanitario, no hay necesidad de tomar acciones referentes a la rehabilitación o clausura, siempre y cuando el sitio no este saturado. En este último caso es obligación del municipio garantizar la operación del relleno conforme al proyecto y la normatividad, independientemente si él es el encargado de la operación o si el servicio esta concesionado.

### ➤ **Definición de medidas**

De acuerdo con la clasificación del sitio de disposición basado en la evaluación anterior, hay una serie de medidas que pueden ser tomadas. Cada medida tiene que ser adecuada a la situación específica y a su vez la combinación de acciones tiene que ser evaluada respecto al funcionamiento y a la posibilidad económica considerando los efectos ambientales deseados. Para acatar las posibilidades

económicas del municipio, se debe elaborar una calendarización de las medidas a realizar combinada con la estimación de costos de cada una de ellas. Como resultado de la evaluación del sitio de disposición final, se puede definir si una rehabilitación es factible o no.

➤ **Rehabilitación del sitio de disposición final**

La rehabilitación de un sitio de disposición final tiene la finalidad de permitir la disposición de RSM bajo una operación y manejo controlado. En este caso los requisitos pueden variar en función de la cantidad de RSM que ingresan por día al sitio y del estado en que se encuentra actualmente. Los sitios ya controlados o en proceso de controlados deben ser reevaluados frecuentemente para garantizar un manejo adecuado.

➤ **Definición de las medidas de planificación**

Una vez elaborada la evaluación de riesgo ambiental del sitio se tiene la información suficiente para tener un primer acercamiento de las medidas a tomar, además se podrán definir los estudios previos que se requieren para la elaboración del proyecto, ya sea rehabilitación y clausura o saneamiento.

Aún no es posible transformar un tiradero a un relleno sanitario, pero sí a un sitio controlado. Este último debe aproximarse al máximo posible a un relleno sanitario implementando las respectivas estructuras, sobre todo las de control de lixiviado y biogás.

Los estudios adicionales requeridos para esta transformación son parecidos a los requeridos para la elaboración de un proyecto ejecutivo de relleno sanitario.

## 5. ESTUDIOS BÁSICOS<sup>4</sup>

Como en la mayoría de los proyectos de ingeniería, la rehabilitación de tiraderos a cielo abierto requiere de la elaboración de un cierto número de estudios previos, de manera que se cuente con la información básica necesaria para proceder a la elaboración del proyecto correspondiente.

Algunas de las características del sitio de disposición final, se encuentran determinadas por el sistema de manejo de residuos sólidos de la localidad (generación, almacenamiento, recolección, etc.), así como por las particularidades de los residuos que se disponen en el sitio (composición, características físico-químicas, etc.). Por lo tanto, se considera necesario contemplar el diagnóstico de estos elementos del ciclo de los residuos sólidos, aún cuando parezcan ser independientes del sistema de disposición final. Los estudios básicos mínimos que se deberán considerar son los siguientes:

- **Análisis de residuos sólidos**

Como ya ha sido mencionado, en buena medida las condiciones y características que presenta un tiradero a cielo abierto dependen de las particularidades de los residuos sólidos municipales propios de la localidad donde éstos se generan. Si bien existe una cierta similitud en las características de los residuos de las distintas regiones del país, es conveniente que se efectúe un análisis para cada localidad en particular, ya que pueden existir diferencias importantes de una ciudad a otra debido a razones sociales, económicas y climatológicas principalmente.

Por lo tanto, se deberá considerar la realización de los estudios necesarios tendientes a establecer las características particulares de los residuos de la localidad de que se trate en cada caso. De esta manera, el análisis de los residuos sólidos contempla, por una parte la determinación de las cantidades generadas (per-cápita y total) y, por otra, las características de los residuos generados.

La determinación de la cantidad de residuos sólidos que se genera en una localidad, es el punto de partida para el diseño de prácticamente todos los subsistemas que componen el sistema de aseo urbano. Para el caso del diseño de un relleno sanitario, o bien para el de la clausura o rehabilitación de un tiradero a cielo abierto, esta determinación es fundamental, ya que establece el volumen de residuos que será necesario disponer en el sitio diariamente, entre otros.

Esta determinación se lleva a cabo mediante la realización de un estudio de generación de residuos sólidos en las fuentes generadoras, las cuales pueden clasificarse para este efecto, en domiciliarias y otras (hoteles, restaurantes,

---

<sup>4</sup> **Manual para la Rehabilitación y Clausura de Tiraderos a Cielo Abierto.** Dirección General de Infraestructura y Equipamiento, Secretaría de Desarrollo Social.

comercios, espacios públicos, instituciones, etc.). De esta manera llega a establecerse la cantidad generada de residuos sólidos, generalmente en toneladas por día, para cada una de las fuentes mencionadas.

A partir de los residuos sólidos obtenidos durante el muestreo, se determinan una serie de parámetros que son necesarios para su caracterización y aplicación en el diseño o selección de equipos e instalaciones que intervienen en todo el sistema de aseo urbano. Dentro de estos parámetros se encuentra la composición física (porcentajes de cartón, papel, vidrio, lata, etc.), el peso volumétrico ( $\text{kg/m}^3$ ), la composición química (azufre, carbono, oxígeno, etc.), así como otras propiedades tales como humedad, cenizas, materia orgánica, entre otros.

- **Geofísica y Geohidrología**

Por lo general, dadas las particularidades y la forma en que se opera un tiradero a cielo abierto, es difícil que el responsable de su operación cuente con información relativa a las características geológicas y especialmente geohidrológicas del sitio donde se ubica el tiradero. En ocasiones, es posible que las oficinas locales de la Comisión Nacional del Agua (CNA) o del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) cuenten con estudios preliminares o bien con datos de pozos cercanos; lo que puede constituirse en una buena fuente de información sobre las condiciones geohidrológicas de la zona.

Esta información es necesaria para establecer si existe un acuífero en la zona y su profundidad, así como el gasto y dirección del flujo, entre otros. De esta manera será posible determinar el potencial de contaminación hacia el suelo y acuífero en la zona, en caso de que éste subyazca al tiradero.

Por lo tanto, en el caso de que no se disponga de la información anterior, será necesario llevar a cabo los estudios geofísicos y/o geohidrológicos que se requieran para generarla.

Una manera indirecta de caracterizar el subsuelo en un sitio, es mediante un estudio geofísico; para realizarlo, se utiliza un equipo especial, el cual consta básicamente de un aparato emisor, otro receptor y los correspondientes electrodos. Con este equipo se llevan a cabo sondeos eléctricos verticales en la zona de estudio, para lo cual se le ubica siguiendo distintos arreglos, dependiendo de la superficie a medir y de las características del sitio. La determinación de las resistividades en campo y su posterior interpretación y análisis, permiten conocer las características del subsuelo con una buena aproximación.

- **Topografía**

Dentro de los estudios básicos se contempla la realización de aquellos correspondientes a la topografía del sitio. En este renglón, pueden distinguirse primeramente los trabajos relativos a la localización y orientación del terreno.

En segundo lugar, se contemplan los trabajos correspondientes a la altimetría, secciones y curvas de nivel del terreno. En este sentido, el relieve topográfico de un sitio de disposición final de residuos sólidos municipales, es un parámetro que varía constantemente, debido a la acumulación de los residuos en las áreas para ello destinadas. Por lo tanto, estos trabajos se realizarán en la medida de lo posible y de acuerdo a las condiciones de cada sitio en particular.

Un aspecto importante dentro de los trabajos topográficos lo constituye la determinación del relieve original del sitio a nivel de terreno natural. En este sentido, se deberán localizar estudios topográficos que hayan sido efectuados en forma previa al inicio de operaciones en el sitio, en caso de que aquellos existan o, en su caso, puede recurrirse a restituciones fotogramétricas para tal fin.

- **Análisis de lixiviados, biogás y agua subterránea**

Los residuos sólidos que se acumulan en un tiradero a cielo abierto, sufren una serie de alteraciones con el paso del tiempo, debido principalmente a la biodegradación de la fracción orgánica contenida en ellos, así como a la lixiviación producto de la precipitación e infiltración pluvial. Por lo anterior, se hace necesaria la realización de ciertos análisis fisicoquímicos en muestras de diversa índole tomadas en el sitio de disposición final, consistentes en lixiviados, biogás y agua subterránea.

El muestreo y análisis de lixiviados permitirá obtener una caracterización particular de éstos en el sitio donde fueron generados, lo cual a su vez servirá como información básica para determinar si es necesario su tratamiento y, en su caso, el tipo de tratamiento requerido.

Por su parte, la caracterización del biogás permitirá conocer la composición de éste, estableciendo los elementos y compuestos que lo conforman y, por lo tanto, el nivel de riesgo presente en el sitio debido a este elemento, incluyendo la eventual presencia de vapores orgánicos tóxicos en el biogás. Esta información es necesaria, asimismo, para definir el potencial de aprovechamiento del biogás, así como para establecer las bases de diseño de los sistemas de captación y control del mismo.

Para el agua subterránea, su caracterización estará en función de diversos factores. Primeramente, resulta obvio que es necesario que ésta esté presente en el sitio, es decir, que exista un acuífero a una profundidad razonable como para poder llevar a cabo la toma de la muestra correspondiente. En segundo término,

se requiere contar con información sobre la existencia de pozos en la zona, y adicionalmente, conocer la dirección del flujo del acuífero, de manera que la muestra de agua subterránea sea tomada aguas abajo con relación a la ubicación del tiradero. El análisis fisicoquímico del agua permitirá establecer si ésta se encuentra contaminada por la presencia del tiradero a cielo abierto en la zona.

- **Climatología y meteorología**

Como ya se ha mencionado, la precipitación pluvial es un factor importante en la generación de lixiviados en un sitio de disposición final. Existen además otros factores de este tipo que influyen en los efectos de las condiciones de un tiradero a cielo abierto, como pueden ser la humedad relativa, temperatura, dirección de viento, evapotranspiración, etc. Esta información es necesaria fundamentalmente para estimar los volúmenes de generación de lixiviados en el tiradero a lo largo de los años, y posteriormente, para el diseño de las obras de control de los mismos.

Los datos de precipitación se requieren para el diseño de algunas otras obras en el sitio, como es el control de escurrimientos superficiales, entre otras.

Por lo general, los datos anteriores pueden encontrarse en las delegaciones de la Comisión Nacional del Agua, obtenidos a partir de las estaciones meteorológicas operadas por esta dependencia más cercanas a la zona de estudio.

- **Mecánica de suelos**

Las propiedades mecánicas de los suelos pueden variar de manera significativa, dependiendo de la ubicación de un sitio de disposición final. Estas propiedades tienen gran influencia en el comportamiento de diversos fenómenos presentes en los tiraderos a cielo abierto; por lo que resulta de suma importancia su determinación mediante los trabajos de campo y laboratorio que se requieran. Los parámetros a determinar pueden ser variables, pero se recomienda que se efectúen los siguientes:

- Capacidad de carga.
- Clasificación de suelos.
- pH.
- Permeabilidad.
- Granulometría.
- Humedad.
- Capacidad de intercambio catiónico.
- Contenido orgánico total.
- Porosidad.
- Peso volumétrico.
- Límites de consistencia.

Eventualmente, además de los anteriores, puede resultar necesaria la realización de la prueba de compresión triaxial y de compactación próctor estándar.

Con los resultados que se obtengan para los parámetros arriba enlistados, será posible establecer la necesidad de realizar algunas obras particulares relativas a la clausura de un sitio en particular: se podrá establecer la altura máxima del relleno, el potencial de infiltración de lixiviados, el espesor mínimo de suelo requerido para eliminar la agresividad de éstos, etc.

## 6. CLAUSURA

## 7. REHABILITACIÓN

La rehabilitación de los tiraderos a cielo abierto tiene la finalidad de disminuir y mitigar los impactos al ambiente, mejorar la imagen del sitio y la operación del mismo pero bajo condiciones controladas. Esto no significa el cumplimiento total con los requisitos de la NOM-ECOL-083-1996, aunque estos deben considerarse en la toma de decisiones. El no cumplir con estos requerimientos aún puede significar la realización de medidas adicionales para compensar las deficiencias.

Los criterios básicos para considerar la rehabilitación de un tiradero a cielo abierto son tres:

- a) Cumplir con los requisitos fijados por la NOM-083-ECOL-1996 (Ver Anexo II)
- b) Tener una vida útil que justifique la inversión en la rehabilitación.
- c) Compromiso de las autoridades municipales y encargados del servicio de limpia para rehabilitar el sitio, operándolo bajo las formas y criterios que la SEGEM establezcan como adecuados.

Antes de la elaboración del proyecto ejecutivo se recomienda la elaboración de un anteproyecto que presente principalmente el concepto y sus líneas principales, así como alternativas de solución. Sobre el anteproyecto se debe buscar un acuerdo con las autoridades competentes, para posteriormente elaborar el proyecto ejecutivo.

- **Cálculo de vida útil.** Este cálculo es importante para tomar la decisión, con base en un análisis costo-beneficio, y si la inversión para la rehabilitación justifica la continuidad en el uso del sitio para disposición final. Las inversiones relacionadas a la estabilización de los residuos, la clausura y saneamiento no estarán consideradas con respecto a la vida útil, ya que estas acciones se necesitarán independientemente del uso futuro. En general, se recomienda la rehabilitación cuando la vida útil restante del sitio es mayor de 5 años. Los parámetros para el cálculo de la vida útil son: volumen disponible, densidad que se puede alcanzar con la compactación y cantidad de RSM ingresados por día.

Para el cálculo del volumen disponible se requiere de los datos del estudio topográfico. Para la densidad se necesita conocer el tipo de maquinaria y forma de operación en el sitio. La cantidad de residuos a ingresar esta en función de la generación y el porcentaje de recolección de los residuos generados.

- **Infraestructura.** Para la rehabilitación de los tiraderos no es posible aplicar todas las medidas de infraestructura necesaria de un relleno sanitario, especialmente la impermeabilización por debajo del material ya depositado, ya que esto es posible a través de tecnologías muy costosas.

Algunas de las medidas que pueden aplicarse en la rehabilitación dependen de las condiciones locales y de la prioridad que se tenga para la construcción de esta infraestructura.

La caseta de vigilancia permite controlar mejor la cantidad y calidad de los residuos entrantes. En los casos de grandes ingresos de RSM, puede recomendarse instalar a un lado una balanza para llevar un control. Además permite que la vigilancia tenga un control de las personas y vehículos que entran al sitio.

El relleno sanitario debe estar delimitado por una cerca perimetral para evitar el paso de animales y de personas ajenas. Por lo general, la cerca consiste de una malla ciclónica con una altura mayor de 2 m.

Con el levantamiento topográfico de la zona se definen las áreas que ya no serán utilizadas para disposición final. Estas deberán clausurarse conforme al *Capítulo 4* de este manual.

El movimiento de los residuos y su estabilización deben planearse, ya que en la rehabilitación es importante crear el mayor volumen útil posible. Las actividades consisten básicamente en el movimiento de los residuos y su conformación.

- **Movimiento de residuos sólidos:** consiste en empujar los RSM que se encuentran esparcidos sobre el terreno, hacia el área destinada para la conformación de la celda, de manera que se aproveche de mejor manera el terreno disponible.

Conformación de los residuos en la menor área posible, mediante la construcción de celdas o capas, de acuerdo al método seleccionado. En esta actividad se emplea maquinaria, manejando capas de 0.3 a 0.5 m de espesor de RSM con el fin de darles compactación.

Frecuentemente es necesario estabilizar el tiradero ya que se presentan pendientes fuertes con material poco compactado o por que el tiradero mismo se fue creando a lo largo de una pendiente. Las Figuras 4 y 5 muestran fotografías de una pendiente antes y después de una estabilización. Las pendientes óptimas no deben pasar de una relación de 1:2.

Proponer y seleccionar el método de operación para la rehabilitación del sitio requiere de evaluar las características y condiciones en que se encuentren depositados los RSM en el terreno, con la finalidad de que se efectúe el menor movimiento de residuos y aprovechar al máximo el volumen disponible. Experiencias prácticas muestran que una compactación posterior es muy limitada, solamente alcanza para los últimos 30 a 50 cm depositados.

Las características naturales y artificiales de la zona alrededor del tiradero definen el escurrimiento del agua superficial. Para limitar la infiltración de las aguas superficiales de origen pluvial, se construyen drenes arriba del cuerpo del sitio rehabilitado (por la vista de dirección del flujo) para captarlas y desviarlas.

Con este método se reduce la cantidad de lixiviados. Además el agua que no percola a través del sitio de disposición puede ser aprovechada ya que no está contaminada. Para el cálculo de la dimensión de los drenes se tiene que considerar el área de influencia (cuenca hidrológica).

En los casos en el que el sitio permite todavía una extensión horizontal, en estas áreas se deberán aplicar los mismos métodos de ingeniería de impermeabilización que en un relleno sanitario. Conforme a la normatividad vigente en materia de sitios de disposición final, se deberá garantizar una permeabilidad de  $1 \times 10^{-7}$  cm/seg en forma homogénea sobre el sitio a una profundidad mínima de 1.5 m.

Esta impermeabilización se puede alcanzar con material natural (tepetate) bien compactado o con una geomembrana (espesor  $>1.5$  mm) o una combinación de los dos. Las áreas previstas para la extensión se presentarán en un plano a escala 1:1,000.

Cuando el agua percola a través de varios materiales, remueve algo de sólidos, teniendo un alto poder contaminante. A esta agua y su contenido se le denomina lixiviado. La infraestructura necesaria para su captación incluye sistemas de impermeabilización colocados con cierta pendiente para conducir por gravedad el lixiviado a los tubos colectores. El diámetro de los tubos está en función de la cantidad de lixiviados previamente calculados. Este sistema colector extrae el lixiviado y lo lleva a tratamiento.

El sistema de captación de lixiviados deberá instalarse inmediatamente por encima del sistema de impermeabilización. Estos sistemas deberán ser capas drenantes, ubicadas en la base del sitio de disposición y sobre cualquier capa superior donde se espere tener acumulación de líquidos.

Los lixiviados generados en un tiradero, en su mayor parte se infiltran en el subsuelo, contaminando las aguas subterráneas. Esta infiltración no puede impedirse posteriormente, principalmente por razones económicas ya que sería necesario remover todos los residuos que ya han sido depositados. Sin embargo,

la generación de lixiviado se puede reducir considerablemente si se desvían las aguas pluviales (ver arriba) y el cierre del sitio con material impermeable (ver parte referida a la clausura). Los lixiviados que tienen salida lateral deberán ser captados de la misma forma que los generados en la zona de ampliación (rehabilitación) y ser evacuados.

Existen varias opciones para el tratamiento de lixiviados y la selección depende de la caracterización final del lixiviado. Las opciones pueden ser descargar a una planta de tratamiento de lixiviados (por ejemplo una laguna de evaporación) o recirculación a las celdas del sitio de disposición final. Este último procedimiento tiene el beneficio de acelerar la estabilización de los materiales orgánicos presentes, aunque no elimina la necesidad final de tratamiento, aunado a que existen límites físicos para la absorción de líquidos por el cuerpo de los residuos sólidos.

En la práctica, es común la combinación de tratamiento y recirculación de lixiviados. El biogás generado en el relleno sanitario es un producto de la degradación biológica de los residuos sólidos municipales. Los gases que se producen en mayor proporción son metano, bióxido de carbono, ácido sulfhídrico y nitrógeno. El gas metano busca salida del interior de las celdas hacia la atmósfera, teniendo un riesgo de explosión si su concentración va del 5 al 15% en volumen.

El control de biogás deberá considerarse en las situaciones siguientes:

- Cuando existan viviendas y/o edificios en las áreas circundantes al sitio de disposición final,
- Cuando los RSM depositados tengan un alto contenido de materia orgánica,
- Cuando en los planes del uso futuro del sitio se tenga considerado el acceso al público,
- Cuando las emisiones de biogás pongan en peligro la salud de la población por sus características fisicoquímicas,
- Cuando en el sitio se produzcan intensos olores desagradables para la población circundante, y
- Cuando la presión del biogás sea tal que ocasione una fuerte migración lateral y/o afecte a la vegetación que rodea al sitio.

Para el control del biogás en los sitios clausurados existen tres modalidades, presentadas en la Tabla 7.

**Tabla 7**  
**Formas de control de biogás en sitios clausurados**

<b>Modalidad</b>	<b>Justificación/observación</b>	<b>Tipo de control</b>
<b>No control</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Que exista un área de amortiguamiento, en el que el biogás se difunda a través del material de cubierta y no alcance concentraciones riesgosas.</li> <li>• Cuando el sitio es pequeño y se encuentra fuera de zonas pobladas.</li> <li>• Cuando las emanaciones no ponen en riesgo la salud ni seguridad de la población circundante.</li> <li>• Para pequeños municipios y zonas con recursos limitados, siempre que se cumplan las condiciones arriba mencionadas.</li> </ul>	
<b>Control pasivo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maneja y controla en movimiento del biogás en cualquier sitio.</li> <li>• Funciona mediante el principio de presión natural y el mecanismo de convección.</li> <li>• No es muy efectivo para la remoción del biogás</li> <li>• Para áreas donde el riesgo es mínimo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zanjas de grava</li> <li>• Pozos de venteo pasivo</li> <li>• Barreras</li> <li>• Sistemas de colección a nivel superficial</li> </ul>
<b>Control activo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Controla el movimiento del biogás mediante una presión negativa inducida.</li> <li>• Se requiere de un soplador, logrando un control de la migración lateral de biogás.</li> <li>• Permite el aprovechamiento de esta fuente no convencional de energía.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pozos de extracción</li> <li>• Zanjas de extracción</li> <li>• Red de captación del biogás</li> </ul>

## **8. MANTENIMIENTO Y MONITOREO AMBIENTAL**

## **9. NORMATIVIDAD APLICABLE**

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- **Clausura del Relleno Sanitario Prados de la Montaña.** Secretaría de Obras y Servicios. Dirección General de Servicios Urbanos. Dirección de Transferencia y Disposición Final Subdirección de Operación de Disposición Final.
- **Clausura y Saneamiento del Extiradero de Basura y, Construcción y Operación del Relleno Sanitario de Tlalnepantla de Baz, Estado de México.** Ing. Óscar Carlos Vázquez Hernández. Relleno Sanitario de Tlalnepantla. Consorcio Internacional de Medio Ambiente.
- **Evaluación Ambiental y Clausura del Sitio de Disposición Final de Residuos Sólidos Tetlama, Morelos.** M.C. Mónica Navarro González, Ing. Leopoldo F. Ortega Aznar, Ing. Oscar M. Pohle Morales. Honorable Ayuntamiento de Cuernavaca. Secretaría de Servicios Públicos, Salud y Medio Ambiente. Dirección de Programas de Apoyo al Medio Ambiente.
- **Guía para Evaluación de Impacto Ambiental Para Proyectos de Residuos Sólidos Municipales.** Banco Interamericano de Desarrollo Diciembre, 1997.
- **Manual de Saneamiento e Proteção Ambiental para os Municípios,** Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA/UFMG). Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM/MG), 1995.
- **Manual para la Rehabilitación, Clausura y Saneamiento de Tiraderos a Cielo Abierto en el Estado de México.** Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación del Agua, Suelo y Residuos y Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GMBH (Agencia Alemán de Cooperación Técnica). Diciembre del 2000.
- **Manual para la Rehabilitación y Clausura de Tiraderos a Cielo Abierto.** Dirección General de Infraestructura y Equipamiento, Secretaria de Desarrollo Social.
- **Situación Actual del Manejo Integrado de los Residuos Sólidos en México.** Sancho y Cervera J. y Rosiles G. SEDESOL. 1999.

## **EVALUACIÓN AMBIENTAL Y CLAUSURA DEL SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS. TETLAMA, MORELOS.**

M.C. Mónica Navarro González, Ing. Leopoldo F. Ortega Aznar, Ing. Oscar M. Pohle Morales.

Honorable Ayuntamiento de Cuernavaca.  
Secretaría de Servicios Públicos, Salud y Medio Ambiente.  
Dirección de Programas de Apoyo al Medio Ambiente.  
Boulevard Cuahunáhuac Km. 2.5 Interior Parque Alameda de la Solidaridad, Col.  
Estrada Cajigal, Tels. (7)3 16 52 59, (7)13 16 51 30 y (7)3 16 51 92.  
Correo electrónico: programasapoyomediambiente@hotmail.com  
Cuernavaca, Mor.

### **RESUMEN**

La generación de residuos sólidos en el Municipio de Cuernavaca, se ha incrementado notablemente en los últimos 15 años, producto del creciente aumento de la población en la Ciudad de Cuernavaca y áreas conurbadas. Actualmente, el manejo y disposición final de los residuos sólidos municipales, se aproxima a las 600 ton./día; dato que permite apreciar la dimensión del problema que se está enfrentando.

Una de las primeras acciones que ha llevado a cabo el presente Ayuntamiento, es la conversión del tiradero a cielo abierto de Tetlama, en un sitio de disposición final de residuos sólidos, operado como relleno controlado.

En virtud de lo anterior se realizó el presente proyecto, cuyos objetivos principales son: la clausura y monitoreo adecuados del sitio, evitar la contaminación por lixiviados, detener la erosión del relleno por escurrimientos pluviales, captar los gases que pueden provocar incendios y explosiones, así como aprovechar el gas metano como combustible.

## 1. INTRODUCCIÓN

El papel que los recursos naturales han tenido en el desarrollo de la humanidad es esencial, la naturaleza ha sido fuente de bienestar tanto para proveer los requerimientos necesarios para la vida del hombre como para servir de "almacén" de todos los desechos que el hombre ha generado desde tiempos inmemoriales. Es casi seguro que a la par de que el hombre pasó de ser nómada a ser sedentario, la acumulación de los desechos vino a ser una consecuencia de la vida misma, una consecuencia traducida a problemas de esta nueva sociedad. Sin embargo, esta acumulación por si misma sólo significó uno de los tantos problemas que la disposición final conlleva. Desde siempre, ha sido común la práctica de disponer estos desechos en terrenos baldíos, a lo largo de las carreteras, en caminos sin revestimiento. Evidentemente, el no contar con un plan de manejo de estos residuos, trae como consecuencia la proliferación de plagas tales como: las ratas, insectos, etc.; lo cual significa el desarrollo de una serie de enfermedades de alto riesgo que pueden en algunos casos, convertirse en epidemias.

La relación establecida entre la salud pública y el inapropiado manejo y disposición final de los residuos sólidos está plenamente establecida. Es común señalar que la contaminación de agua y aire también se ha atribuido en gran parte, al inadecuado manejo de los residuos sólidos. Se sabe del efecto de los contaminantes tanto en aguas superficiales como en las subterráneas, producido por algunos de sus componentes que tienen como base, metales pesados, tales como: Cobre, arsénico y uranio; ó también compuestos constituidos por sales, tales como: calcio y magnesio. Aún cuando la naturaleza tiene la capacidad de diluir, dispersar, degradar, país, suficiente para evidenciar el problema que se presenta a la naturaleza para reincorporar nuevamente a su estado natural todos estos elementos. absorber, ó de alguna manera reducir el impacto no deseado en el aire, las aguas o el suelo, algunos compuestos sintéticos elaborados por el hombre, no son asimilados por los sistemas naturales. Como un ejemplo de las estimaciones que en el ámbito mundial se han hecho de algunos de los componentes de los residuos municipales, en el caso de los Estados Unidos, se señala que se desecha: 1) suficiente papel aluminio para reconstruir toda la flotilla de aviones comerciales de Estados Unidos cada tres meses; 2) suficientes llantas para rodear tres veces la tierra; 3) cerca de 18 millones de pañales desechables por año, los cuales unidos representan la distancia de la tierra a la luna siete veces; 4) 2 mil millones de rastrillos desechables, 10 millones de computadoras y 8 millones de televisores cada año; 5) cerca de 2.5 millones de botellas de plástico no retornable cada hora. Estos son solamente algunos elementos que componen el 1.5 % del total de residuos, que se generan en ese

Sin embargo, es un hecho que en la actualidad se están haciendo esfuerzos considerables que intentan frenar estas tendencias de afectación. Se han

desarrollado programas de manejo de residuos sólidos, definidos éstos como la disciplina asociada con la generación, almacenamiento, recolección, transferencia y transporte, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos, de tal manera que se esté acorde con los principios de salud pública, economía, ingeniería, conservación y otras consideraciones ambientales.

Dentro de la implementación del programa de manejo integral de los residuos sólidos, la disposición final de éstos, ha sido históricamente uno de los elementos fundamentales en todo el proceso.

### **1.1 Problemas ecológicos producidos por los residuos sólidos**

Día a día, aumenta la generación de residuos, ya sean líquidos, sólidos o gaseosos. La contaminación de los suelos puede ser un proceso irreversible y además tiene la desventajosa propiedad de facilitar la introducción de tóxicos en las redes tróficas. El manejo de los desechos sólidos se resume a un ciclo que comienza con su generación y almacenamiento temporal, continuando con su recolección, transporte y transferencia y termina con la disposición final de los mismos. Es a partir de esta acumulación cuando comienzan los verdaderos problemas ecológicos, ya que los tiraderos se convierten en focos permanentes de contaminación. Existen varias formas de acumulación, una de ellas es la de los tiraderos a cielo abierto, zonas donde simplemente se acumulan los desechos sin recibir ningún tipo de tratamiento como es el caso de Tetlama. Otro medio de disposición final, es el relleno sanitario controlado, que consiste en disponer la basura en alguna área relativamente pequeña, dentro de algún sitio elegido para este fin, extenderla, compactarla, y cuando llegue a una altura de dos metros, se cubre con material arcilloso traído de algún banco de material.

Los basureros causan problemas ambientales que afectan el suelo, el agua y el aire: la capa vegetal originaria de la zona desaparece, hay erosión del suelo, contamina 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; como por ejemplo, que el suelo pierda muchas de sus propiedades originales, tales como: su friabilidad, textura, porosidad, permeabilidad, intercambio catiónico, así como la concentración de macro y micro nutrientes.

### **1.2 Situación actual en el Municipio de Cuernavaca**

La generación de residuos sólidos en el Municipio de Cuernavaca, se ha incrementado notablemente en los últimos 15 años, debido al creciente aumento de la población en la Ciudad de Cuernavaca y áreas conurbadas, siendo actualmente el manejo y disposición final de los residuos sólidos municipales, de aproximadamente 600 ton./día, lo cual permite inferir la dimensión del problema que se está enfrentando.

La disposición final de dichos residuos, se ha convertido en una de las principales preocupaciones de la presente administración, por lo que la Secretaría de Servicios Públicos Municipales, a través de la Subsecretaría del Medio Ambiente y de la Dirección de Planeación Ambiental, ha diseñado una serie de estrategias para dar la solución técnica más adecuada a dicha situación.

Por otro lado, se trabaja en la selección de un nuevo sitio, así como el diseño y la implantación de un relleno sanitario, que forme parte del proyecto integral de los residuos sólidos municipales de Cuernavaca.

Dentro de esta serie de acciones se inserta el presente estudio, el cual tiene como objetivo principal, adecuar convenientemente el sitio de disposición final de Tetlama; evitando de esta manera, la contaminación por lixiviados que fluyen hacia los cauces localizados dentro del área; los eventuales deslaves del relleno producidos por avenidas pluviales; la acumulación de gases inflamables y nocivos dentro del sitio, que pueden provocar incendios y explosiones; así como también el futuro aprovechamiento del gas metano como combustible. Considerando lo anterior, este documento presenta las acciones recomendadas para realizar el saneamiento y clausura del sitio de disposición final de Tetlama.

## **2. Metodología**

Para la realización del presente trabajo, se efectuaron los siguientes trabajos:

### **2.1 Topografía**

**2.1.1 Poligonal de Apoyo.** Utilizando el plano Esc. 1:1000, elaborado en Marzo de 1998 por la Dirección de Saneamiento Ambiental del Municipio de Cuernavaca, se fijaron los vértices en campo con la ayuda de un Geoposicionador Satelital (GPS), determinándose las coordenadas UTM en cada punto de la poligonal que limita el predio.

**2.1.2 Seccionamiento.** Para tal fin, se realizó la nivelación a lo largo del perímetro, haciendo un total de 98 estaciones y 9 nueve secciones transversales al relleno, con una equidistancia de 50 m.

### **2.2 Hidrología**

**2.2.1 Datos Meteorológicos.** Se utilizaron los informes meteorológicos mensuales, correspondientes al año 2000, registrados en la estación Cuernavaca, los cuales fueron proporcionados por la Comisión Nacional del Agua.

**2.2.2 Hidrología.** Fueron consultadas las cartas topográficas, de hidrología superficial y subterránea, Esc. 1: 50,000 elaboradas por INEGI. También se

utilizaron fotografías aéreas verticales para determinar el parte aguas y definir las micro cuencas presentes en la zona.

## **2.3 Geología.**

**2.3.1 Reconocimiento preeliminar.** Se realizaron recorridos dentro y fuera del terreno en estudio, para determinar los sitios de mayor interés geológico, como son: Geomorfología, Hidrografía, Unidades Litológicas, Estructuras, Contactos, Rumbos y Echados.

**2.3.2** De acuerdo con los datos obtenidos en el reconocimiento preliminar, recorridos posteriores, estudios de fotointerpretación, consulta de material cartográfico y bibliográfico, así como la observación de muestras petrográficas, se determinaron las condiciones geológicas del área, mismas que se describen en el capítulo correspondiente.

## **2.4 Explosividad.**

**2.4.1 Ubicación de pozos de muestreo.** La ubicación de los pozos de muestreo se determinó a cada 50 m., cubriendo todo el depósito principal y las terrazas. Asimismo se hizo un muestreo en la zona Norte del sitio donde no hay residuos a fin de detectar la migración de los gases en el suelo.

**2.4.2 Descripción de los pozos.** Los pozos fueron excavaciones someras (40- 50 cm) hechas con una barreta.

**2.4.3 Muestreo de gases.** Para el muestreo de los gases se empleó un analizador de gases Gasport MSA.

# **3. RESULTADOS**

## **3.1 Descripción del Área de Estudio**

### **3.1.1 Localización**

El área sujeta al presente estudio, se localiza al Sur de la Ciudad de Cuernavaca, dentro de las coordenadas UTM: X = 470, 200; Y = 2, 077, 550; y una altitud de 1,180 msnm. ( Ver Plano de Localización anexo )

### **3.1.2 Fisiografía**

La Fisiografía que se observa en el área, corresponde a la porción septentrional de la Provincia Fisiográfica de la Sierra Madre del Sur, se caracteriza por pequeñas cadenas montañosas, orientadas según un eje NW – SE que coincide con la parte alta de los anticlinales (Estructura cóncava originada por plegamiento) que afectan depósitos calcáreos de origen marino, de edad Cretácica (60 millones de años), y su expresión topográfica consiste en pequeños cerros de pendiente relativamente moderada y perfil redondeado. El drenaje natural en dichos macizos

rocosos está poco desarrollado, tendiendo a una forma dendrítica (raíz) que posteriormente sigue patrones prácticamente paralelos en su base. Envolviendo a los cerros descritos, como si fueran islas o islotes, se aprecia una planicie con ligera pendiente hacia el SE, bisectada por numerosas cañadas que drenan hacia el Río Cuentepec, afluente del Río Amacuzac.

### 3.1.3 Hidrología

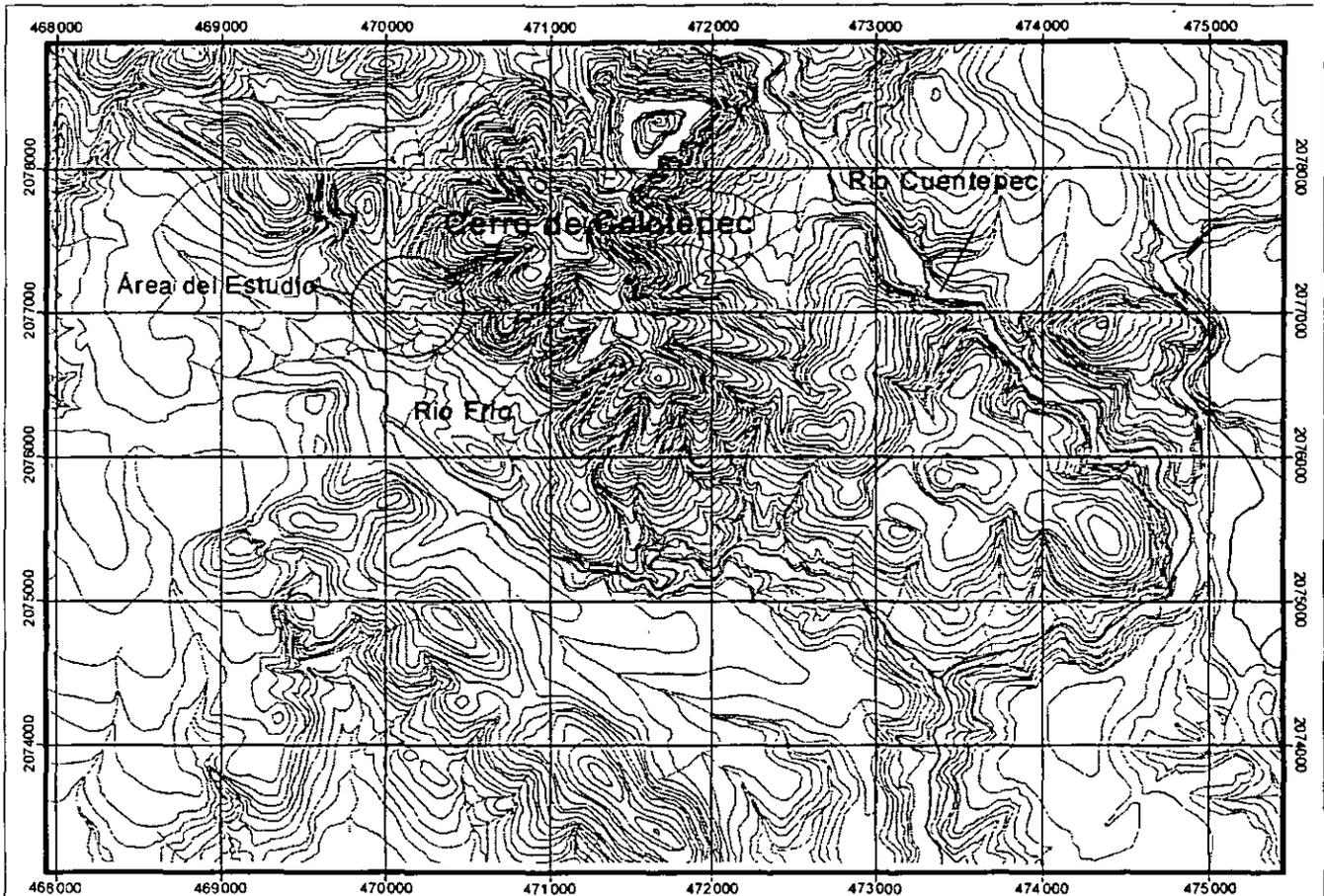
La zona en estudio se localiza en la región hidrológica RH-18 (Balsas), dentro de la cuenca del Río Grande de Amacuzac, subcuenca Río Frío, Microcuenca Colotepec ( Ver Anexo, Plano Hidrológico anexo ). La superficie estimada dentro de la microcuenca, es de 33 Has. aproximadamente, misma que drena los escurrimientos pluviales a través de dos pequeños cauces (*Talwegs*) interrumpidos por el relleno de Tetlama. Atendiendo a las características de la Microcuenca y sus cauces, se puede determinar el comportamiento de los escurrimientos superficiales en el área; como por ejemplo, el grado de respuesta a una tormenta, que depende principalmente de la densidad de corrientes y drenaje, así como la pendiente del cauce principal (Ver Figura 2).

De acuerdo con lo anterior, la zona en estudio reúne las siguientes características:

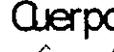
- Corriente: efímera o influente.
- Área de la Microcuenca : **327, 129.31 m<sup>2</sup>**
- Densidad de corrientes (Ds) :  
 $Ds = \text{Número de cauces} / \text{Área} = \mathbf{0.000006}$
- Densidad de drenaje (Dd) :  
 $Dd = \text{Longitud de cauces} / \text{Área} = \mathbf{0.003}$
- Pendiente Compensada del cauce principal : **27%**

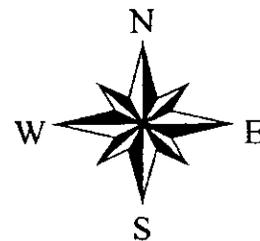
En función de lo anterior, se estima un tiempo aproximado de vaciado en la Microcuenca, de:

$$T_v = 0.827 ( \text{Área} )^{0.2} = ( 0.827 ) ( 327, 129.31 \text{ m}^2 )^{0.2} = \mathbf{3.10 \text{ h}}$$



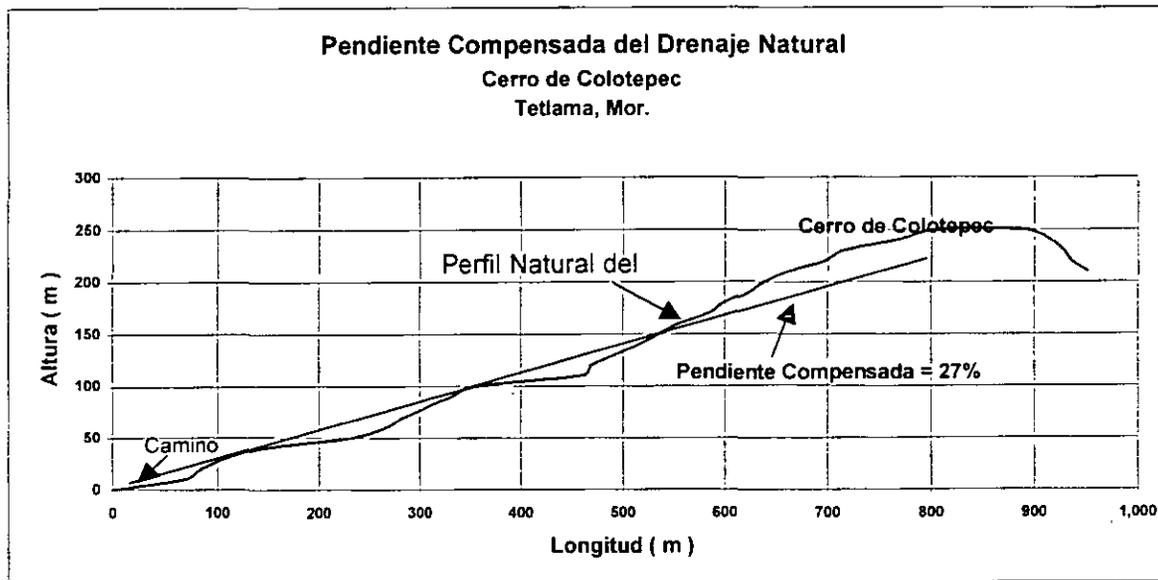
**Hidrografía**

-  Corriente Efímera
-  Corriente Perenne
- Cuerpos de Agua**
-  Efímero
-  Permanente
- Altimetría**
-  Curva de Nivel



**Red Hidrográfica Tetlama**

Figura 2



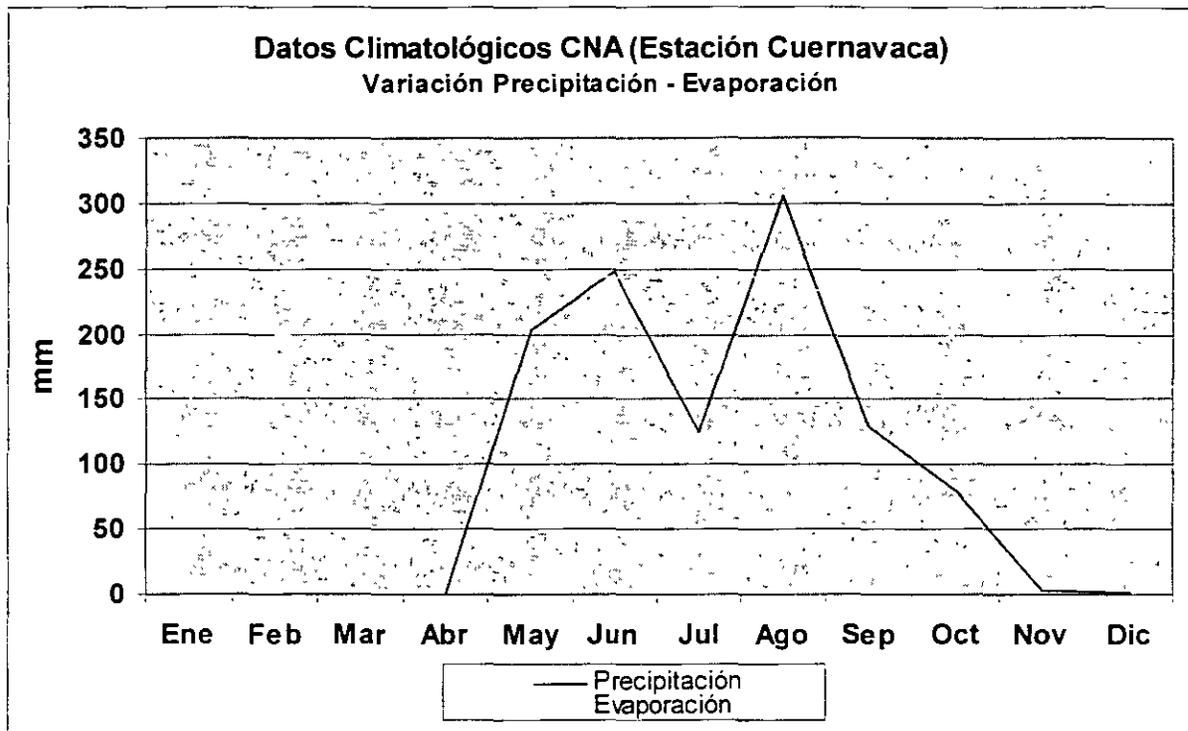
Para la determinación de la precipitación media anual y mensual en la zona, primeramente se utilizó la carta hidrológica Esc. 1:50,000 de INEGI, a partir de la cual se obtuvo una precipitación media anual de 0.7559 mm en el área de Alpuyecá. Como este único valor no es suficiente para apreciar la variación del escurrimiento local, se eligió una estación pluviométrica cercana al área en estudio, con el mayor número de registros mensuales de precipitación, deduciendo los valores mensuales de la precipitación local (Tabla 1 y Figura 3).

Tabla 1. Datos Climatológicos

Datos Climatológicos Estación Cuernavaca (2000)			
Mes	Temperatura Media (°C)	Precipitación (mm)	Evaporación (mm)
Ene	18.50	0.00	149.20
Feb	20.25	0.00	199.83
Mar	22.30	0.00	203.99
Abr	23.70	0.00	224.04
May	23.10	203.50	247.94
Jun	20.50	248.40	244.16
Jul	22.00	124.80	247.85
Ago	21.30	306.50	241.91
Sep	21.20	129.80	222.38
Oct	21.30	78.50	198.38
Nov	21.50	2.80	174.06
Dic	19.10	1.40	152.43
Prom.	21.23	91.31	208.85

Fuente: CNA, 2001 Precipitación Anual: 1,095.70

Figura 3



El Volumen Medio Mensual de Esguerrimiento en Tetlama, se calculó a partir de los datos mostrados en las tablas anteriores, y se muestran a continuación ( Ver Tabla No. 2 )

El volumen medio anual ( $V_m$ ) de esguerrimiento estimado es el siguiente:

$$V_m = A \times P_m \times C_e$$

$A = \text{Área de la cuenca en } m^2 = 327, 129.31 \text{ } m^2$

$P_m = \text{Precipitación Media Anual} = 0.7557 \text{ mm}$

$C_e = \text{Coeficiente de Esguerrimiento} = 0.15$

Sustituyendo:

$$V_m = (327, 129.31) (0.7557)(0.15) = 37, 091.56 \text{ } m^3$$

Porcentaje de Variación:

$$\left( \frac{\text{Precip. Mayor} - \text{Precip. Menor}}{\text{Precip. Med.}} \right) \times 100$$

Sustituyendo:

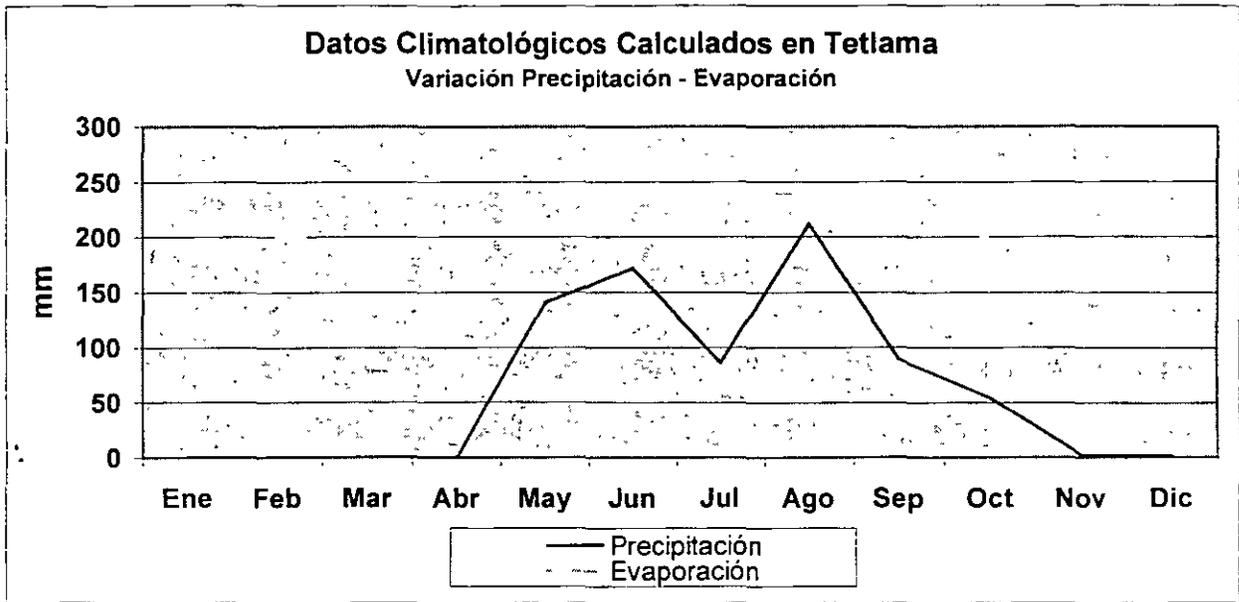
$$\% \text{ Var. Escurrimiento} = ((0.9275 - 0.6444) / 0.7559) \times 100 = 37\%$$

Utilizando la misma ecuación, se determinó el volumen de escurrimiento mensual que se muestra a continuación:

Vol. Escurr. Med. Anual: **37,091.56 m<sup>3</sup>**  
 Vol. Escurr. Med. Mensual: **3,091.00 m<sup>3</sup>**

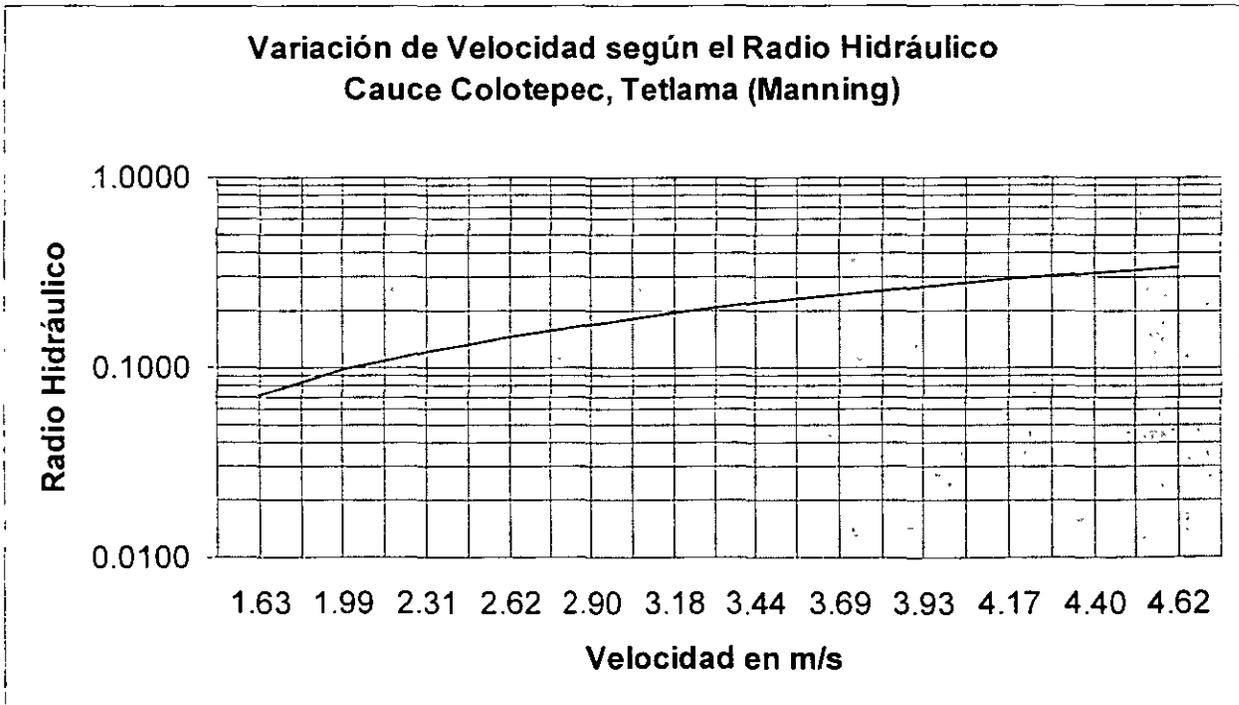
**Tabla 2. Precipitación Media Calculada**

<b>Precipitación Media Mensual Tetlama</b>			
<b>Año 2000</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Precipitación</b>	<b>Evaporación</b>
<b>Mes</b>	<b>Media (°C)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>
Ene	18.50	0.00	149.20
Feb	20.25	0.00	199.83
Mar	22.30	0.00	203.99
Abr	23.70	0.00	224.04
May	23.10	140.39	247.94
Jun	20.50	171.37	244.16
Jul	22.00	86.10	247.85
Ago	21.30	211.45	241.91
Sep	21.20	89.55	222.38
Oct	21.30	54.16	198.38
Nov	21.50	1.93	174.06
Dic	19.10	0.97	152.43
<b>Media Mensual:</b>	<b>21.23</b>	<b>62.99</b>	<b>208.85</b>
<b>Media Anual:</b>		<b>755.90</b>	



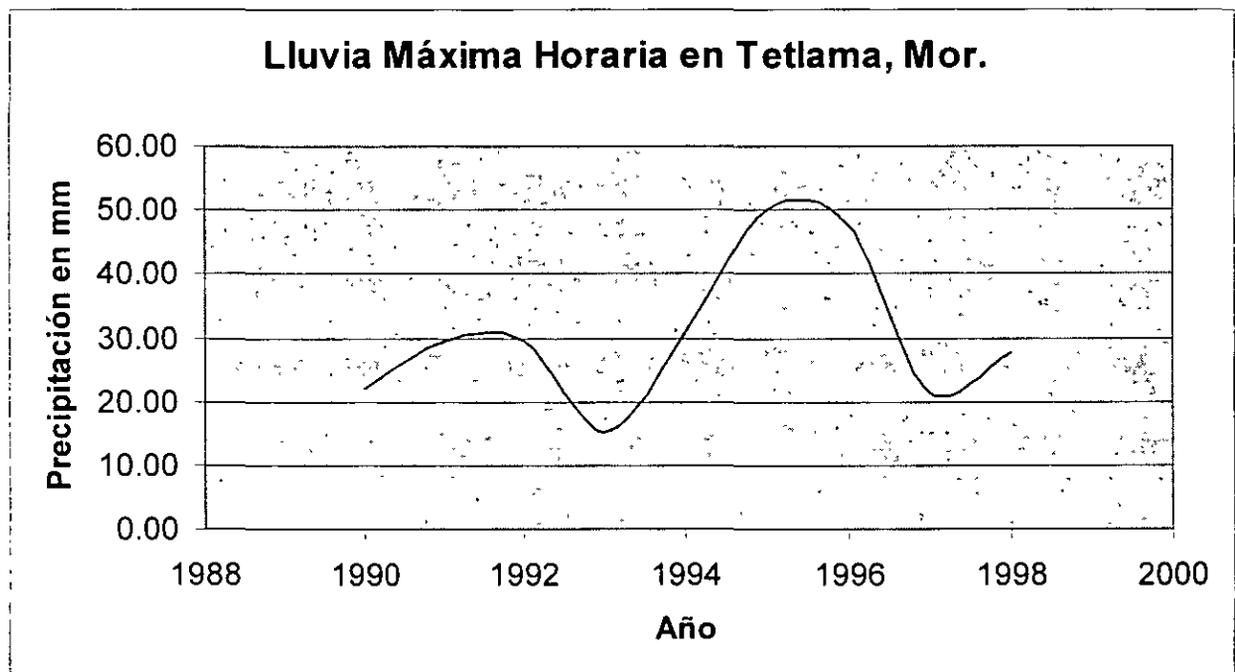
De acuerdo con los datos obtenidos en tres secciones transversales al cauce principal que drena la vertiente SW del Cerro de Colotepec, y utilizando la fórmula de Manning, se calculó la Máxima Avenida, obteniéndose las siguientes velocidades del escurrimiento ( Figura 4)

Figura 4



Estadística de Lluvia Máxima Horaria Mensual, durante 10 años.

Lluvia Máxima Horaria en Tetlama, Mor., de 1989 a 1998 (Calculado)															
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Med	Max	Min
1989										2.97	1.24		2.10	2.97	1.24
1990				2.21	8.35	11.31	17.25	20.63	22.01	6.55	2.97		11.41	22.01	2.21
1991							15.52	13.80	29.66				19.66	29.66	13.80
1992							15.52	13.80	29.66				19.66	29.66	13.80
1993		1.52		2.07	1.72	14.76		10.35	14.97	15.18	9.52		8.76	15.18	1.52
1994					31.32	14.76	1.45		17.45	20.49	0.83		14.38	31.32	0.83
1995			2.62	5.73	14.76	13.80		50.09	22.21				18.20	50.09	2.62
1996				3.10	6.48	31.32	21.39	47.46	16.49	25.18	0.00	2.41	17.09	47.46	0.00
1997			2.07	12.69	17.45	18.83	18.49	21.52	17.80	10.14	6.76	2.69	12.85	21.52	2.07
1998						20.42	13.66	27.53	27.04				22.16	27.53	13.66
Med	0.00	1.52	2.35	5.16	13.35	17.89	14.75	25.65	21.92	13.42	3.55	2.55	10.18	25.65	0.00
Máx.	0.00	1.52	2.62	12.69	31.32	31.32	21.39	50.09	29.66	25.18	9.52	2.69	18.17	50.09	0.00
Min.	0.00	1.52	2.07	2.07	1.72	11.31	1.45	10.35	14.97	2.97	0.00	2.41	4.24	14.97	0.00



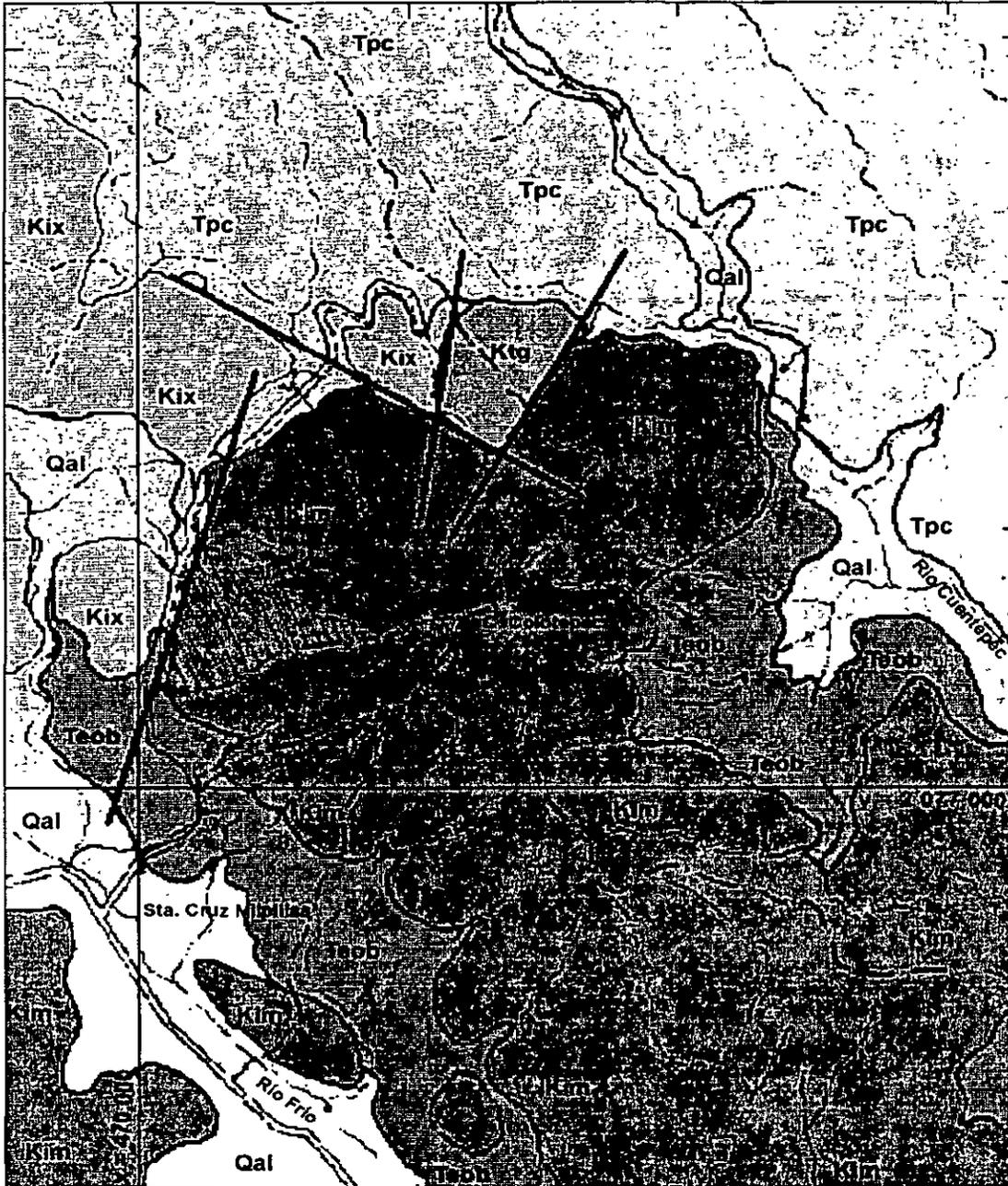
### 3.1.4 Geología

Las rocas más antiguas que afloran en el área del presente estudio, corresponden a la caliza **Xochicalco**, cuyo nombre proviene de la zona arqueológica cercana; y está caracterizada por una serie de calizas densas de espesor variable, de muy delgado a mediano, con superficies de estratificación planas. Una característica de esta formación es la abundancia de hojas de pedernal intercaladas, hasta el grado de formar casi la mitad de la roca en algunos lugares. Dicha formación se encuentra sumamente plegada, e intrusionada por un cuerpo granítico en las cercanías del Cerro de Colotepec, lo cual ha producido complicadas y numerosas fracturas, rellenas posteriormente por precipitación de calcita blanca. La recrystalización o marmorización local afectó las capas cercanas a los cuerpos intrusivos, por lo que es común observar en el área, coloraciones claras en esta unidad. Desde el punto de vista geotécnico, se considera una unidad fracturada, plegada y permeable, consideraciones que habrá que tomar en cuenta para obras futuras. Su localización no afecta el relleno sujeto a estudio, ya que se encuentra fuera y al NE del predio, cubierta por depósitos de la formación Balsas y la caliza Morelos.

Sobreyaciendo a la unidad anterior, se encuentra la **Formación Morelos**, constituida por capas gruesas de caliza y dolomita muy resistentes a la erosión bajo las condiciones climáticas de la región, y tienden a formar los altos topográficos; siendo el cerro de Colotepec un ejemplo de dicha característica. Movimientos tectónicos comprimieron la Formación Morelos en pliegues orientados sensiblemente al Norte, y las rocas fueron fracturadas en grado variable de uno a otro lugar, selladas posteriormente con calcita. Localmente se consideran poco permeables y sin fracturamiento; evidenciándose este hecho, en el afloramiento de líquidos percolados que ocurre en la frontera del depósito de residuos sólidos y la unidad litológica descrita, situada en la parte baja del predio. Cubriendo en forma discordante a las formaciones anteriores, se encuentra la Formación denominada **Grupo Balsas** que incluye rocas tan diversas como son: yeso, caliza lacustre, conglomerado calizo, conglomerado volcánico, arenisca tobacea, limolita tobácea y arcillita, así como brecha y toba volcánicas y corrientes lávicas interestratificadas. Localmente, se observan unidades constituidas por conglomerado calizo, conglomerado volcánico, limolita tobacea y arcillita; siendo estas últimas aprovechadas para conformar los rellenos de ECCACIV y de Tetlama. De acuerdo con lo anterior, esta unidad se considera poco permeable, siendo susceptible de explotar en banco, para labores de relleno, compactación e impermeabilización en el depósito referido.

Descansando con marcada discordancia angular y erosional sobre el Grupo Balsas se encuentra la **Formación Cuernavaca**, la cual ha dado origen a llanuras ligeramente inclinadas, surcadas en grado variable por valles y arroyos encajonados, o en forma de "V". Su constitución litológica es variada en extremo, asemejándose al Grupo Balsas en la diversidad de tipos litológicos. Esta unidad se encuentra en las mesetas que rodean al Cerro de Colotepec, fuera del predio; por lo que no se consideró para el presente estudio (Ver Plano Geológico).

# Plano Geológico de Tetlama



## Simbología

Pleistoceno y Reciente



Plioceno Sup. Formación Cuernavaca



Oligoceno Sup. Grupo Balsas



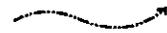
Cretácico Inf. Formación Morelos



Cretácico Inf. Formación Xochicalco



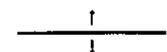
Drenaje Natural



Parteaguas



Pliegue Anticlinal



Falla



Contacto Geológico



### 3.1.5 Clima y Vegetación

Esta ampliamente documentada la relación que se dan entre la distribución de los seres vivos y los factores abióticos y aun bióticos que influyen en esta distribución. Uno de los factores determinantes en la distribución de las especies sobre el espacio terrestre es el clima. En el caso específico de la ubicación del tiradero de Tetlama el registro de estaciones meteorológicas cercanas al lugar, definen, siguiendo el sistema de Koppen, como un clima cálido con lluvias en verano con una marcha media anual tipo ganges; el sinónimo de esta definición siguiendo el sistema de Enriqueta García se define como un clima  $Aw''o(w)$  (i)g siendo un clima cálido con poca oscilación anual de las temperaturas media mensual entre 5 y 7 °C y del tipo ganges es decir con el mes más cálido antes de junio, las dobles comillas indican la presencia de canícula. Este clima es definido por Thornthwaite como un clima  $Cl s' A'a'$  es decir un clima semiseco, moderado en verano cálido, con baja concentración de calor durante el verano. A este tipo de clima y altitud se asocia el tipo de vegetación determinado como Selva Baja Caducifolia, es decir árboles cuyo promedio de altura es entre 4 y 8 metros y presenta una mayor diversidad arbórea por hectárea respecto a un bosque y la característica más distintiva es la pérdida de hojas durante la época de secas (6 – 8 meses al año). Este tipo de vegetación está representado principalmente por especies pertenecientes a los géneros *Bursera*, *Lysiloma*, *Ceiba*, y *Acacia*, entre muchos otros.

## 4. Resultados

### 4.1 Descripción de la Problemática Ambiental Actual.

Siendo originalmente un área de disposición final sin ningún control, el tiradero de Tetlama; como aún se le conoce; ha generado diversos problemas ambientales desde el inicio de su operación. La generación de gases y líquidos percolados contaminantes, dispersión aérea de contaminantes, contaminación de cauces naturales, desarrollo de fauna nociva, y deterioro general del entorno ambiental; son características comunes a todos los tiraderos a cielo abierto.

Es a partir de la problemática arriba señalada, que se fijaron los objetivos del presente estudio, contemplando su aplicación inmediata para revertir el proceso de afectación ambiental, convirtiendo el tiradero de Tetlama, en un sitio de disposición final controlado.

### 4.2 Volumen de Residuos Sólidos y Conformación de taludes.

Como resultado del levantamiento topográfico, ( Plano No.1) y los cálculos efectuados, el volumen estimado del relleno de Tetlama, es de **394, 544.71 m<sup>3</sup>**. Pueden observarse hasta 4 taludes y terrazas que conforman actualmente dicho relleno, ( Plano No. 2) proponiéndose modificar la pendiente de los taludes en una relación 2:1, con una altura máxima de 10 m., con lo cual se pretende aumentar la capacidad de disposición final en aproximadamente un 20% antes de su clausura. ( Plano No. 3 )

### 4.3 Sistema de Drenaje Pluvial.

De acuerdo con las fórmulas de Chezy y Manning – Strickler ( Tabla 3 ), se obtuvieron los resultados que permiten el diseño de la sección del canal perimetral, para la conducción de aguas pluviales hacia un drenaje natural; situado aproximadamente a 1.2 Kms., siguiendo el contorno del terreno; impidiendo de esta forma, tanto la erosión del relleno de Tetlama, como la contaminación de los escurrimientos naturales al mezclarse con los líquidos percolados contaminantes producidos por el mismo. Cabe señalar que su localización fue tomando en consideración el terreno de ECCACIV, situado en límite norte del predio.

Tabla No. 3

Propuesta de Sección No. 1

Cálculo de Plantilla para Canal de Conducción Aguas Pluviales (Manning – Chezy)												
b	y	s	s <sup>1/2</sup>	b/y	r/d	k	A	r	r <sup>2/3</sup>	Vm m/s	Q	Vc m/s
0.30	0.32	0.01	0.10	0.94	0.54	1.50	0.25	0.17	0.31	1.24	0.30	1.20

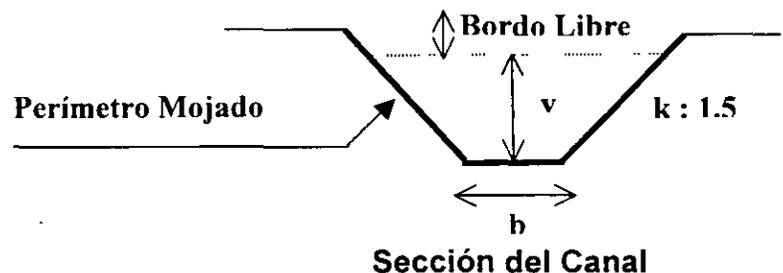
Propuesta de Sección No.2

Cálculo de Plantilla para Canal de Conducción Aguas Pluviales (Manning - Chezy)												
b	y	s	s <sup>1/2</sup>	b/y	r/d	k	A	r	r <sup>2/3</sup>	Vm m/s	Q	Vc m/s
0.30	0.43	0.01	0.10	0.70	0.51	1.50	0.41	0.22	0.36	1.45	0.60	1.48

#### Parámetros que intervienen para el cálculo de la Sección

- b = Longitud de la plantilla.
- y = Tirante.
- k = Talud del canal.
- S = Pendiente de la rasante.
- A = Área de la sección.
- Pm = Perímetro mojado.
- Rh = Radio hidráulico.
- C = Factor de fricción (Chezy).
- V = Velocidad en m/s.
- Q = Gasto en m<sup>3</sup>/s

Figura 7

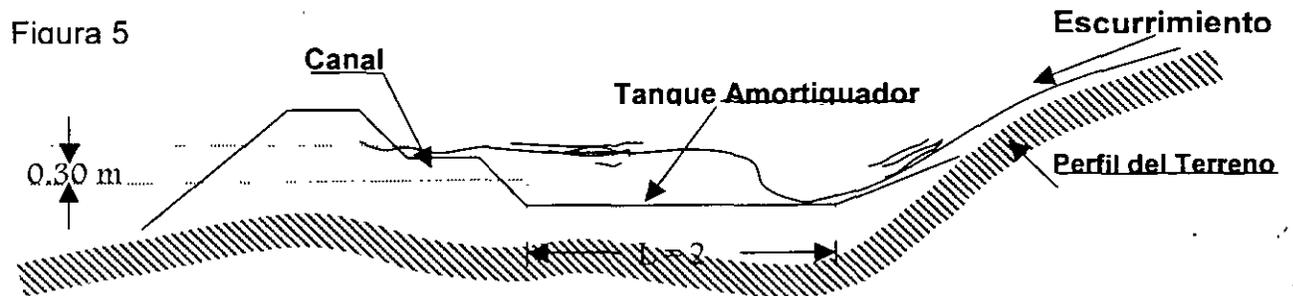


Teniendo en cuenta los datos hidrológicos calculados en el capítulo correspondiente; el gasto calculado para el caso de una avenida máxima, considerando un período de retorno de 10 años, es de 0.50 m<sup>3</sup>; por lo que se propone la alternativa de sección No. 2 anotada en párrafos anteriores. (Ver trazo y sección del canal Plano No. 6)

Por otra parte, debido a la fuerte pendiente que acusan los 2 drenajes naturales que ocurren hacia el relleno de Tetlama, se juzga conveniente construir lavaderos y tanques de amortiguamiento, que eviten el desbordamiento del canal en la confluencia de los escurrimientos con el mismo, ( Ver Fig. No. 5 ) para tal fin, se realizó el cálculo hidráulico correspondiente, a partir del cual se determinó una longitud de 2.0 m y una profundidad de 0.30 m, a partir de la plantilla del canal. ( Ver Tabla 4 )

Tabla No. 4

Cálculo Hidráulico para Tanque Amortiguador		
Vel. M <sup>3</sup> /s	Tirante Crítico	Vel. Crítica
0.2500	0.1854	1.3486
0.3000	0.2093	1.4331



#### 4.4 Características y Volumen de Biogás Generado.

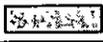
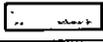
##### 4.4.1 Características

###### 4.4.1.1 Explosividad

El sitio de disposición final de residuos tiene una edad aproximada de ocho años aproximadamente, en los cuales no se le ha dado un tratamiento adecuado y que se refleja en los rangos tan amplios en las concentraciones de gases por un lado, y en la heterogénea distribución de los mismos, lo que demuestra la presencia de residuos de diferentes edades mezclados, como se describe a continuación.

Se monitorearon 65 pozos en total, cubriendo el principal banco del sitio. La distribución de los pozos quedó ubicada como se muestra en el **Plano No. 4**. En el área monitoreada se detectaron zonas con distintas concentraciones de metano, las cuales se ubicaron en cinco rangos. Estos rangos se clasificaron considerando el porcentaje de metano en volumen en: Baja, (0-5%); Explosivo, (5-15%); Media Baja, (16-58%); Media Alta, (59-74) y Alta (75-100%), ( Ver **Tabla 10**).

**Tabla No. 10.** Clasificación de zonas de acuerdo a su concentración de metano.

Rango (% de metano en volumen)	Nombre de la Concentración	Color
0-5	Baja	
5-15	Explosivo	
16-58	Media Baja	
59-74	Media Alta	
75-100	Alta	

### Concentración baja

Los pozos en los cuales se detectaron concentraciones bajas, es decir con porcentajes de metano en volumen entre 0 y 4, fueron 31 pozos (**Cuadro 1**). Estos pozos comprenden aproximadamente el 40% del área muestreada. Los resultados del muestreo indican que los residuos ubicados en ésta área se encuentran en la Fase I o de ajuste inicial en la generación de gases. En esta fase se inicia la descomposición microbiana en los residuos biodegradables, lo cual se comprueba con la identificación de altas concentraciones de oxígeno en el muestreo.

**Cuadro 1.** Pozos con concentraciones de metano entre 0 y 4%.

Pozo	Oxígeno (%)	Metano (%)	Ácido sulfhídrico (ppm)	Pozo	Oxígeno (%)	Metano (%)	Ácido sulfhídrico (ppm)
1	20.3	2.4	0	36	20.8	0.0	0
2	20.2	2.9	0	37	20.8	0.0	0
3	20.7	0.5	0	38	20.8	0.0	0
4	20	3.8	0	39	20.8	0.0	0
5	20.8	0.0	0	40	20.8	0.0	0
6	20.0	3.8	0	41	20.8	0.0	0
7	20.4	1.9	0	51	19.8	4.8	2
8	20.8	0.0	0	54	20.0	3.8	4
12	20.7	0.5	0	55	20.6	1.0	4
14	20.2	2.9	0	56	20.2	2.9	1
20	20.4	1.9	0	57	20.8	0.0	2
22	20.3	2.4	1	58	20.8	0.0	2
23	20.6	1.0	0	60	20.3	2.4	0
25	20.8	0.0	0	62	20.8	0.0	4
34	20.2	2.9	1	64	20.8	0.0	0
35	20.8	0.0	0	65	20.3	2.4	0

### Concentración dentro del rango de Explosividad

Se identificaron 13 pozos con concentraciones de metano dentro del rango de Explosividad, 5-15% (**Cuadro 2**). Esta zona corresponde aprox. al 30% del total muestreado. La presencia de oxígeno es menor en este grupo, por lo que se infiere que los residuos se encuentran en fases iniciales de la fermentación del metano (Fase IV), aunque tempranas por las concentraciones de metano detectadas.

**Cuadro 2.** Pozos con concentraciones de metano en el rango de Explosividad (5-15%).

Pozo	Oxígeno (%)	Metano (%)	Ácido sulfhídrico (ppm)	Pozo	Oxígeno (%)	Metano (%)	Ácido sulfhídrico (ppm)
10	19.5	6.3	0	29	18	13.5	1
13	19.6	5.8	0	30	18.7	10.1	1
16	19.3	7.2	4	31	17.7	14.9	0
18	18.9	9.1	2	49	17.8	14.4	6
19	19.4	6.7	1	59	18.3	12.0	1
21	19.4	6.7	4	63	19.1	8.2	1
24	19.3	7.2	1				

### Concentración Media Baja

Los pozos localizados con concentraciones clasificadas en el rango de Media Baja (16-58% en volumen) fueron ocho. Estos corresponden aproximadamente al 10% del total del sitio (**Cuadro 3**). En estos pozos las concentraciones de oxígeno detectadas son aún menores, mientras que las concentraciones de ácido sulfhídrico se incrementan, lo cual posiblemente indica la presencia de residuos de diferentes edades, esto es, residuos que se encuentran en la Fase II, reflejado por el ácido sulfhídrico, en tanto que el metano indica que al mismo tiempo se encuentran residuos cruzando por la Fase IV, o de fermentación del metano.

**Cuadro 3.** Pozos con concentraciones de metano en el rango Media Baja (16-58%).

Pozo	Oxígeno (%)	Metano (%)	Ácido sulfhídrico (ppm)	Pozo	Oxígeno (%)	Metano (%)	Ácido sulfhídrico (ppm)
9	15.7	24.5	6	28	17.4	16.3	4
11	17.3	16.8	6	43	13.2	36.5	4
17	16.3	21.6	18	44	14.7	29.3	4
26	13.2	36.5	39	48	15.8	24.0	7

### Concentración Media Alta

Únicamente se detectó un sitio con concentración media alta, el cual corresponde al pozo número 27 (aprox. 5% del área muestreada). En este pozo la concentración de oxígeno es considerablemente menor (**Cuadro 4**). El sitio de muestreo se encuentra rodeado por una zona de concentración media baja, por lo cual se puede inferir que en la zona de este pozo se encuentran residuos antiguos, cuya concentración de metano probablemente esté migrando a los alrededores, alimentando así a las zonas de menor concentración tal como la zona de concentración Media Baja (16-58%) y del rango de Explosividad (5-15%).

**Cuadro 4.** Pozos con concentraciones de metano en el rango Medio Alto (59-74%).

Pozo	Oxígeno (%)	Metano (%)	Ácido sulfhídrico (ppm)
27	8.4	59.6	27

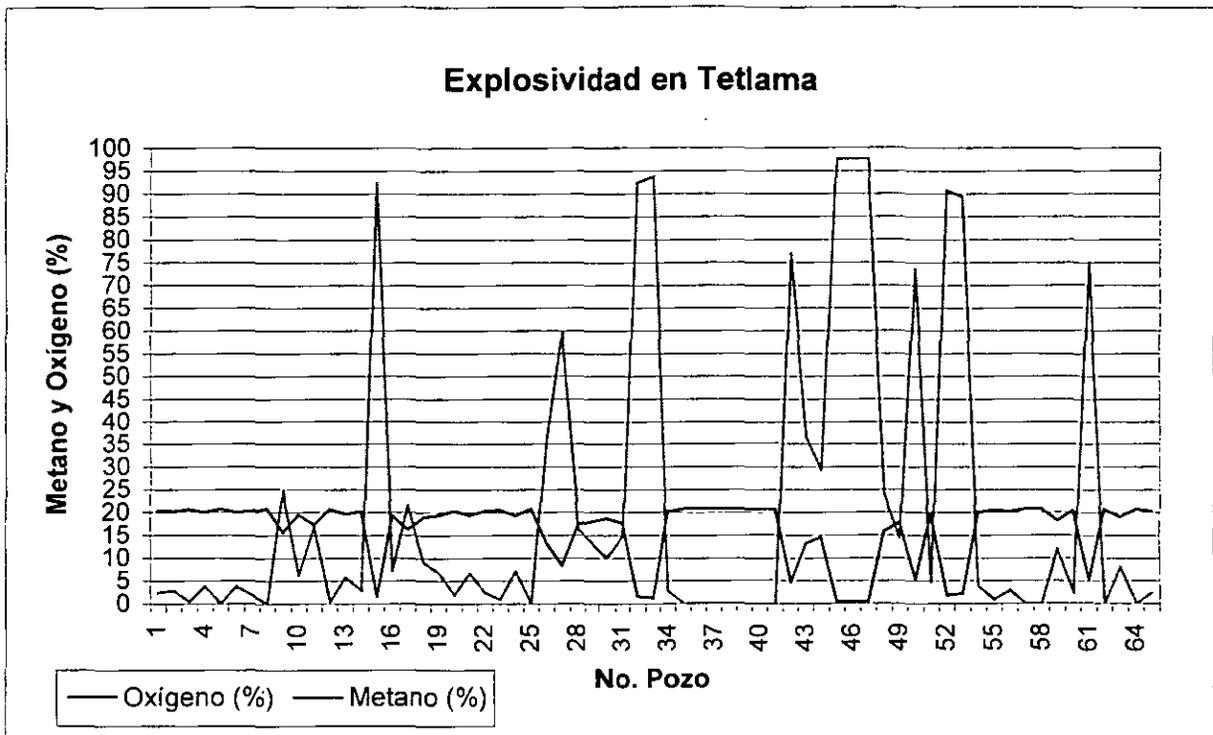
### Concentración Alta

Los pozos que, sin lugar a dudas, albergan los bancos de residuos más antiguos son los señalados como de concentraciones más altas. Son 11 del total muestreado (**Cuadro 5**) y corresponden aproximadamente al 15% del área del banco estudiada.

Las concentraciones oscilan entre el 75-100%. En éstas zonas la concentración de oxígeno es muy baja (0.5-5.5%), en tanto que la de ácido sulfhídrico muy alta (1-100 ppm). Estos bloques aunque por si solos no representan peligro de incendio, por la ausencia de oxígeno, por una parte si se presentase su acceso a la masa del relleno, podrían originarse valores en la concentración de metano dentro del rango de Explosividad y por otra, la migración del gas hacia zonas con baja concentración significaría un mayor riesgo para ambas situaciones en caso de presentarse una fuente de ignición.

**Cuadro 5.** Pozos con concentraciones de metano en el rango Alto (75-100%).

Pozo	Oxígeno (%)	Metano (%)	Ácido sulfhídrico (ppm)	Pozo	Oxígeno (%)	Metano (%)	Ácido sulfhídrico (ppm)
15	1.6	92.3	100	47	0.5	97.6	1
32	1.6	92.3	100	50	5.5	73.6	6
33	1.3	93.8	100	52	1.9	90.9	23
42	4.8	76.9	9	53	2.2	89.4	32
45	0.5	97.6	100	61	5.2	75.0	18
46	0.5	97.6	11				



#### 4.4.1.2 Componentes

Los análisis más recientes, muestran que los elementos que constituyen un residuo típico son: Carbono (C), Hidrógeno (H), Oxígeno (O), Nitrógeno (N), Azufre (S) y cenizas. ( Ver Tabla 11 )

Tabla 11. Principales elementos que componen un residuo sólido típico.

Componente	Porcentaje por peso (Base Seca)					
	C	H	O	N	S	Cenizas
Comida	48.0	6.4	37.6	2.6	0.4	5.0
Papel	43.5	6.0	44.0	0.3	0.2	6.0
Cartón	44.0	5.9	44.6	0.3	0.2	5.0
Plásticos	60.0	7.2	22.8	-	-	10.0
Textiles	55.0	6.6	31.2	4.6	0.15	2.5
Hule	78.0	10.0	-	2.0	-	10.0
Cuero	60.0	8.0	11.6	10.0	0.4	10.0
Jardín	47.8	6.0	38.0	3.4	0.3	4.5
Madera	49.5	6.0	42.7	0.2	0.1	1.5
Vidrio	0.5	0.1	0.4	<0.1	-	98.9
Metales	4.5	0.6	4.3	<0.1	-	90.5

Fuente: Tchobanoglous *et al.*, 1993.

Para determinar la composición química de la fracción orgánica presente en los residuos sólidos, se determinan los porcentajes de distribución de los elementos que los componen; multiplicando el peso seco del componente, por el porcentaje del elemento( por peso); tal como se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 12**

**Principales Elementos que Componen los Residuos Sólidos en Tetlama**

Componente	Peso (kg)		Composición, kg					
	Húmedo	Seco	C	H	O	N	S	Ceniza
Comida	4.10	1.23	0.590	0.079	0.462	0.032	0.005	0.061
Papel	15.47	14.56	6.334	0.874	6.406	0.044	0.029	0.874
Cartón	2.73	2.59	1.141	0.153	1.157	0.008	0.005	0.130
Jardín	3.19	3.14	1.884	0.226	0.716	0.000	0.000	0.314
Textiles	0.91	0.82	0.450	0.054	0.256	0.038	0.001	0.020
Hule	0.23	0.23	0.177	0.023	0.000	0.005	0.000	0.023
Cuero	0.23	0.18	0.109	0.015	0.021	0.018	0.001	0.018
Jardín	8.42	2.96	1.414	0.177	1.124	0.101	0.009	0.133
Madera	0.91	0.73	0.360	0.044	0.311	0.001	0.001	0.011
<b>Total:</b>	<b>36.173</b>	<b>26.436</b>	<b>12.459</b>	<b>1.644</b>	<b>10.452</b>	<b>0.246</b>	<b>0.051</b>	<b>1.584</b>

A continuación se determina el porcentaje de los elementos contenidos en el residuo sólido, considerando su peso húmedo y seco. ( Ver **Tabla 13**)

**Tabla 13**

Componente	Peso, kg	
	Sin H <sub>2</sub> O	Con H <sub>2</sub> O
Carbono	12.46	12.46
Hidrógeno	1.65	2.73
Oxígeno	10.45	19.11
Nitrógeno	0.25	0.25
Azufre	0.05	0.05
Ceniza	1.58	1.58

Posteriormente se obtiene la composición molar de los elementos, eliminando la ceniza.

**Tabla 14**

**Cuadro de Composición Molar**

Componente	Peso Atómico kg/mol	Moles	
		Sin H <sub>2</sub> O	Con H <sub>2</sub> O
Carbono	12.01	1.038	1.038
Hidrógeno	1.01	1.631	2.703
Oxígeno	16.00	0.653	1.194
Nitrógeno	14.01	0.018	0.018
Azufre	32.07	0.001	0.001

Finalmente, se calcula en forma aproximada, la fórmula química del residuo; considerándolo húmedo y seco, con azufre y sin el :

**Tabla 15**

**Cuadro para Fórmula Molar Normalizada**

Componente	Mol (N = 1)		Mol (S = 1)	
	Sin H <sub>2</sub> O	Con H <sub>2</sub> O	Sin H <sub>2</sub> O	Con H <sub>2</sub> O
Carbono	59.17	59.17	731.39	731.39
Hidrógeno	92.99	154.13	1149.44	1905.15
Oxígeno	37.25	68.09	460.40	841.64
Nitrógeno	1.00	1.00	12.36	12.36
Azufre	0.08	0.08	1.00	1.00
Ceniza	0.00	0.00	0.00	0.00

De acuerdo con los resultados anteriores, las fórmulas químicas de la fracción orgánica contenida en los residuos sólidos de Tetiama se muestran en la **Tabla 16**.

**Tabla 16**

Fórmulas Químicas	
Sin Azufre	
Sin H <sub>2</sub> O	Con H <sub>2</sub> O
C <sub>59.18</sub> H <sub>93.85</sub> O <sub>37.22</sub> N	C <sub>59.18</sub> H <sub>155.56</sub> O <sub>68.04</sub> N
Con Azufre	
Sin H <sub>2</sub> O	Con H <sub>2</sub> O
C <sub>730.40</sub> H <sub>1158.40</sub> O <sub>459.40</sub> N <sub>12.34</sub> S	C <sub>730.40</sub> H <sub>1920</sub> O <sub>839.80</sub> N <sub>12.34</sub> S

#### 4.4.1.3 Estimación de la energía contenida en un residuo sólido típico.

Componente	No. de Átomos por Mol	Peso Atómico kg/mol	Peso Total Elemento	%
Carbono	731.39	12.01	8783.973	36.03%
Hidrógeno	1905.15	1.01	1924.2	7.89%
Oxígeno	841.64	16	13466.19	55.24%
Nitrógeno	12.36	14.01	173.178	0.71%
Azufre	1.00	32.07	32.07	0.13%
<b>Total</b>			<b>24379.61</b>	<b>100.00%</b>

Para obtener un valor aproximado de energía se utiliza la siguiente fórmula:  
( Fuente: Tchobanoglous *et al.* , 1993. ), modificada por Dulong:

$$\text{Btu/lb} = 145C + 610(H_2 - O_2/8) + 40S + 10N$$

Resolviendo:

<b>Energía contenida:</b>	<b>5,839.53</b>	Btu/lb
	<b>12,862.41</b>	Btu/kg

#### 4.4.2 Volumen del Biogás Generado.

Para obtener una estimación aproximada, del volumen de gas producido por la fracción orgánica de residuos sólidos, bajo condiciones anaerobias y por unidad de peso, se consideró que la composición de dichos residuos es la mostrada en la Tabla No. 12.

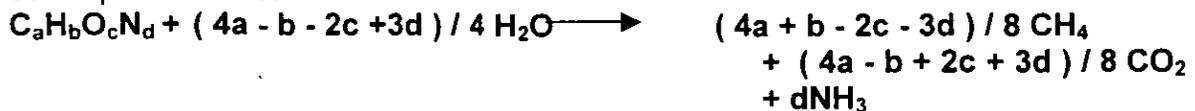
Para propósitos prácticos, la total conversión de la fracción orgánica de los residuos sólidos a metano, dióxido de carbono y amoníaco, puede representarse mediante la siguiente ecuación:



Donde :  $s = a - nw - m$

$$r = c - ny - 2s$$

Los términos  $C_a H_b O_c N_d$  y  $C_w H_x O_y N_z$  representan (considerando una base molar), la composición de materia orgánica al inicio y fin del proceso respectivamente. Asumiendo que los residuos orgánicos se estabilizan completamente, la expresión correspondiente es:



donde:

**a = 59.18; b = 93.85; c = 37.22; d = 1**

sustituyendo se obtiene:

Peso de CH <sub>4</sub> y CO <sub>2</sub> determinado			Conversión de Peso a Volumen			
Gas	lb	kg	Pe	Gas	ft <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
Metano	19.74	8.98	0.001265	Metano	440.66	12.44
Dióxido Carbono	47.48	21.60	0.003486	Dióxido C	384.45	10.85

% Metano =  $12.44 / (12.44 + 10.85) = 53.41\%$

% Dióxido de Carbono =  $100 - 53.41 = 46.59\%$

Porcentaje		Gas Generado por unidad de Peso		
		Comparación	ft <sup>3</sup> /lb	m <sup>3</sup> /kg
Metano	53.41%	Basado en el Peso Seco (25.11 kg)	14.73	0.92
Dióxido Carbono	46.59%	Por cada kg de Residuos Sólidos	0.16	0.01

**Volumen Teórico de CH<sub>4</sub> Generado = 0.01 m<sup>3</sup> x 295, 908.53 m<sup>3</sup> x 900 kg/m<sup>3</sup>  
= 2' 663, 176.77 m<sup>3</sup>**

#### 4.5 Volumen de Lixiviados.

El suelo al ser atravesado por el lixiviado, tiene mecanismos que disminuyen los contaminantes orgánicos e inorgánicos que pueden afectar los acuíferos, por lo que dependiendo del espesor o interfase del suelo, entre el fondo del relleno y las aguas subterráneas, menor será el riesgo de contaminación. En el caso que nos ocupa, no existe dicha interfase o colchón que atenúe la contaminación por líquidos percolados, sino un basamento constituido por rocas calcáreas, poco permeables localmente, que inducen el afloramiento de los lixiviados, a lo largo del contacto entre el relleno y dicha unidad rocosa.

Debido a las condiciones ya señaladas, fue necesario diseñar y calcular un Sistema de Tratamiento, que capte y separe la fracción líquida por evaporación, mezclando los lodos resultantes con agregados arcillosos e hidróxido de calcio (Anhidrita), lo cual permitirá un manejo exento de riesgos contaminantes, que su disposición final sea fácil y segura, así como para evitar su mezcla con las aguas superficiales y subterráneas.

Para el cálculo de generación y tiempo de producción de lixiviados, se utilizó la fórmula citada en el Manual de Rellenos Sanitarios de SEDUE, editada en 1984 por la Subsecretaría de Ecología.

Generación de Lixiviados:  **$L = (P - E) * N$**

Donde:

L = Lixiviados (m<sup>3</sup>) por año

P = Precipitación Media Anual (mm)

E = Evaporación Media Anual (mm)  
N = Porcentaje de Escurrimiento

Sustituyendo:

$$\begin{aligned} L &= 11,240.85 \text{ m}^3/\text{año} \\ &= 30.80 \text{ m}^3/\text{día} \\ &= 0.356 \text{ lt/seg} \times 1.5 \\ L &= \mathbf{0.535 \text{ lt/seg}} \end{aligned}$$

Tiempo de Producción de Lixiviados:

$$T = D \cdot H \cdot CPA / L$$

Donde:

T = Tiempo de Producción de Lixiviados (años)

D = Peso Volumétrico de Residuos Sólidos ( kg/m<sup>3</sup>)

H = Altura del Relleno (m)

CPA = Capacidad promedio de Absorción de los residuos sólidos. 0.109 m<sup>3</sup> de agua/ 100 kg de residuos

L = Lixiviados Generados/año en m<sup>3</sup> /año

Sustituyendo: **T = 28.7 años**

## **5 Proyecto de Clausura.**

### **5.1 Propuesta de clausura y saneamiento.**

Como resultado de la información expuesta en los párrafos anteriores se presenta un listado y descripción de las actividades a desarrollar para la conversión del sitio de disposición final de residuos sólidos, en una zona recuperada como área verde; con el establecimiento de controles ambientales.

#### **5.1.1 Clausura y saneamiento de tiraderos a cielo abierto**

Al proponerse el mejoramiento de un sistema de aseo urbano, es fundamental el evitar la existencia de tiraderos a cielo abierto, tanto en operación como abandonados. Es práctica común en nuestro país el que, una vez terminada la vida útil de un sitio de disposición final, se abandone el lugar sin que medien acciones de saneamiento ambiental del sitio.

Al iniciar operaciones el nuevo sistema de disposición final de los residuos sólidos, mediante la implantación del relleno sanitario, se deberá considerar, de manera importante, la clausura y saneamiento del sitio de disposición final actual.

#### **5.1.2 Levantamiento topográfico.**

Se habrán de conocer los perfiles del terreno natural y de los residuos sólidos ahí dispuestos, para calcular los volúmenes a mover durante los trabajos de nivelación. A través de este estudio se definirán los criterios de diseño de la superficie final.

### **5.1.3 Estudios geotécnicos y geohidrológicos**

Estos estudios determinarán las estructuras geológicas del área, las características del subsuelo, la profundidad y el comportamiento de las aguas subterráneas, con el objeto de que posteriormente se puedan aplicar modelos que simulen el flujo de los contaminantes líquidos que se percolen al suelo.

### **5.1.4 Mecánica de suelos**

Este estudio proporcionará las características físicas del suelo sobre el que está desplantado el sitio de disposición final, así como las obras necesarias para mejorarlo.

### **5.1.5 Localización y caracterización del material de cubierta (Prospección geológica).**

Es necesario ubicar y cuantificar los posibles bancos de extracción del material que será utilizado como cubierta final en los trabajos de clausura, además de determinar sus propiedades físicas y químicas, a fin de evaluar su eficacia como cobertura.

### **5.1.6 Diseño de medidas de mitigación y control**

Se diseñarán las medidas para controlar y minimizar los efectos adversos que sobre el medio ambiente haya causado el sitio, es decir, se definirán acciones como el establecimiento de una barrera de amortiguamiento, un sistema de captación y tratamiento de líquidos percolados contaminantes y un sistema de captación de biogás.

### **5.1.7 Ingeniería de detalle**

En este rubro se considera el diseño en detalle de las obras de clausura y saneamiento del sitio, tales como el desvío de los escurrimientos pluviales, conformación de taludes, muros de contención, cercado perimetral, instalaciones de vigilancia y el movimiento de tierras y residuos sólidos entre otras.

### **5.1.8 Programa de obra**

Se programarán las actividades a realizarse para la clausura y el saneamiento del sitio.

## **5.2 Clausura.**

### **5.2.1 Implementación de campañas de control de fauna nociva**

Se llevará a cabo la fumigación y desratización del sitio y sus alrededores, además de una campaña de control de caniños en la zona.

### **5.2.3 Desarrollo de campañas de información a la población**

A fin de lograr la comprensión y el apoyo de la población hacia las actividades de clausura, se implementará una campaña de sensibilización e información dirigida a los habitantes de la zona y del municipio, especialmente los pepenadores.

#### **5.2.4 Colocación de cerca perimetral e instalaciones de protección y vigilancia**

Para evitar la interferencia en las actividades de clausura y la posible invasión del predio, se colocará una cerca en el perímetro y las instalaciones de vigilancia y protección ubicadas en lugares estratégicos del área en cuestión.

#### **5.2.5 Acomodo, compactación y nivelación de residuos sólidos**

De acuerdo con lo establecido en el proyecto de clausura, se realizará el movimiento de tierras y residuos sólidos necesario para lograr la nivelación del terreno en su conformación final.

#### **5.2.6 Construcción del sistema de pozos de extracción de biogás**

En función de la ubicación y del diseño determinado en el proyecto, se construirán e instrumentará un sistema de pozos para la extracción de los gases producto de la descomposición de los residuos sólidos, incluyendo su protección y válvulas.

#### **5.2.7 Construcción del sistema de captación y tratamiento de lixiviados**

A partir del diseño de proyecto, se construirá el sistema para captar, conducir y tratar los líquidos percolados contaminantes y minimizar los efectos sobre el entorno.

**5.2.8 Colocación y compactación de la cubierta primaria** Con el material de cubierta seleccionado, se procederá a instalar una cubierta primaria, adecuadamente compactada, en toda el área del sitio a clausurar.

#### **5.2.9 Construcción del sistema de monitoreo de biogás**

De acuerdo a lo obtenido en los estudios geotécnicos, se construirán pozos de monitoreo de biogás, ubicados en la periferia del sitio para observar las posibles migraciones de gases y, en su caso, tomar las medidas de control apropiadas.

#### **5.2.10 Construcción del sistema de monitoreo de lixiviados.**

En función de los estudios geotécnicos y geohidrológicos, se implementará un sistema de pozos de monitoreo de líquidos percolados contaminantes que detecte las posibles fugas y alteraciones ambientales, para la realización de medidas de control y mitigación convenientes.

#### **5.2.11 Construcción del sistema para el monitoreo de asentamientos**

Con el fin de conocer las variaciones volumétricas que se presentarán durante el periodo de degradación biológica de los residuos sólidos, se deberá construir un sistema de nivelación adecuado.

### **5.3 Estabilización primaria del sitio**

#### **5.3.1 Programa de monitoreo ambiental**

Durante el período determinado para la estabilización primaria del sitio clausurado, se llevara a cabo un programa de monitoreo ambiental, encaminado a conocer las características de las emisiones contaminantes al aire, agua y suelo.

### **5.3.2 Evaluación de asentamientos**

De igual manera, se deberá desarrollar un programa de mediciones periódicas para conocer el comportamiento de los asentamientos en toda el área del sitio clausurado.

### **5.3.3 Mantenimiento de la cubierta primaria**

Debido a que, seguramente, se presentarán agrietamientos en la capa de cubierta primaria, se establecerá la inspección periódica de la superficie y la reparación de las grietas que se detecten en ella.

### **5.3.4 Mantenimiento de sistemas de monitoreo ambiental**

Se inspeccionarán las instalaciones de monitoreo para llevar a cabo un mantenimiento periódico de ellas, a fin de que funcionen adecuadamente.

## **5.4 Transformación del sitio en áreas verdes**

### **5.4.1 Limpieza de la cubierta primaria**

Se realizará la limpieza detallada de la cubierta primaria a fin de eliminar de ella los residuos sólidos y la vegetación silvestre que haya proliferado sobre ella.

### **5.4.2 Sellado de grietas**

Se hará el sellado de las grietas que se hayan presentado en la cubierta primaria, para que la superficie se encuentre en condiciones de recibir a la cubierta secundaria.

### **5.4.3 Colocación de la cubierta secundaria**

Con el material de cubierta apropiado, se procederá a instalar la capa de cubierta secundaria, adecuadamente compactada, en toda el área del sitio.

### **5.4.4 Colocación de la cubierta impermeable**

Según lo establecido en el diseño de proyecto, se procederá a instalar la capa impermeable de cobertura, la cual podrá ser natural, arcilla, o sintética (geomembrana).

### **5.4.5 Colocación de la cubierta de drenaje**

Es necesaria la colocación de una capa de drenaje para conducir las aguas infiltradas a través de las coberturas vegetal y superior.

### **5.4.6 Colocación de la capa de filtrado**

Para evitar el arrastre de los materiales finos por el paso de las aguas de infiltración hacia la capa de drenaje, se instalara un filtro sintético (geotextil) entre la capa de cubierta superior y la de drenaje.

### **5.4.7 Colocación de la cubierta superior**

Se realizará la colocación de una capa de cubierta en la parte superior, debidamente compactada y que reúna las características recomendadas en el proyecto.

#### **5.4.8 Selección de especies vegetales**

Los criterios generales de selección seguidos en la determinación de las especies a emplear en la recuperación vegetal del área fueron: que sean especies nativas de la zona; facilidad de reproducción, rápida velocidad de crecimiento, de mínimos requerimientos nutricionales y con capacidad de adaptación a medios perturbados del cual forman parte de la vegetación secundaria de áreas desprovistas de la vegetación original, lo que permitirá restaurar y lograr que la flora adyacente en forma natural se establezcan en el sitio.

Específicamente para la cortina rompevientos las especies son de forma biológica arbórea, en tanto que para las especies que se utilizaran en la plataforma y terrazas las especies seleccionadas son de forma biológica arbustiva.

#### **5.4.9 Colocación de la capa de materia orgánica**

Se realizará la colocación de una capa de tierra de hoja y la plantación de las especies vegetales que permitan la restitución de la vegetación, con el fin de minimizar los efectos erosivos y nocivos que la disposición de residuos tiene sobre el medio ambiente.

Se propone el establecimiento de una cortina rompevientos alrededor del sitio con el objeto de limitar la velocidad de los vientos y evitar la erosión. Las especies propuestas para la cortina rompevientos son: Caobilla, (*Swietenia humilis*); Guamuchil, (*Pithecellobium dulce*); Cirian, (*Crescentia alata*); Cuachalalate, (*Amphipterygium asdtrigens*); Parota, (*Enterolobium cyclocarpum*) y Ceiba, (*Ceiba sp.*).

En lo taludes se propone la siembra de las siguientes especies: Tehuixtle, (*Acacia belimeki*); Cubata, (*Acacia cochliacantha*); Huizache, (*Acacia farnesiana*); y Uña de gato (*Acacia macilenta*)

#### **5.4.10 Densidad de plantación**

Las especies que utilizaran como cortina rompevientos, se establecerán a dos hileras con una distancia entre plantas de 6 metros.

Las especies que se utilizaran en la plataforma y terrazas, se plantaran a una densidad de 441 plantas por hectárea, esto es, a una distancia promedio de 5 metros entre arbusto y arbusto, con el fin de tener espacios para que otras especies herbácea y arbustivas colonicen en el área.

### **5.5 Estabilización secundaria del sitio**

#### **5.5.1 Programa de monitoreo ambiental**

Se continuará el programa de evaluación de emisiones contaminantes hacia el entorno del sitio.

#### **5.5.2 Sellado de grietas**

Se dará seguimiento a la inspección de la cubierta y al sellado de las grietas que se presenten en ella.

#### **5.5.3 Evaluación de asentamientos**

Periódicamente se realizarán mediciones topográficas para conocer los asentamientos diferenciales que se presenten en el sitio.

#### **5.5.4 Seguimiento y evaluación de la cubierta vegetal**

Se establecerá un programa de seguimiento y evaluación de la cubierta vegetal, replantando los individuos que llegasen a secarse con el objeto de asegurar la completa recuperación de la vegetación del sitio.

### **5.6 Equipamiento del sitio**

#### **5.6.1 Programa de monitoreo ambiental**

Durante esta etapa y posteriormente a ella, se continuará con el muestreo y medición de las emisiones contaminantes provenientes del sitio rehabilitado.

#### **5.6.2 Construcción de instalaciones**

De acuerdo al uso final a que sea destinado el sitio rehabilitado, se realizará el equipamiento del sitio.

## **6. Propuestas Técnicas**

El funcionamiento del sitio, inició a partir del año de 1994 como tiradero a cielo abierto; el cual en sucesivas administraciones, se trató de convertir en un relleno sanitario controlado sin contar con los estudios pertinentes para lograrlo.

A partir de la presente administración, se asigna a la Secretaría de Servicios Públicos Municipales, la tarea de realizar los estudios y trabajos necesarios para la reconversión, clausura y control de los efectos adversos que degradan el entorno natural de la zona.

De acuerdo con lo anterior, la Dirección de Planeación Ambiental, dependiente de la Subsecretaría del Medio Ambiente, realizó el presente trabajo de análisis y diagnóstico, del cual se derivaron las siguientes propuestas técnicas:

1. Conformación de taludes, con pendiente 2:1 para evitar deslizamientos del relleno. ( Plano No.5 )
2. Construcción de un canal perimetral para desviar los escurrimientos pluviales, evitando la erosión del relleno y la contaminación de dichos escurrimientos al infiltrarse en los residuos. ( Plano No. 6 )
3. Construcción de una red para captación de biogás, con el fin de evitar peligrosas concentraciones de metano, que contaminan la atmósfera, pueden originar incendios, explosiones e intoxicaciones dentro de la zona,

así como para obtener su eventual aprovechamiento como fuente de energía. ( Planos Nos. 5 y 8 )

4. Recuperación y tratamiento de líquidos percolados contaminantes ( Lixiviados ), evitando de esta forma, la contaminación con sustancias peligrosas de cuerpos de agua subterráneos y superficiales. ( Plano No. 7 )
5. Clausura y saneamiento que comprende: conformación final, monitoreos periódicos de control, eliminación de fauna nociva, transformación del sitio en área verde, sellado de grietas y equipamiento del sitio.

## Bibliografía

- Andersen, A.A. 1985. " New sampler for the collection, sizing and enumeration of viable airborne particles". J. Bacteriology.76.5.
- AMCRESP, A.C. Impacto Ambiental en Rellenos Sanitarios. Coordinador General: M. en I. Jorge Sánchez Gómez. 1998.
- Carl Fries, 1956. Geología del Estado de Morelos. Instituto de Geología, UNAM.
- Carta Hidrológica Esc. 1:50,000 INEGI.
- Carta Topográfica Esc. 1:50,000 INEGI.
- Engineering Principles and Management Issues. McGraw-Hill International Editions. Singapore.
- Flores, O.R. Sánchez, G.J. 1992. " La geofísica aplicada como un apoyo fundamental para el adecuado confinamiento de residuos sólidos". Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, A.C. VIII Congreso Nacional. Morelos, México.
- Fotografías aéreas verticales, Esc. 1:75,000 INEGI.
- Francisco Javier Aparicio Mijares. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Limusa. 2001.
- Norma Oficial Mexicana. NOM-083-ECOL-1994. Que establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos Municipales.
- Ray E. Linsley. Ingeniería de los Recursos Hidráulicos. Compañía Editorial Continental. 1968.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. 1985. " Proyecto Tipo de Relleno Sanitario". Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental. México.
- Tchobanoglous, G., H. Theisen y S. Vigil, 1993. Integrated Solid Waste Management.

## **CLAUSURA Y SANEAMIENTO DEL EXTIRADERO DE BASURA Y, CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DEL RELLENO SANITARIO DE TLALNEPANTLA DE BAZ, ESTADO DE MÉXICO.**

Ing. Óscar Carlos Vázquez Hernández.

Relleno Sanitario de Tlalnepantla.  
Consortio Internacional de Medio Ambiente.  
Camino Viejo a las Minas s/n. San Pedro Barrientos, Tlalnepantla, Estado de México.  
Tel. 5317-1116, 5317-2490.

### **RESUMEN.**

Una vez detectados los problemas originados por la mala disposición de la basura en el Municipio de Tlalnepantla, sus autoridades decidieron clausurar y sanear el tiradero a cielo abierto a través de CIMA; para ello fue necesario realizar estudios de reconocimiento y un proyecto ejecutivo que considerase variables técnicas, económicas y climatológicas. Fue así como la obra se realizó en tres etapas relacionadas con la época de lluvias y la naturaleza de los trabajos por ejecutar

Por otro lado, el diseño, construcción y operación del relleno sanitario se apega a lo estipulado en las Normas Oficiales Mexicanas en materia de ecología y aún se han implementado actividades de apoyo que permiten garantizar la preservación del medio ambiente.

### **ANTECEDENTES.**

Las principales ciudades de la República Mexicana siguen creciendo aceleradamente y demandando servicios públicos que ofrezcan a sus habitantes condiciones de vida con estándares de calidad elevados dentro del ámbito nacional e internacional, y el Municipio de Tlalnepantla no es la excepción. Durante muchos años el servicio referente al manejo de los residuos sólidos urbanos ha quedado circunscrito tan solo a la recolección, sin prestar la suficiente atención a la disposición final de estos y, es ahí donde actualmente se presentan los mayores problemas de contaminación; por mencionar algunos tenemos:

- Incendios recurrentes (fotografía 1).



Fotografía 1.

- Proliferación de fauna nociva.
- Dispersión de diversos materiales hacia terrenos aledaños (fotografía 2).
- Maños olores.



Fotografía 2. Dispersión de materiales.

- Esgurrimiento y filtración de lixiviados de naturaleza contaminante hacia cuerpos de agua superficiales o subterráneos (fotografía 3).



Fotografía 3. Esgurrimiento superficial de lixiviados.

La separación rudimentaria de subproductos conocida como pepena deriva en problemas de salud pública y marginación social para las personas que a ello se dedican; además, ocasiona disputas muy severas por el control de su mercado y retribuciones.

Por todo esto, en el año de 1997 las autoridades del H. Ayuntamiento de Tlalnepantla licitaron y adjudicaron en un contrato administrativo de prestación de servicios la Clausura y Saneamiento del extradero de Basura de Tlalnepantla, así como la Construcción y Operación del nuevo Relleno Sanitario.

#### **CLAUSURA Y SANEAMIENTO DEL EXTRADERO.**

### **Generalidades.**

El antiguo tiradero de basura utilizado por el Municipio de Tlalnepantla de Baz para la disposición final de sus residuos durante poco más de seis años, tiene una superficie de 16.34 hectáreas, se estima que durante su vida útil recibió aproximadamente 1'800,000 toneladas de residuos a razón de 700 ton/día y picos de hasta 1000 ton/día.

Se localiza en la zona Norte del Área Metropolitana de la Ciudad de México. En la margen occidental de la Autopista México-Querétaro, al N-NW de la colonia La Providencia, zona de Barrientos, Municipio de Tlalnepantla de Baz, Estado de México. Colinda al Sur con el actual Relleno Sanitario y ambos están dentro del terreno destinado para este particular (figura 1).

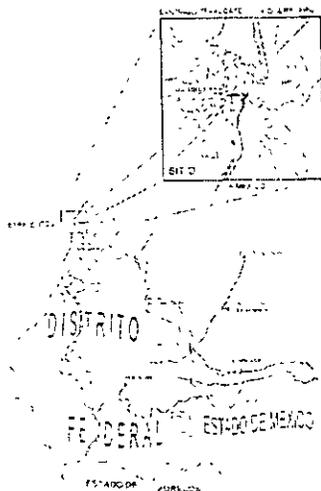


Figura 1. Localización del sitio.

Su clausura y saneamiento es parte del contrato de concesión para la construcción y operación del relleno sanitario.

### **Objetivos.**

- Estabilizar la masa de residuos, evitando así posibles deslizamientos de material que pongan en peligro la seguridad e integridad de la infraestructura colindante así como de las personas que habitan en la zona.
- Sellar la totalidad de la superficie con arcilla para mitigar la filtración de agua de lluvia hacia el interior, evitar la dispersión de materiales ligeros por la acción del viento, malos olores, proliferación de fauna nociva e incendios, así como permitir la salida controlada del biogas.
- Convertir el sitio en un área verde que se puede incorporar al entorno de manera armoniosa.

### **Proceso de la clausura y saneamiento.**

Se planeó en tres etapas bien definidas para evitar en lo posible trabajar en épocas de lluvia; o bien, cuando el terreno se encuentra saturado por sus efectos.

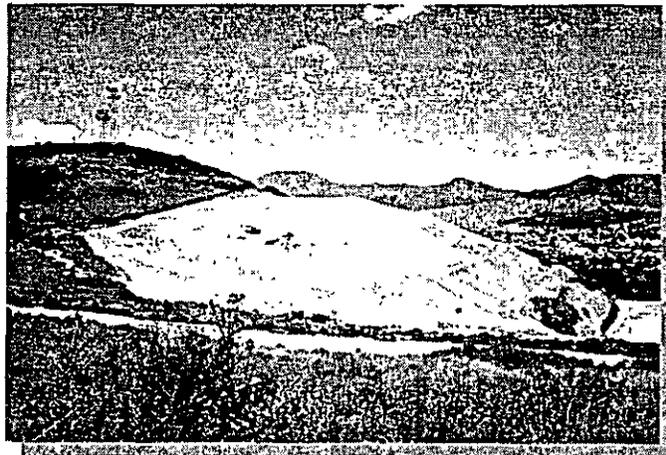
La etapa uno fue prácticamente de reconocimiento y evaluación de la problemática, de ésta se desprendió la urgencia por atacar una primera zona en la que ya eran evidentes las fallas de taludes por la sobrecarga que soportaban en los hombros y el incremento de las presiones de poro. Se desarrolló de abril de 1998 a julio del 2000.

La segunda etapa se planeó para atacar de manera definitiva el problema, concentrando los esfuerzos en el periodo enero-julio del 2001. .

Por último, la etapa tres es prácticamente de mantenimiento de las condiciones topográficas originales y la revegetación paulatina del sitio; por lo tanto su duración será el de la vida útil del sitio de disposición actual.

#### **Etapa I.**

- Estudio topográfico de detalle en 16.34 hectáreas de terreno.
- Estudio de geofísica para detectar espesores de residuos, contactos con el terreno natural y tipos de materiales al interior.
- Proyecto ejecutivo, en el que se consideró el menor movimiento de residuos posible.
- Captación y conducción de lixiviados hacia la laguna del relleno sanitario para su control. Longitud total del sistema implantado 320.0 m.
- Construcción de cunetas para captación y desvío de agua pluvial en 550.0 m.
- Acondicionamiento de caminos de acceso en aproximadamente 550.0 m.
- Formación y estabilización de taludes, incluyó el corte, carga, acarreo, conformación, bandeo y cobertura de 150,000 m<sup>3</sup> de residuos (fotografía 4).



Fotografía 4. Vista de la geometría del extradero después de los trabajos en la etapa I.

- Perforación y habilitación de 39 pozos de venteo de biogas.

#### **Etapa II.**

- Estabilización de taludes cuyas alturas oscilan entre los 15 y 20 m con una relación de pendiente horizontal:vertical de 2.5:1, incluyó el corte, carga, acarreo, conformación y bandeo de 215,000 m<sup>3</sup> de residuos (fotografía 5)



Fotografía 5.

- Conformación de bermas. Permite la circulación vehicular para mantenimiento futuro y la captación y conducción de aguas pluviales para su desalojo de manera controlada.
- Colocación de material de sello. Se colocó una capa de arcilla compactada en 60 cm de espesor, para evitar la filtración de agua de lluvia hacia el interior de los residuos. La superficie total trabajada fue de 140,000 m<sup>2</sup> (fotografía 5).
- Lavadero, cunetas y cárcamos. Se construyó un lavadero principal para el desalojo del agua de lluvia, así como cunetas en 750.0 m de camino de acceso.
- Camino de acceso. Su longitud total en esta etapa fue de 1300.0 m de terracería con bombeo del 2%, suficiente para dar salida al agua de lluvia.
- Inducción de especies vegetales silvestres propias de la región en algunas zonas, para su adecuación a las condiciones del sitio y su posterior proliferación a todo el predio.

### **Etapas III.**

- El cuidado continuo de esta zona y su revegetación hasta lograr la total incorporación al entorno, es una tarea constante que tendremos que realizar hasta el final de la vida útil del relleno sanitario
- Perforación de pozos de venteo de biogas.

Las fotografías 6 y 7 muestran las condiciones iniciales y finales del extiradero de basura de Tlalnepantla.



Fotografía 6



Fotografía 7.

## CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DEL RELLENO SANITARIO.

### **Características generales del proyecto.**

La superficie del terreno cedido en usufructo para la construcción y operación del relleno sanitario es de 28.27 hectáreas. En este lugar deposita sus residuos el Municipio de Tlalnepantla de Baz y algunos usuarios particulares que aportan hasta el 12% del ingreso total mensual, en total se reciben 800 toneladas diarias los 365 días del año, con horario de las 6:00 a las 22:00 horas.

El proyecto contempla una producción inicial de 800 ton/día y un incremento anual del 1.0%, durante los veinte años que durará la concesión y que a su vez es la vida útil total estimada para el sitio.

### **Estudios previos.**

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-083-ECOL-1996 se hicieron estudios previos a la construcción del relleno sanitario que garantizaran la seguridad e integridad del medio ambiente. A continuación se mencionan cada uno de ellos.

- Geología regional y local.
- Geofísica.
- Mecánica de suelos.
- Geohidrología.
- Manifestación de impacto ambiental.

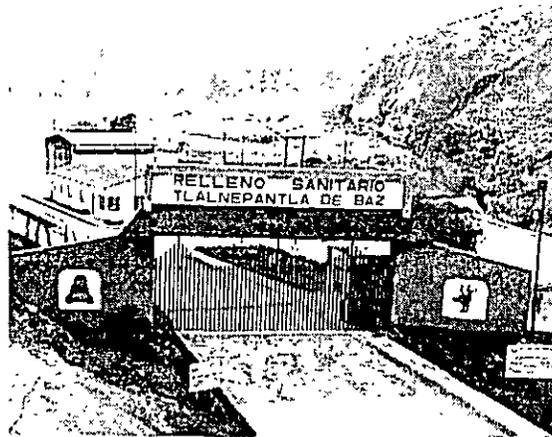
Las conclusiones más relevantes de estos son:

- El sistema en su conjunto es de permeabilidad pobre.
- En general el área se considera tectónicamente estable.
- Para el caso de las excavaciones, los taludes de éstas permanecerán estables con pendientes de tan solo 2.5:1.
- No se detectó la presencia del nivel freático en los primeros 50 metros de profundidad.
- La ejecución del proyecto es ambientalmente favorable, ya que está orientado a la solución de un importante problema que está actualmente afectando zonas territoriales, masas de agua, atmósfera y la salud de la población.

#### **Obras complementarias y construcción.**

Una vez terminados los estudios previos, se complementó el proyecto ejecutivo del relleno sanitario para su inmediata construcción y puesta en marcha. Las obras complementarias con que cuenta son:

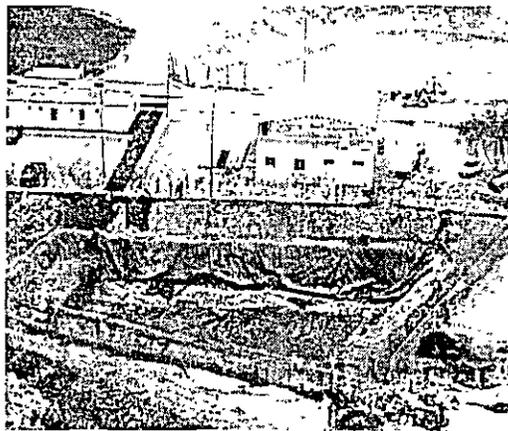
- Caseta de vigilancia (fotografía 8).
- Portón de acceso (fotografía 8).
- Oficinas administrativas, taller, almacén, regaderas y vestidores (fotografía 8).



Fotografía 8. Vista exterior del área de servicios.

- Báscula camionera del tipo eliminadora de fosa de cimentación, computarizada, capacidad de 70 0 toneladas y 23.0 metros de longitud.
- 3,000 m<sup>2</sup> de estacionamiento para vehículos y camiones recolectores.
- Cerca perimetral a base de malla ciclónica y tres hilos superiores de alambre de púas, en 2.0 metros de altura con una longitud total de 2,800 metros.
- Forestación de la zona de amortiguamiento perimetral a partir de árboles trueno, talla mínima al momento de sembrar 2.0 metros, a cada 3.0 metros en tres hileras al tres bolillo. En la colindancia con la colonia La Providencia se sembraron en siete hileras.
- Camino perimetral, pavimentado con material recuperado, longitud 800.0 metros con 2,000 0 metros de terracería.
- Drenes para captación y conducción de agua pluvial, destinados mayoritariamente al desvío del agua de lluvia antes de su ingreso a la parcela.
- Caminos de acceso, principal y secundarios totalmente pavimentados en aproximadamente 2.0 kilómetros
- Instalación eléctrica, hidráulica, sanitaria y de gas L.P. para servicio de regaderas
- Tanque para almacenamiento de diesel con capacidad de 12,000 litros, incluye dique de seguridad por derrames accidentales.
- Laguna de almacenamiento y evaporación de lixiviados, con capacidad para 4,000 0 m<sup>3</sup>, totalmente impermeabilizada mediante la colocación de las siguientes capas:
  - Geotextil de 200 gm/m<sup>2</sup>. Para protección de la membrana plástica en su contacto con el terreno natural.
  - Primera Geomembrana de polietileno de alta densidad, virgen, en 1 mm de espesor. Es el material que proporciona la impermeabilidad del conjunto y retiene cualquier posible fuga de la segunda geomembrana.
  - Georred 140. Proporciona una separación y protección adicional entre las dos membranas plásticas en caso de ruptura de la que se encuentra al exterior.
  - Segunda Geomembrana de polietileno de alta densidad, virgen, en 1 mm de espesor. Es el material que proporciona la impermeabilidad del conjunto

Como medida de seguridad se aisló esta zona mediante una malla ciclónica de 2.0 metros de altura, y para mejorar aún más su estética, se plantó bambú plumoso en todo su perímetro (fotografía 9).



Fotografía 9. Vista superior de la laguna de lixiviados.

- Preparación de la celda 1.
- ✓ Trazo y nivelación. Se marcó físicamente en el terreno lo que se había diseñado en los planos del proyecto, el área total de la primera celda fue de 7.0 hectáreas.
- ✓ Excavación. Con la intención de obtener material de cobertura de buena calidad, así como prolongar la vida útil del sitio, se hizo una excavación de 3.0 metros de profundidad. El material producto del corte se almacenó en un banco cercano a la zona futura de operación y con ello su fácil ulterior extracción para la cobertura diaria de residuos.
- ✓ Afine de las superficies. Esta actividad es mecanizada en las superficies horizontales y manualmente en los taludes; independientemente de cómo se afinaron, se inspeccionaron minuciosamente en recorridos a pie quitando exclusivamente a mano las pequeñas salientes o imperfecciones que pudiesen dañar la membrana
- ✓ Excavación de drenes de captación y conducción de lixiviados. Una vez que se terminó de afinar la celda se procedió a trazar los drenes y a excavarlos; las dimensiones mínimas prácticas de estos son: 1.5 metros de ancho por 0.4 metros de profundidad.
- ✓ Colocación de geotextil. El material empleado es de 200 gm/m<sup>2</sup> y se colocó en taludes y en aquellas zonas donde el afine fue exclusivamente manual. Su función es proteger la membrana plástica de las imperfecciones del terreno sobre el que se coloca. Debido a las grandes alturas de taludes que tenemos en este relleno sanitario, la impermeabilización vertical se hace progresivamente de abajo hacia arriba, en franjas de 7.0 a 8.0 metros de altura, de tal forma que los residuos recibidos en la operación diaria sean los que le den el soporte necesario al sistema; mientras esto sucede, los materiales se fijan a la pared mediante clavos y rondanas de hule que evitan rasgaduras.
- ✓ Colocación de geomembrana. Al igual que el afine, la colocación de geomembrana fue una etapa crítica, en superficies horizontales se hizo de la siguiente forma: Sobre el terreno perfectamente fino y libre de cualquier objeto punzocortante, se tienden los paños de membrana del largo requerido, la unión entre paños se hizo por termofusión a 415 °C y a una velocidad de 1.0 metro por minuto aproximadamente. Las máquinas de unión empleadas tienen contacto continuo sobre el área de traslape en dos puntos equidistantes, que al final del trabajo forman un conducto.

Se comprobó la hermeticidad de las uniones taponando ambos extremos de los conductos formados, e inyectando aire a 50 lb/pulg<sup>2</sup> durante 5 minutos, al cabo de los cuales ésta no descendió más de 1 lb/pulg<sup>2</sup>.

Las pequeñas perforaciones hechas al material durante su manejo se vulcanizaron mediante material de aporte fundido y colocado sobre el área por reparar. Las pruebas de hermeticidad en éstas fueron por aplicación de vacío a 50 lb/pulg<sup>2</sup>

En los taludes los paños de geomembrana son de largo variable, siempre y cuando no exceda los 10.0 metros, y con un ancho de 6.86 metros; se colocan verticalmente con ayuda de poleas y escaleras para finalmente anclarles a la pared mediante clavos. En estos casos las uniones se hacen por medio de aplicación directa de aire a 600 °C de temperatura.

- ✓ Protección mecánica de la geomembrana. La membrana de polietileno es un material que puede ser fácilmente dañado por el tránsito de la maquinaria pesada, para evitarlo fue necesario protegerla mecánicamente de la siguiente forma. En superficies horizontales, se logró colocando una capa de arcilla producto de las excavaciones en dos espesores de 20 centímetros cada una, compactadas al 90% Proctor.

Es de suma importancia que el material empleado esté libre de rocas y/o terrones y, delimitar los drenes de captación y conducción de lixiviados con costales para evitar su azolve.

Si se trata de superficies de taludes, la protección es a partir de llantas de desecho, apiladas horizontalmente; o bien, costales rellenos de arcilla, siendo esta última opción la menos recomendable por su alto costo en materiales y mano de obra.

- ✓ Drenes de captación y conducción de lixiviados Esta es la última tarea en la fase de construcción y se ejecutó como sigue:

Durante la colocación de la protección mecánica se tendió una hilera de costales rellenos de tepetate a tres hiladas de cada lado de los drenes, quedando perfectamente delimitados por ellos.

Posteriormente, se barrió con agua a presión y/o aire la geomembrana de la superficie del dren y se colocó un paño de geotextil en toda su longitud. Inmediatamente se vació manualmente una cama de boleó de 4 pulgadas de diámetro como mínimo libre de finos, finalmente se remató vaciando rocas de origen ígneo de la misma granulometría indicada para el boleó, libre de finos y cuyos cantos pudieron o no, tener aristas.

En tanto los drenes quedaban inmersos en la masa de residuos, se cubrieron temporalmente con plásticos para evitar el ingreso de azolve a su interior.

Concluido todo esto el relleno sanitario estuvo listo para iniciar operaciones el primero de abril de 1998 (figura 2).

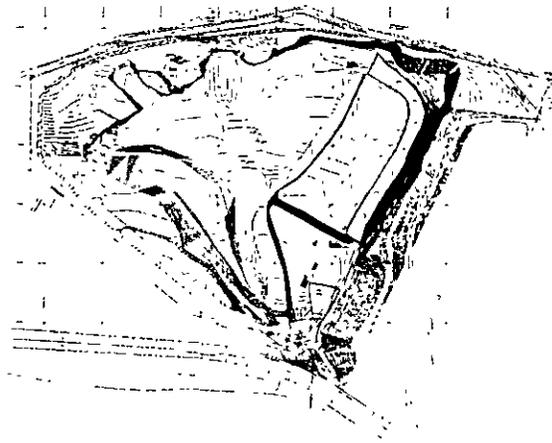


Figura 2. Vista en planta del relleno sanitario y sus instalaciones.

### **Operación.**

La operación en el Relleno Sanitario de Tlalnepantla de Baz inicia diariamente a las 6:00 hr y termina a las 22:00 hr durante los 365 días del año. Está integrada básicamente por cuatro operaciones que son:

- Ingreso. Los trabajos de operación comienzan con el ingreso de los vehículos al área de báscula donde se registran y pesan, siempre y cuando estén autorizados por la Dirección de Ecología del H. Ayuntamiento:

- Descarga Ya en el frente de vertido los acomodadores de la empresa concesionaria le indican al conductor del camión el sitio donde debe depositar los residuos. Posteriormente, la unidad sale del frente de vertido y toma el camino señalado como Salida para dirigirse directamente a la báscula.
- Extendido y compactación. Esta actividad se desarrolla inmediatamente después de que algunos vehículos recolectores han vaciado sus residuos en el frente de vertido. Consiste básicamente en empujarlos con la hoja topadora de la maquinaria, la cual al ir avanzando sobre el talud de basura (con pendiente 4:1) comienza a elevar la cuchilla para perder bajo ésta una capa de aproximadamente 60.0 centímetros de residuos, que debido al efecto de las repetidas ocasiones en que se realiza esta actividad se compactan de manera inicial.

Los trabajos de extender y compactar los residuos se circunscriben a un frente de vertido de 35.0 metros de largo para dentro de él poder atender hasta 8 vehículos a la vez, pudiendo avanzar en dirección transversal al frente la longitud necesaria según el ingreso de residuos. La altura de la celda de proyecto es de 5.0 metros.

La compactación definitiva de los residuos se alcanza con el uso del compactador de rellenos sanitarios 816F, cuyo trabajo esencial es conformar taludes y definir los pisos de acuerdo con la topografía diaria. Para lograr su cometido, esta máquina debe empujar residuos hacia las zonas a donde falte, recortar en algunas otras y pasar sobre la totalidad de la masa de residuos de manera uniforme de tres a cuatro veces. Finalmente, recorta con la cuchilla el excedente y deja el piso listo para recibir la cobertura de arcilla.

En el frente de vertido el servicio invariablemente siempre se presta con dos máquinas:

- ✓ Tractor y compactador.
  - ✓ Tractor y cargador.
  - ✓ Compactador y cargador.
- Cobertura de los residuos. Diariamente y al final de la jornada, el frente de vertido queda cubierto con tepetate hasta el hombro del talud, esta cobertura se tiende con cierre de huella en dos direcciones ortogonales.

#### **Actividades complementarias.**

Para una correcta operación del relleno sanitario es indispensable la ejecución de diversas tareas de apoyo; las más importantes son:

- Colocación de pozos de biogas. En el plano de ubicación de pozos de biogas del proyecto se detallan las coordenadas X, Y y Z de cada una de estas estructuras, las cuales son replanteadas en la celda donde se comenzará el vertido de residuos; se fabrican a partir de tambos limpios de lámina perforados al tresbolillo en sus paredes, quedando listos para sobreponer y asegurar

Cada pozo se desplanta sobre una cama de basura de 2.0 metros de altura, desde la primera plataforma de vertido. Una vez desplantado se llena su interior con boleto mayor a 4" de diámetro.

- Colocación de malla de papeleo La malla de papeleo se usa en el frente de vertido para interceptar los materiales que son arrastrados por el viento.
- Papeleo manual Esta actividad consiste en levantar manualmente todos los papeles, bolsas, etc, que son arrastrados por el viento fuera del frente de vertido.

- Revisión de residuos. Diariamente se realizan cuatro revisiones en horarios aleatorios a los vehículos recolectores que hacen uso del relleno sanitario, la intención es detectar posibles introducciones de residuos peligrosos para confinamiento.

Con todos estos elementos bien manejados, se logra configurar una zona de operación de formas geométricas agradables a la vista y, sobre todo, de protección al medio ambiente.

#### **Planeación.**

En el sitio se cuenta con información estadística del ingreso diario promedio de vehículos y residuos, tiempos de espera, etc. que permite proyectar con un alto grado de confiabilidad la vida útil de cada celda, estableciendo así programas de trabajo tanto para el área operativa como para el área encargada de la construcción y/o ampliación de celdas.

Otra actividad imprescindible para la planeación del proyecto es el seguimiento topográfico, de cuyos registros se desprende el valor de la densidad alcanzada.

Con estas dos herramientas, se construyen los planos constructivos en los que claramente se indica la secuencia de operación así como los tiempos de utilización en cada zona, figura 3 y fotografía 10.

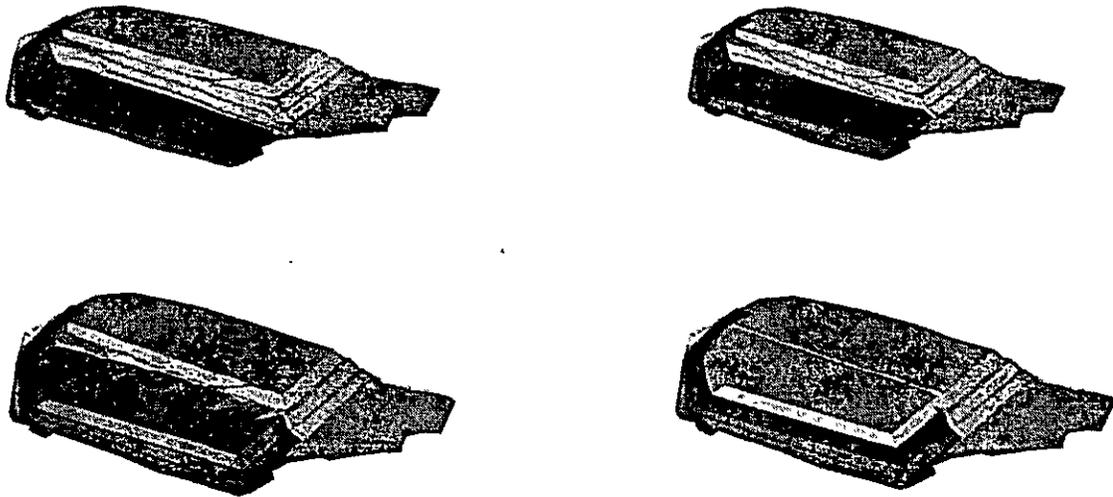
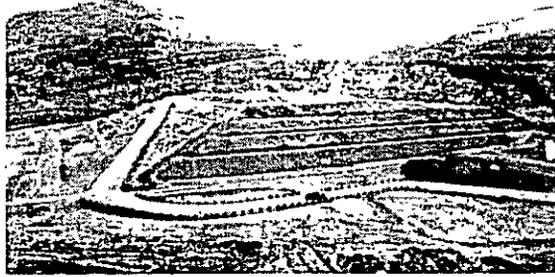


Figura 3. Secuencia de operación en el tiempo.



Fotografía 10. Vista general del relleno sanitario

### CONCLUSIONES.

Las condiciones prevalecientes en los tiraderos a cielo abierto demandan su rápida clausura y saneamiento para evitar que la contaminación que generan siga creciendo y afectando al medio ambiente, cuyas repercusiones reales son impredecibles e inevitables. El saneamiento de un tiradero requiere de un proyecto técnico que considere la topografía del sitio, espesores de residuos, climatología de la región, etc. y, además, una importante cantidad de recursos económicos para mitigar y sólo eso, la contaminación originada.

En el Municipio de Tlalnepantla de Baz, Estado de México, las autoridades decidieron en su día, clausurar y sanear el extiradero de basura y, a su vez, poner en funcionamiento un relleno sanitario que cumpliera con todos los preceptos de las Normas Oficiales Mexicanas en materia de ecología, cuya ubicación, construcción y equipamiento implica el empleo de la más alta tecnología en este campo. Por otra parte, la operación de los residuos que ingresan es altamente tecnicada, ágil y segura, con lo cual se logra cambiar de manera radical la óptica sobre el manejo de basura que la población en general tiene; dignificando, además, el trabajo de las personas que a ello se dedican.

Los rellenos sanitarios son una opción viable para la solución de una parte de la problemática de los residuos sólidos, siempre y cuando sean correctamente diseñados, construidos y operados.

Aún quedan aspectos por desarrollar en el país, como es el aprovechamiento del biogas o el tratamiento de los lixiviados, que en la misma medida que este tipo de instalaciones cobren importancia, se obtendrán avances tecnológicos nacionales que permitan hacerles frente

Por otro lado, sería conveniente trabajar en dirección a la disminución de la generación y aprovechamiento de los subproductos, y paralelamente, reforzar los medios asignados a la supervisión de la aplicación de las Normas Oficiales en esta materia.

Por lo antes expuesto es urgente abandonar los viejos esquemas de manejo de residuos para adoptar nuevas tecnologías que nos permitan vivir de manera armónica y en equilibrio con el medio ambiente.



FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA

CURSOS INSTITUCIONALES

**REHABILITACIÓN  
Y CLAUSURA DE  
TIRADEROS A  
CIELO ABIERTO**

Del 07 al 18 de Octubre de 2002

***ANEXOS***

CI - 357

**DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS URBANOS  
OCTUBRE DEL 2002**

# Clausura de vertederos

El diseño y la construcción de vertederos es una actividad continua que finaliza solamente cuando toda la capacidad disponible o permitida de la zona ha sido completada con residuos sólidos. Cuando esto se produce, el vertedero se debe cerrar, acción final en una instalación que no va a recibir más residuos sólidos. Para asegurar el funcionamiento de los controles ambientales durante la clausura y durante un período de tiempo después de la clausura, debe desarrollarse previamente un plan de clausura, a menudo en la fase de diseño o durante la preparación de la zona. El objetivo del plan es definir los pasos que hay que adoptar para cerrar el vertedero y los elementos de mantenimiento postclausura requeridos por las leyes federales y estatales.

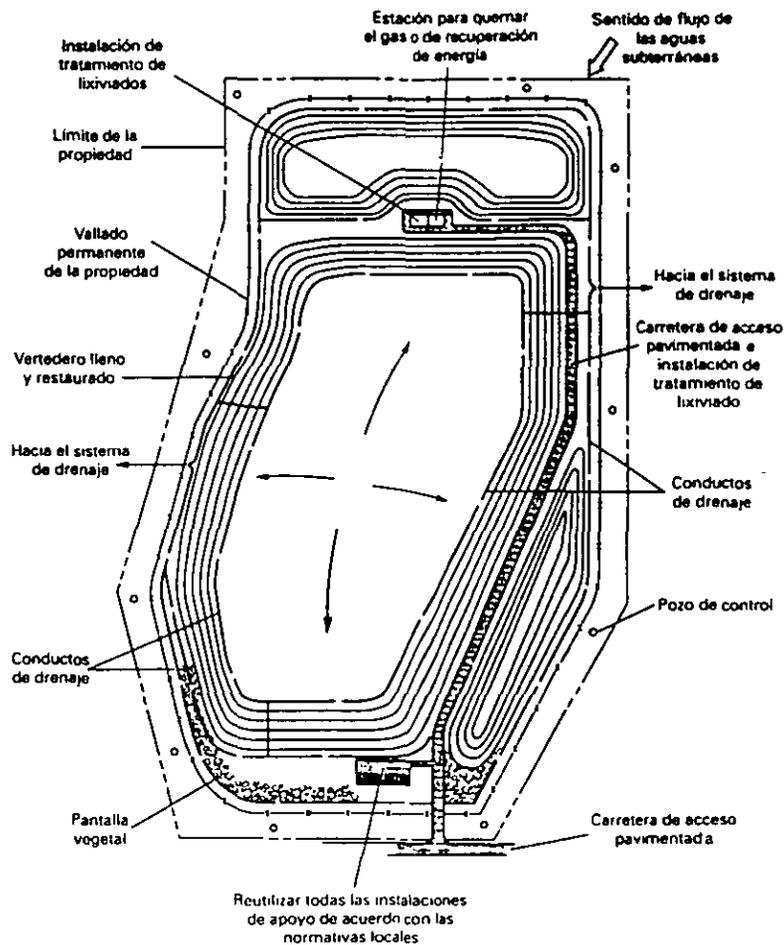
El propósito de este capítulo es introducir al lector en los elementos claves implicados en el desarrollo de planes de clausura para vertederos y en las líneas directrices para el mantenimiento a largo plazo de vertederos cerrados (también conocidos como *unidades para la gestión de residuos*). Hay que subrayar que la clausura del vertedero es una actividad separada del diseño y de la explotación del vertedero, descritos en el Capítulo 11. Tal separación pretende enfatizar el largo período de tiempo transcurrido entre el diseño y la iniciación de un vertedero y la clausura del mismo.

## **16.1 DESARROLLO DE UN PLAN DE CLAUSURA**

Como unidad para la gestión de residuos, un vertedero, cuando está completo, debe seguir funcionando eficazmente como una unidad para el control ambiental de los residuos durante un largo período de tiempo en el futuro. Las normativas sobre vertederos han llegado a ser cada vez más estrictas y obligatorias, y muchos estados han requerido la inclusión de un plan de clausura como parte del proceso de aprobación del proyecto, antes de comenzar las operaciones de construcción y vertido. El plan de clausura debe mostrar todas las características del lugar completo (ver Figura 16.1) e identificar las entidades responsables para implantar la clausura de las instalaciones. Normalmente, los planes de clausura desarrollados cuando se abre un vertedero se modifican durante el tiempo de explotación. Por tanto, es importante poner al día periódicamente el plan de clausura. En California se ponen al día los planes de clausura cada cinco años o cuando hay cambios significativos en las operaciones del vertedero. Se prepara y adopta un plan final de clausura justo antes de que el vertedero deje de recibir residuos. En la Tabla 16.1 se identifican los elementos de un plan de clausura. En un plan de clausura se deben afrontar las siguientes cuestiones:

- Diseño de la cobertura final.
- Sistemas de control de las aguas superficiales y de drenaje.
- Control de los gases de vertedero.
- Control y tratamiento de los lixiviados.
- Sistemas de supervisión ambiental.

Los procesos biológicos naturales que se producen en el vertedero causarán finalmente la estabilización del vertedero y llegará a ser utilizable para otros fines de la comunidad. En el plan de clausura deberían identificarse también los usos potenciales de los vertederos agotados.



**FIGURA 16.1**

Plano de un vertedero completo mostrando todos los elementos implicados en la clausura y en el mantenimiento postclausura.

**TABLA 16.1**  
Elementos típicos de un plan de clausura de vertedero

Elemento	Actividad típica
Utilización postclausura del terreno	Designación y adopción
Diseño final de cubrición	Seleccionar la barrera de infiltración, pendientes superficiales finales y vegetación
Sistemas de control de agua superficial y drenaje	Calcular las cantidades de aguas pluviales para la escorrentía y seleccionar la localización y tamaños de los canales perimétricos para recoger la escorrentía y prevenir la entrada de aguas superficiales
Control de gases de vertedero	Seleccionar las localizaciones y la frecuencia de la supervisión del gas y fijar el horario operacional para los pozos de extracción de gas y las antorchas, si son necesarias
Control y tratamiento de lixiviados	Fijar el horario operacional para la separación y tratamiento de lixiviados, si es necesario
Sistemas de supervisión ambiental	Seleccionar las localizaciones de muestreo / la frecuencia de la supervisión, así como los constituyentes que se van a medir

## Diseño de la cobertura final

La cobertura final es la superficie que se va a colocar sobre un vertedero después de recibir todos los residuos (ver Figura 16.2). El diseño de la cobertura final es una parte integral del plan de desarrollo del lugar. El diseño de la cobertura final debe satisfacer dos funciones: 1) asegurar la integridad post-clausura a largo plazo del vertedero con respecto a cualquier emisión ambiental y 2) soportar el crecimiento de la vegetación o soportar otras posibles utilidades.

**Parámetros de diseño para la cobertura.** Los parámetros de diseño típicos para la cobertura incluyen: 1) configuración del diseño, 2) permeabilidad final, 3) pendiente superficial, 4) tratamiento paisajístico, 5) método de recuperación tras producirse asentamientos en el vertedero y 6) estabilidad de la pendiente bajo cargas estáticas y dinámicas. En la Figura 11.53 se presentan ejemplos de diseño de coberturas para vertederos. Se puede evaluar anticipadamente el rendimiento de la cobertura del vertedero sometiendo el diseño final a un análisis ingenieril sobre la consolidación del suelo, la estabilidad de la pendiente y las cargas superficiales del lugar. Quizás se tengan que modificar los materiales naturales y sintéticos utilizados en el diseño de la cobertura final, para solucionar los problemas de rendimiento (por ejemplo, límites de estiramiento) identificados en la evaluación.

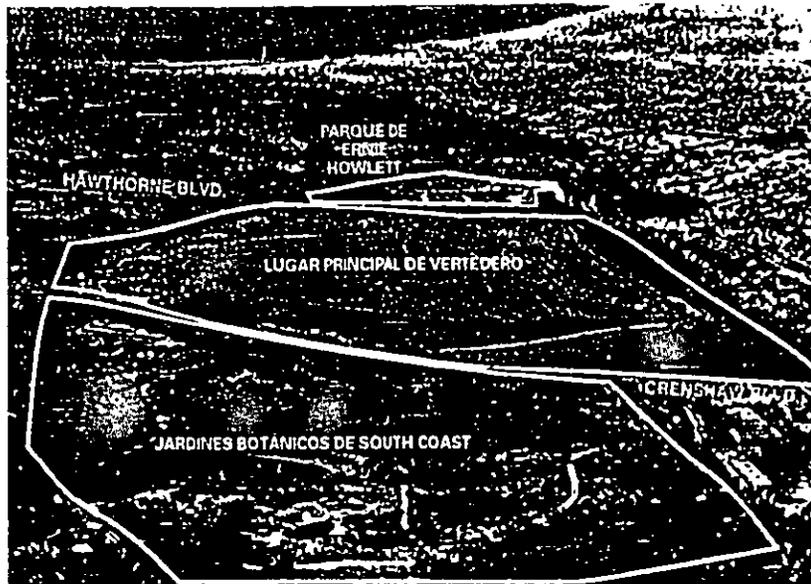
**Revegetación.** Aunque un vertedero clausurado proporciona una gran superficie de terreno que puede utilizarse para muchos propósitos, con las características de control apropiadas, el uso más común de un vertedero clausurado es el cultivo de plantas. Cuando se usan plantas, los proyectistas deben prestar una atención especial a la selección de las especies, para que puedan sobrevivir en las condiciones especiales del vertedero clausurado. Como la selección de la vegetación no está tratada ampliamente por la literatura sobre el tema, se dedica a esta cuestión una sección separada dentro de este capítulo.

**Programa para garantizar la calidad de la construcción.** Al estar muchas de las normativas sobre clausura de vertederos basadas en el rendimiento, la mayoría de las agencias regulatorias requieren controles y supervisiones estrictos durante la construcción de la cobertura final. Un programa para garantizar la calidad de la construcción (GCC) proporcionará los detalles necesarios sobre la forma en que se va a comprobar y supervisar la cobertura final durante su construcción. El programa GCC debería coordinarse muy de cerca con el diseño de cobertura final, y debería describir los procedimientos de instalación y ensayo de suelos, de instalación de las redes de drenaje y de las membranas sintéticas.

**Suelos.** Cada capa de suelo en la cobertura final tendrá un ensayo de densidad, permeabilidad en la puesta en obra y espesor. Cuando se coloca el suelo sobre geotextiles y sobre membranas sintéticas, habrá un control específico para el espesor de suelo que puede colocarse en un paso, cuando se requieran múltiples pasos para lograr el espesor total de la capa de suelo. La capa superior de suelo, a menudo la capa que soporta la vegetación, requerirá ensayos para establecer su capacidad para sostener el crecimiento de plantas. Los resultados analíticos para los ensayos de suelo sobre la cobertura final no se pueden generalizar, porque son específicos para cada lugar.

**Red de drenaje.** La red de drenaje es el medio mediante el cual se desvía el agua que penetra la capa superior del suelo fuera del vertedero sin que penetre hasta los residuos. El programa GCC se centrará en la integridad de la capa de drenaje para prevenir la rotura de la línea de flujo o el estancamiento del agua sobre la membrana sintética.

**Membrana sintética.** En muchos planes de clausura para vertederos, se utilizan las membranas sintéticas para prevenir que penetre en los residuos la mayor parte del agua que percola la capa de suelo superior. El fabricante de la membrana proporciona recomendaciones acerca de la colocación de la membrana sobre un vertedero. El programa GCC especificará la responsabilidad del contratista o de las plantillas municipales en la colocación, para asegurar que se sigan las recomendaciones del fabricante.



**FIGURA 16.2**

Vista aérea del vertedero completado de Palos Verdes, en el Sur de CA. La parte inferior del vertedero es ahora un jardín botánico. La parte principal del vertedero va a desarrollarse como espacio abierto a cargo del Departamento para Parques y Zonas de Recreo del Condado. En la parte superior del vertedero, que recibió residuos inertes, se ha desarrollado el Howlett Park, un complejo recreativo multifuncional. Hay que destacar el desarrollo residencial y comercial alrededor del vertedero. (Cortesía de County Sanitation Districts del Condado de Los Angeles.)

## Sistemas de control de aguas superficiales y del drenaje

Las características artificiales y naturales del entorno del vertedero controlan el agua superficial y subterránea (ver Figura 16.3). Cuando las características artificiales y naturales están bien integradas, deben ser eficaces para el control de la entrada de aguas superficiales y de la escorrentía, así como para prevenir que las aguas subterráneas penetren el recubrimiento del vertedero. Cuando el vertedero está clausurado, debe diseñarse el sistema de control del drenaje en función de la utilización a largo plazo del lugar. Las aguas procedentes de la lluvia y nieve han de discurrir sobre la superficie de cubrición final sin que se produzca una erosión excesiva o una filtración. El mayor riesgo es el estancamiento de las aguas superficiales en zonas de asentamiento del terreno. En el diseño de las instalaciones para el control del drenaje deben incluirse las siguientes cuestiones: 1) recogida y desviación de las aguas superficiales fuera de la superficie del vertedero, en la menor distancia posible; 2) selección de rutas de canalización y drenaje, que arrastrarán las aguas con velocidades que eviten sedimentación; 3) el uso de pendientes superficiales suficientes como para maximizar la desviación de la escorrentía superficial y a la vez minimizar la erosión superficial, y 4) especificaciones para los materiales según las características del drenaje, que permitan el arreglo y reemplazo cuando se asiente el vertedero (ver Figura 16.3b).

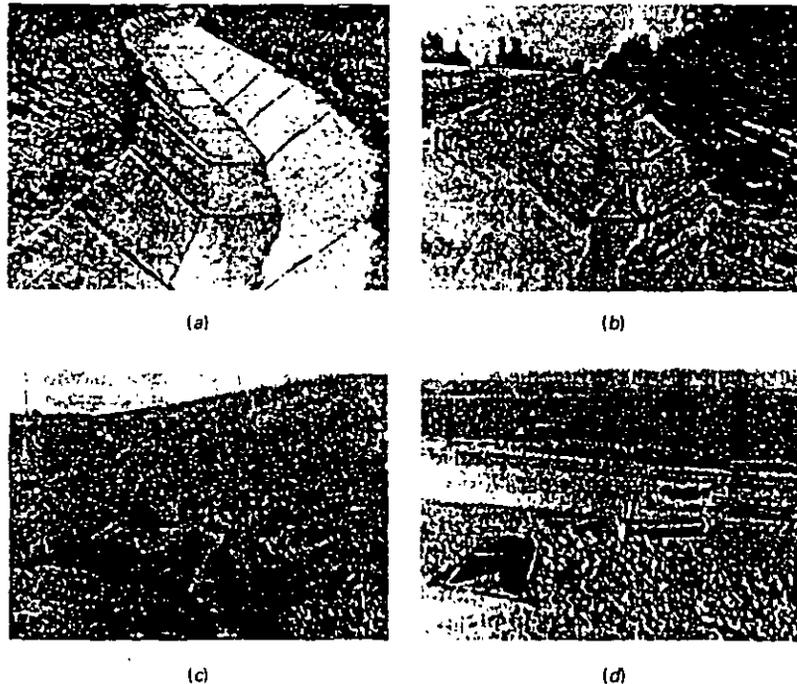


FIGURA 16.3

Ejemplos de instalaciones de drenaje en vertederos llenos: (a) instalaciones permanentes de drenaje para desviar las aguas pluviales fuera del vertedero, el canal de drenaje trapezoidal está construido *in situ* en una operación continua; (b) instalaciones de drenaje construidas en secciones, teniendo en cuenta la consolidación del vertedero; (c) dique, sin recubrimiento, cubierto de hierba natural, y (d) instalaciones de drenaje temporales instaladas para aliviar la inundación superficial del vertedero

## **Control de los gases de vertedero**

Después de clausurar un vertedero, hay que controlar los gases durante todo el tiempo que dure su generación (ver Figura 11.13). Como se describió en el Capítulo 11, los sistemas típicos para controlar el gas de vertedero incluyen: pozos de extracción, tuberías de recogida y transmisión e instalaciones de antorchas y/o incineración (ver Figura 16.4). El sistema utilizado para controlar el gas de vertedero durante la explotación también se usa para controlar los gases después de la clausura del vertedero. Los pasos de diseño más importantes son: la selección de materiales y la colocación de las chimeneas, la selección y colocación de válvulas y de tuberías de recogida en la cobertura final. Los materiales utilizados en la fabricación de las tuberías deben ser flexibles, para soportar los movimientos cuando el terreno se asienta, y suficientemente fuertes como para soportar la carga del paso de vehículos sobre la superficie durante el mantenimiento de la vegetación y de las instalaciones para la extracción y recogida del gas.

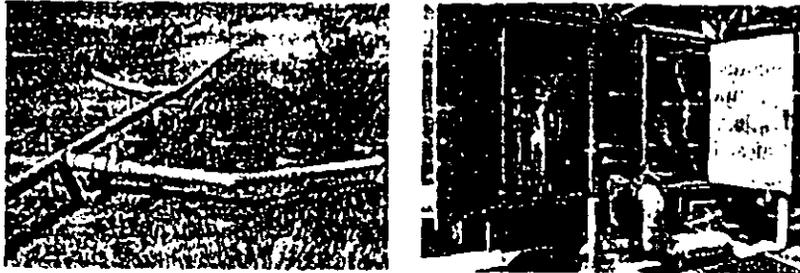
Una consideración importante en la gestión del gas de vertedero es que la cantidad de metano producida después de la clausura del vertedero quizás no será suficiente como para mantener la combustión. Cuando los proyectistas consideren esta posibilidad, debe preverse un suministro de combustible auxiliar para la incineración de los gases de vertedero extraídos, especialmente cuando el control de las emisiones de COV sea una cuestión importante. EPA está considerando la posibilidad de imponer normas para las emisiones del vertedero que no son de metano. Las normas serían similares a aquellas establecidas para las emisiones de incineradoras.

## **Control y tratamiento de lixiviados**

Además de provocar la contaminación de las aguas subterráneas, el lixiviado también puede transportar sustancias orgánicas disueltas que pueden emitirse en el ambiente subsuperficial no saturado, por el cambio en la presión parcial de los constituyentes en fase gaseosa. Para minimizar el movimiento de los lixiviados hacia las aguas subterráneas y la emisión de los constituyentes disueltos, el recubrimiento se debe construir bajo un estricto control de calidad.

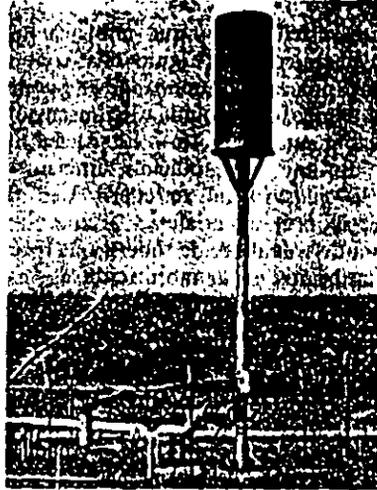
La cantidad del lixiviado que se va a controlar y tratar después de la clausura del vertedero está en función del diseño de la cobertura final, de los tipos de residuos colocados en el vertedero y del clima de la región, especialmente las precipitaciones. Con una cobertura efectiva, disminuirá la cantidad del lixiviado después de la clausura hasta que se recojan solamente los lixiviados generados por la descomposición de los residuos.

Las instalaciones de recogida y tratamiento de lixiviados se diseñan y se construyen cuando el vertedero empieza a explotarse. Después de la clausura, se utilizan las mismas instalaciones. Durante la maduración del vertedero cerrado, normalmente, disminuye la cantidad del lixiviado generado, así como la concentración de DBO<sub>5</sub> y DQO (ver Figura 11.11). Debido a la menor producción de lixiviados y a la reducción de la carga contaminante, la planta de tratamiento puede llegar a tener una baja carga de residuos y desprender olores. En muchos casos la mejor alternativa para el tratamiento es descargar los lixiviados en una planta para el tratamiento de las aguas residuales, donde las grandes cantidades de aguas residuales diluyen las menores cantidades de lixiviados.



(a)

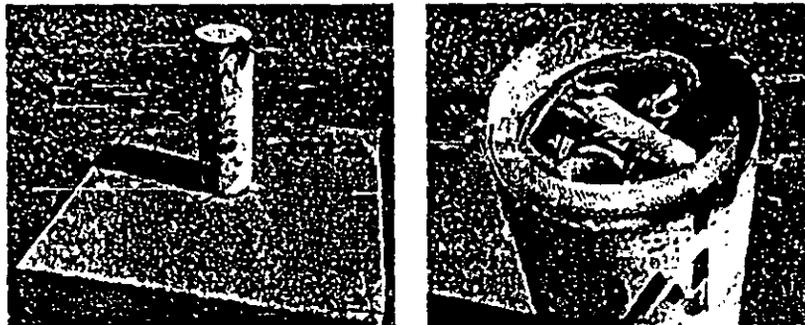
(b)



(c)

**FIGURA 16.4**

Instalaciones para la gestión de gas de vertedero: (a) pozos de extracción y tuberías de gas, (b) instalaciones para la combustión del gas (se muestra una turbina de gas) y (c) instalaciones para quemar el gas (se muestra una antorcha candelabro).



(a)

(b)

**FIGURA 16.5**

Pozo de muestreo de aguas subterráneas: (a) pozo con tapa cerrada y (b) conexión eléctrica y tubo de muestreo almacenado en la parte superior de la caja del pozo.

## Sistemas de supervisión ambiental

La última parte de un plan de clausura implica a las instalaciones de supervisión ambiental. La supervisión ambiental es necesaria para asegurar el mantenimiento de la integridad del vertedero con respecto a la emisión incontrolada de contaminantes al ambiente. En la mayoría de los casos, la selección de las instalaciones y de los procedimientos que van a incluirse en un plan de clausura estará en función de las instalaciones de control ambiental utilizadas durante la explotación del vertedero antes de su clausura (ver Tabla 16.2).

La selección de los métodos y de las instalaciones de supervisión ambiental para los vertederos clausurados tendrá más éxito cuando se realice de acuerdo con las líneas directrices de la entidad regulatoria. Desafortunadamente, muchas agencias estatales regulatorias todavía no han desarrollado líneas directrices sobre la clausura de vertederos; de esta forma, las agencias de gestión de residuos sólidos afrontan la posibilidad de seleccionar instalaciones de supervisión ambiental que pueden ser inaceptables bajo líneas directrices futuras. Con esta incertidumbre, los diseñadores deberían elegir las instalaciones de supervisión que puedan utilizarse para seguir el movimiento de las emisiones del vertedero en los ambientes de agua, aire y suelo.

**Agua.** Se lleva a cabo la supervisión de la calidad del agua para identificar el escape de los lixiviados fuera del vertedero (Figura 16.5). Las instalaciones de supervisión se colocan en los suelos, por debajo del recubrimiento del vertedero y en el acuífero superior de las aguas subterráneas. En climas secos, donde la humedad no penetra en los suelos debajo del vertedero, las instalaciones de supervisión deben ser capaces de operar en la zona aireada. El acuífero de aguas subterráneas se supervisa con pozos. En el Capítulo 11 se presentaron y explicaron los equipamientos y las instalaciones para supervisar la zona aireada y las aguas subterráneas.

**Aire.** Un plan de clausura de vertedero mostrará la forma en que se van a controlar y a evacuar a la atmósfera el metano u otros gases. La supervisión del gas también se utiliza para valorar el grado de actividad biológica del vertedero. El equipamiento típico, utilizado en los vertederos clausurados, para la supervisión del gas incluye: medidores del gas explosivo, medidores del sulfuro de hidrógeno y equipamiento para la recogida de muestras, y recipientes para las muestras que serán analizadas fuera del vertedero.

**Cobertura.** En la mayoría de los planes de clausura de vertederos, el material de cubrición es uno de los aspectos más importantes. Debe colocarse bajo una estricta supervisión de construcción, y mantenido, después, para prevenir la pérdida de suelos. La supervisión ambiental de los suelos incluye la medición de la consolidación superficial del terreno, el deslizamiento del suelo y la erosión de la superficie del terreno. La inspección de vertederos clausurados requiere una formación y un buen juicio para realizar las observaciones visuales y para la utilización de testigos, con la finalidad de controlar los movimientos del terreno.

**TABLA 16.2**  
**Instalaciones de supervisión ambiental instaladas durante la construcción**  
**y explotación del vertedero y utilizadas después de la clausura**

<b>Instalación de supervisión</b>	<b>Función durante la explotación</b>	<b>Función después de la clausura</b>
<b>Pozos de supervisión de aguas subterráneas</b>		
Pendiente arriba	Muestreo de agua en la localización para medir la calidad del agua.	Las mismas funciones que durante la explotación
Pendiente abajo	Muestreo de agua en la localización para detectar el movimiento de contaminantes de lixiviados; si hay contaminantes, parar las operaciones y corregir el problema con un recubrimiento; los pozos funcionan como una variable de control para las operaciones	Muestreo de agua en la localización para detectar cualquier acumulación de lixiviados creada por un recubrimiento con fuga; una localización de referencia de datos para definir la dirección y la velocidad del movimiento de una acumulación
<b>Lisímetros de la zona aireada</b>	Localización de muestreo para detectar líquidos en los suelos por encima del agua subterránea; si hay líquidos, parar operaciones y determinar la causa; corregir los problemas antes de emprender de nuevo la explotación	Localización de muestreo para detectar los líquidos en los suelos por encima del agua subterránea; si hay líquidos, completar investigaciones extras acerca de la causa; corregir cualquier problema de la forma requerida por la agencia reguladora
<b>Chimeneas de gas</b>	Localización de muestreo para gases combustibles	Localización de muestreo para gases combustibles; pozos de extracción de gas para controlar y separar el gas metano después de la clausura
<b>Instalaciones de tratamiento de lixiviados</b>	Medición de la cantidad de lixiviados y punto de muestreo de calidad	Las mismas funciones que durante la explotación
<b>Estanques colectores para aguas pluviales</b>	Retener aguas pluviales para su salida regulada; medir la cantidad y muestreo de calidad	Las mismas funciones que en la explotación

## **16.2 REVEGETACION DE VERTEDEROS CERRADOS**

En muchos lugares, la población se ha incrementado tan rápidamente que las zonas de vertido anteriores, e incluso algunas utilizadas actualmente, tienen en sus alrededores complejos industriales, comerciales y residenciales. Como es deseable tener espacios abiertos en las zonas urbanas, los vertederos cerrados representan una oportunidad única para la recuperación del terreno. Algunos usos para los vertederos cerrados incluyen: parques, zonas de recreo, reservas naturales, jardines botánicos, producción de cosechas e incluso complejos comerciales. Cada uno de estos usos se ha implantado en diferentes regiones del país, pero cada uno presenta un reto singular.

La selección del uso final de un vertedero clausurado depende de las necesidades de la comunidad y de los fondos disponibles para el proyecto de recuperación. Por ejemplo, los parques con pocas atracciones y con un hábitat destinado a la fauna requerirían menos inversiones que campos de golf y zonas de recreo multifuncionales. Todos los usos finales mencionados anteriormente tienen una cosa en común: requieren una revegetación para lograr su potencial. El propósito de esta sección es afrontar los problemas encontrados y exponer las soluciones que se han desarrollado en la búsqueda de una revegetación para los vertederos cerrados.

### **Factores que limitan el crecimiento de la vegetación en los vertederos**

Los factores que limitan el crecimiento de plantas en los vertederos controlados llenos incluyen: la toxicidad para las raíces de los gases generados en el vertedero (por ejemplo,  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$ ), el bajo contenido en oxígeno del suelo, poco espesor de cobertura, la limitada capacidad de intercambio catiónico, pocos nutrientes, la baja capacidad para retener la humedad, la baja humedad del suelo, las altas temperaturas del suelo, su alta compactación, su pobre estructura y la incorrecta selección de especies [5].

**Toxicidad para las raíces.** Los gases principales producidos por la descomposición anaerobia de los residuos en un vertedero clausurado son  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$ . Se ha comprobado que altas concentraciones de  $\text{CO}_2$  son directamente tóxicas para las plantas, aunque el  $\text{CH}_4$  aisladamente no es fitotóxico (tóxico para las plantas) [2]. Su daño proviene de su capacidad para provocar el desplazamiento del oxígeno, produciéndose unas condiciones anaerobias que son perjudiciales para las plantas. Estos dos gases conforman aproximadamente el 95 por 100, en volumen, de los gases del lugar. El sulfuro de hidrógeno, el amoníaco, el hidrógeno, mercaptanos y etileno (entre otros) conforman el 5 por 100 restante. De estos gases, se sabe que el  $\text{H}_2\text{S}$  y el  $\text{C}_2\text{H}_4$  son tóxicos para las plantas, incluso en cantidades muy pequeñas.

A partir de estudios de suelo realizados en los vertederos, se ha establecido que el estado reducido de los suelos saturados con gas de vertedero incrementa la disponibilidad de oligoelementos, posiblemente en niveles lo suficientemente altos como para ser fitotóxicos. Aunque existe ese potencial de toxicidad, no se ha comprobado que niveles excesivos de oligoelementos, tales como cadmio, cobre y cinc, dañen realmente la vegetación cultivada en un vertedero [2, 5].

**Bajo suministro de oxígeno.** Los poros del suelo están ocupados alternativamente por agua y gases atmosféricos. Después de la lluvia, los poros se llenan de agua, desplazando al aire. Cuando la gravedad extrae el agua de los poros más grandes, el aire entra de nuevo. El buen crecimiento de las plantas depende de tener suficientes poros grandes para sujetar el aire y suficientes poros pequeños como para retener la humedad entre lluvias y riegos. Como el suministro de oxígeno para las raíces de las plantas depende de la habilidad del suelo para retener el aire, cualquier proceso que reduzca el espacio poroso es perjudicial para las plantas. La compactación del suelo con maquinaria pesada, además de la pobre estructura de la mayoría de los suelos utilizados en la cobertura, se añade a las dificultades para cultivar plantas.

**Baja capacidad de intercambio catiónico.** La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se relaciona con la habilidad del suelo para absorber y retener nutrientes. La materia orgánica coloidal y las arcillas son las fuentes principales de puntos de intercambio catiónico en el suelo. Los iones positivos (cationes) se adsorben en las zonas superficiales negativamente cargadas de los coloidales del suelo. Los cationes adsorbidos resisten la lixiviación fuera de las zonas de intercambio catiónico, pero pueden ser reemplazados por otros cationes a través de una acción en masa. Los cationes encontrados en grandes cantidades en las zonas de intercambio son: calcio, magnesio, hidrógeno, sodio, potasio y aluminio. La disponibilidad de muchos materiales esenciales depende de la CIC del suelo. Un suelo que tenga un contenido bajo en materia orgánica no será capaz de sostener nutrientes ni de prevenir su lixiviación fuera de la zona de las raíces. Un rango típico para la materia orgánica de los suelos es 2-5 por 100 [9]. La relación generalizada entre la textura del suelo y la CIC se presenta en la Tabla 16.3.

**TABLA 16.3**  
Textura y capacidad de intercambio de cationes del suelo\*

Textura de suelo	Capacidad de intercambio de cationes, meq/100 g suelo seco
Arena	1-5
Margas arenosas finas	5-10
Margas sedimentarias	5-15
Margas arcillosas	15-30
Arcillas	más de 30

\* Adaptado de Referencia 1.

**Bajo estatus de nutrientes.** La fertilidad de un suelo se refiere a los nutrientes disponibles en el suelo, necesarios para el crecimiento de las plantas. Se sabe que existen 16 nutrientes esenciales para las plantas. Estos nutrientes se muestran en la Tabla 16.4, en su forma elemental y en su forma iónica. El hidrógeno, el carbono y el oxígeno proceden del aire y del agua; el nitrógeno procede del aire y del suelo, y el resto procede del suelo [1]. El nitrógeno, el fósforo y el potasio se llaman macronutrientes y se absorben en grandes cantidades a partir del suelo y de fertilizantes añadidos. Los micronutrientes (oligoelementos) se absorben del suelo en pequeñas cantidades; sin embargo, a pesar de las cantidades pequeñas que necesitan las plantas, la falta de estos elementos afectará adversamente a su crecimiento y desarrollo.

El suelo utilizado para la cobertura final de un vertedero normalmente procede de la fuente más fácilmente disponible y más barata. Como consecuencia de estas consideraciones financieras, los suelos a menudo tienen una baja calidad de textura y de contenido nutricional. Leone y Flower [8] descubrieron que los suelos de cobertura de vertederos se encontraban «particularmente bajos en materia orgánica y en fuerza iónica. Por lo general estaban en el extremo bajo de sus respectivos rangos».

Nutrientes de plantas y sus formas comunes en aire, agua y suelo\*

Elemento y símbolo	Ión o molécula
Carbono (C)	CO <sub>2</sub>
Oxígeno (O)	CO <sub>2</sub> , OH <sup>-</sup> , CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
Hidrógeno (H)	H <sub>2</sub> O, H <sup>+</sup>
Nitrógeno (N)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (amoníaco), NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (nitrato)
Calcio (Ca)	Ca <sup>2+</sup>
Potasio (K)	K <sup>+</sup>
Magnesio (Mg)	Mg <sup>2+</sup>
Fósforo (P)	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (fosfatos)
Azufre (S)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (sulfatos)
Cloro (Cl)	Cl <sup>-</sup> (cloruro)
Hierro (Fe)	Fe <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup> (ferroso, férrico) = Fe (II), Fe (III)
Boro (B)	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> BO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (ácido bórico, borato)
Manganeso (Mn)	Mn <sup>2+</sup> = Mn (II)
Cinc (Zn)	Zn <sup>2+</sup> = Zn (II)
Cobre (Cu)	Cu <sup>2+</sup> = Cu (II)
Molibdeno (Mo)	MoO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (molibdato)

\* Adaptado de Referencia 1

**Baja capacidad para retener el agua.** La capacidad de un suelo para retener el agua depende de las propiedades físicas del suelo. La textura del suelo y la compactación son factores importantes en su capacidad para retener el agua. Durante la lluvia o el riego, los poros grandes del suelo se llenan de agua. Cuando esta agua se filtra a través del suelo por la acción de la gravedad, el aire reemplaza al agua en los poros más grandes. El agua se retiene en los poros del suelo más pequeños por la fuerza capilar. Los suelos con una mayor capacidad para retener el agua son aquellos de textura media, que tienen una relación ideal entre poros grandes y poros pequeños. La compactación con maquinaria pesada reduce el tamaño de los poros y evita la entrada y la retención en el suelo de las cantidades de agua adecuadas.

**Baja humedad del suelo.** La baja humedad del suelo y la baja capacidad para la retención del agua son cuestiones que están relacionadas. Los responsables pueden ser dos factores: compactación y discontinuidad del suelo. La compactación es un procedimiento necesario en las técnicas modernas de vertido, pero daña la estructura del suelo al disminuir el espacio poroso. Sin un espacio de poros adecuado, disminuye la capacidad del suelo para retener el agua y se incrementa la escorrentía, provocando la erosión y la aparición de suelos más secos. Por lo general, los suelos similares adyacentes a los vertederos tienen menos escorrentía y mayor capacidad para la entrada de agua. La discontinuidad del suelo proviene de la laminación de los residuos y material de cobertura, y puede impedir la subida del agua a través del suelo como sucedería en un perfil normal de suelo.

**Alta temperatura del suelo.** En algunos vertederos clausurados se han encontrado temperaturas de suelo superiores a 38°C [2]. Aunque estas temperaturas tan extremas no son comunes, conjuntamente con otros problemas relacionados con el suelo, las temperaturas más altas dentro de los vertederos contribuyen al estrés de las plantas.

**Alta compactación del suelo.** Los residuos y las capas de tierra colocadas sobre un vertedero se compactan diariamente con maquinaria pesada, una práctica que tiene muchos efectos deseados desde la perspectiva de la ingeniería. También se compactan las tierras colocadas como parte de la cobertura final del vertedero. Desafortunadamente, esta actividad produce una reducción de la porosidad y de la permeabilidad del suelo. El agua y el aire ya no pueden pasar a través de las capas del suelo y las raíces de las plantas no consiguen el aire y la humedad que necesitan para un crecimiento correcto.

**Estructura del suelo pobre.** La estructura del suelo hace referencia al conjunto de las partículas que constituyen el suelo. Los agentes agregados pueden ser materia orgánica, óxidos de hierro, arcillas carbonosas y sílice [1]. La materia orgánica es el material agregado más eficaz para mejorar la estructura del suelo en el crecimiento de plantas. Los suelos formados por partículas de tamaño más o menos uniforme tienen una capacidad pobre para retener el agua, además de otros problemas que afectan al crecimiento de las plantas. La adición de materia orgánica, como compost, crea un suelo granular muy favorable para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Un porcentaje entre el 2 y el 5 por 100 de materia orgánica es favorable en la mayoría de los suelos.

## Determinación de las condiciones del lugar

Antes de iniciar un programa de plantación se deben determinar las condiciones de suelo existentes. Para ello, se lleva a cabo un estudio de campo y después se hacen ensayos de suelo. Una vez finalizados estos dos pasos, se pueden realizar las mejoras de suelo que sean necesarias.

**Estudio para determinar la condición del suelo.** El primer paso en un estudio de campo es la inspección visual. Si ya existe vegetación, ¿parece enferma? o ¿hay vegetación muerta? Si hay vegetación muerta, ¿hay alguna forma de discernir las zonas de vegetación muerta o muriéndose? Este tipo de inspección visual puede utilizarse para identificar las zonas problemáticas. Además de los ensayos de suelo normales, estas zonas se deberían examinar para determinar la existencia de gases de vertedero. El segundo paso se hace de forma simultánea a la inspección visual. Los gases de vertedero producidos por la descomposición anaerobia tienen olor a putrefacto. Las pequeñas grietas del suelo de cobertura dejan escapar los gases y el olor se nota cuando se pasea por el lugar. Moviendo la superficie del suelo se dejan escapar los gases atrapados y a menudo es una señal previa de la migración del gas fuera del entorno del vertedero. Un método más exacto para la determinación de la existencia de gas es la utilización de un detector y de una sonda de metano portátil. También hay un medidor portátil para el sulfuro de hidrógeno. El tercer paso implica el examen real del suelo. En la Tabla 16.5 se presentan las líneas directrices para la evaluación *in situ* de suelos.

**TABLA 16.5**  
Guía para la evaluación de suelos en campo\*

Característica	Ambiente del suelo	
	Aerobio	Anaerobio
Olor	Agradable	Séptico
Color	Más ligero	Más oscuro
Contenido en humedad	Más bajo	Más alto
Fiabilidad	Buena	Pobre
Temperatura	Más baja	Más alta

\* Adaptado de Referencia 3

**Ensayos de suelos.** Una vez adoptados los pasos preliminares en la determinación de las condiciones del suelo, se necesita una investigación más detallada de sus características. No se debe revegetar ningún vertedero antes de llevar a cabo un análisis de suelo detallado. Se perdería tiempo y dinero si se intentase el cultivo de plantas sin un conocimiento de las condiciones del lugar y de las necesidades de mejoras para el suelo.

Los ensayos de suelo que deberían llevarse a cabo como parte de la evaluación del lugar se resumen en la Tabla 16.6 e incluyen: macronutrientes, micronutrientes, pH, conductividad, densidad en bruto y contenido en materia orgánica. Pueden suministrarse nutrientes a las plantas mediante programas de fertilización especialmente diseñados, basados en los resultados de los ensayos de suelo. Pueden ser necesarias enmiendas de suelo para situar el pH dentro del rango deseado. Algunos oligoelementos llegan a estar disponibles más fácilmente cuando baja el pH y pueden llegar a ser fitotóxicos. Concentraciones altas de cinc, cobre, magnesio, hierro, cadmio y plomo son dañinas para las plantas. Es necesaria una conductividad menor que 2 microhmios, para conservar en el suelo un balance de aguas correcto. Los pesos específicos brutos entre 1.200 y 1.400 kg/m<sup>3</sup> son ideales y la densidad en bruto no debería exceder de 1.700 kg/m<sup>3</sup>. El contenido en materia orgánica debería estar entre el 2 y el 5 por 100 [1].

**TABLA 16.6**  
Los ensayos que deberían hacerse para valorar la idoneidad de suelos para el crecimiento de plantas

Ensayo	Unidades	Elementos
Macronutrientes	mg/g suelo seco	N, P, K, Ca, Mg, S
Micronutrientes	mg/g suelo seco	Cl, Cu, B, Fe, Mn, Mo, Zn
pH	sin unidades	
Conductividad	mohms	
Peso específico bruto	Kg/m <sup>3</sup>	
Contenido en materia orgánica	mg/g suelo seco	
Capacidad de intercambio de cationes (CIC)	meq/100 g suelo seco	

## Mejorando las condiciones del lugar

Una planificación correcta es aquella que logra los mejores resultados posibles en la revegetación del suelo. Idealmente, el uso final de un vertedero debería determinarse mientras el vertedero se encuentra todavía en fase de planificación. Existen diversas estrategias que cuando se implantan consiguen aislar las plantas de los residuos, sobre todo los árboles y arbustos con raíces profundas.

**Separación del gas.** Los sistemas activos de extracción del gas separan del suelo importantes cantidades de gas y, por lo tanto, también de las zonas de raíces de plantas. Si no es posible la extracción activa, deberían instalarse barreras de migración de gas y sistemas de ventilación. En las inmediaciones a las raíces de árboles, son efectivos los siguientes métodos:

1. Montículos de suelo. Un montículo de un metro de altura con o sin una barrera de geomembrana debajo.
2. Cavidades excavadas recubiertas con geomembranas (ver Figura 16.6). La profundidad de la excavación dependerá de las características de las raíces del árbol o del arbusto que va a ser plantado.

**Zonas libres de residuos.** Si se conocen las zonas para el paisajismo futuro, pueden dejarse sin rellenar las zonas donde van a plantarse árboles, para acomodar la plantación de árboles y arbustos con raíces más profundas.

**Separación de residuos en las zonas de plantación de árboles.** Los residuos se pueden separar de las zonas donde se van a plantar árboles. Aunque este método puede ser caro, quizás será la mejor solución para la plantación de «islas» de árboles, donde se plantarán muchos árboles en una zona limitada; de otra forma, cada uno requeriría su propio montículo o barrera contra el gas.

**Segregación de los materiales biodegradables en el vertedero.** La descomposición anaerobia de los putrefactibles genera gases que son tóxicos para las plantas. Localizando los residuos biodegradables y no biodegradables en zonas separadas de los vertederos, se pueden crear zonas relativamente libres de gases tóxicos, donde se pueden cultivar árboles.

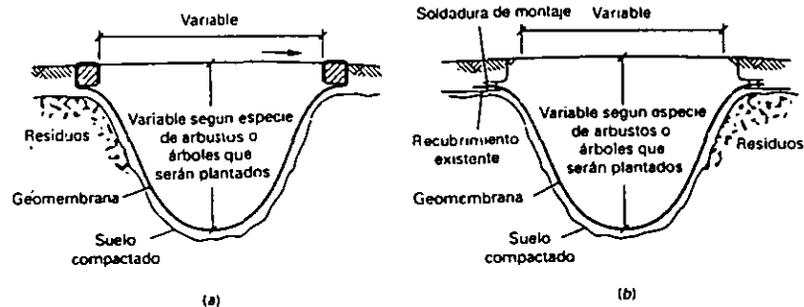


FIGURA 16.6

Métodos utilizados para la plantación de árboles y arbustos en vertederos: (a) vertedero sin recubrimiento de geomembrana en la cobertura final y (b) vertedero con recubrimiento de geomembrana en la cobertura final.

**Almacenamiento de mantillo.** Cuando sea factible, se recomienda la recogida y almacenamiento del mantillo nativo para su utilización posterior como cobertura final del vertedero clausurado. Especialmente cuando el uso final es la restauración del lugar a su condición natural y se usan plantas autóctonas, la disponibilidad de suelo local será de gran ayuda para el éxito de las plantaciones. El uso del suelo almacenado reducirá un factor de estrés para las plantas creciendo bajo las condiciones inherentemente adversas de un vertedero clausurado.

## **Preparación del lugar**

La capa final del suelo debería optimizarse para el cultivo de plantas. Deberían usarse los suelos de cobertura de buena calidad para la capa final, de 60 a 90 centímetros. Se recomiendan los procedimientos siguientes para la preparación del lugar:

1. Deberían mezclarse enmiendas de suelo con el suelo de cobertura antes de esparcirlo. La mezcla previa produce una mezcla más uniforme.
2. El suelo de cobertura debería esparcirse cuando está seco, para evitar una compactación excesiva.
3. Se debería usar un equipo de traslado de tierra que no sea una cargadora de arrastre para aplicar y esparcir la cobertura de suelo, de forma que se minimice la compactación.

## **Uso de mulch en vertederos clausurados**

La aplicación de mulch proporciona una capa superior de material orgánico e inorgánico a las superficies expuestas del suelo. Aquí solamente se argumentan los mulch orgánicos.

**Beneficios de la aplicación de mulch.** Además de los beneficios para el ambiente de crecimiento de las plantas, la aplicación de mulch proporciona una aplicación útil para los residuos de jardín triturados. Como la producción de mulch requiere solamente la trituración como proceso de entrada, proporciona beneficios tanto económicos como ambientales.

**Control de la erosión.** Una capa de 15 cm de residuos de jardín triturados reduce la erosión por el agua y el viento mediante la reducción del impacto de la lluvia sobre la superficie del suelo, reduciendo la escorrentía, y proporcionando una barrera entre el viento y las partículas erosionables del suelo. Cuanto más inclinada sea la pendiente más grueso debería ser el material para que las astillas puedan «enlazarse».

**Adición de nutrientes.** Mientras se descompone la materia orgánica, los nutrientes se devuelven al suelo, reduciendo la necesidad de fertilización durante algún tiempo. La materia orgánica proporciona pequeñas cantidades de todos los nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, que se emiten lentamente cuando se produce la descomposición, permitiendo así la utilización total de estos nutrientes por parte de las plantas.

**Retención de humedad.** Como los suelos utilizados para suelos de cobertura de vertederos clausurados normalmente son pobres, la retención de agua es uno de los beneficios importantes del mulch, particularmente en zonas áridas, como el Oeste de Estados Unidos. El mulch retarda la evaporación desde la superficie del suelo, permitiendo que las plantas utilicen este suministro de agua mucho más tiempo del que sería posible de otra forma.

**Moderación de la temperatura del suelo.** El mulch nivela la temperatura del suelo, creando un medio más favorable para el crecimiento de las raíces. Los efectos beneficiosos de la moderación de temperatura son especialmente notables en zonas con climas extremadamente fríos o calientes.

**Inhibición del crecimiento de plantas no deseadas.** Una capa de 10-15 cm de mulch es bastante eficaz contra la germinación de semillas. Cuando se desea la germinación de semillas, se debería reducir el espesor de la capa de mulch hasta aproximadamente 2,5 cm. Esta capa fina de mulch protegerá las plantas emergentes y aún proporcionará muchos de los beneficios de la capa más profunda.

**Desventajas potenciales de la aplicación de mulch.** A pesar de las múltiples ventajas ofrecidas, hay que introducir algunas observaciones. Las desventajas potenciales incluyen cinco posibilidades: 1) pueden introducirse semillas de plantas no deseadas; 2) pueden introducirse organismos responsables de enfermedades de plantas; 3) hay que reaplicar el mulch anualmente para mantener el espesor deseado hasta que las plantas cubran la superficie del suelo; 4) algunas plantas utilizadas para la producción del mulch pueden generar compuestos alelopáticos (tóxicos) que podrían impedir el crecimiento de plantas, especialmente la germinación de semillas, y 5) la aplicación de mulch debe acompañarse de cambios en los métodos de cultivo, por ejemplo, menos riego para compensar las características de retención de humedad que tiene el mulch.

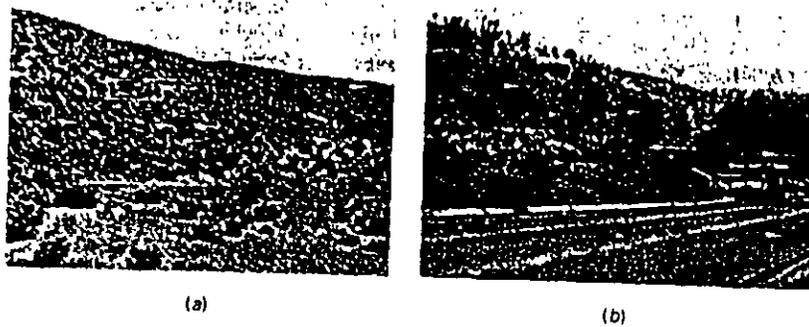
## **Selección de plantas**

Hasta hace poco, los proyectistas apenas pensaban en el resultado final de la revegetación del vertedero y buscaban únicamente la solución más barata, normalmente la plantación de hierbas de monte. Sin embargo, con la mayor importancia adquirida por los vertederos como zonas de recreo o espacios urbanos abiertos, se ha hecho mucho más importante la selección de las plantas apropiadas para la revegetación. La selección de plantas dependerá del uso final elegido para el lugar. Si se desea una restauración al hábitat autóctono, deberían usarse plantas autóctonas. Deberían adaptarse a las condiciones climatológicas locales las especies no autóctonas utilizadas en situaciones específicas de paisajismo, como campos de golf y parques.

**Líneas directrices para la selección de plantaciones.** No se pueden dar criterios generalizados acerca de la correcta selección de plantas para la revegetación de vertederos. Cada región del país tiene condiciones ambientales idóneas para algunas especies y no para otras. Sólo en el Oeste de Estados Unidos se han identificado 24 zonas climatológicas distintas [7]. Por ejemplo, las plantas adaptadas a condiciones desérticas no crecerían bien en zonas lluviosas como en el Sureste de Estados Unidos. Similarmente, plantas de zonas costeras no se adaptarían a un ambiente de alta montaña. Por lo tanto, las plantas de revegetación tienen que adaptarse a la localización del vertedero, especialmente porque los vertederos ya son en sí mismos un ambiente adverso para el crecimiento de plantas. Otra inquietud cuando se restaura una zona a su estado natural es la fuente de semillas y plantas. Para preservar la genética local es deseable recoger las semillas y los recortes en la zona circundante al vertedero, y cultivar bajo contrato las plantas utilizadas para la revegetación.

También pueden usarse plantas no autóctonas para revegetar vertederos clausurados (ver Figura 16.7). Las más idóneas en este caso son las que crecen naturalmente en zonas climatológicamente similares a través del mundo. Por ejemplo, el eucalipto crece bien en California, pero es autóctono de Australia. California y algunas zonas de Australia tienen un clima mediterráneo, y las plantas de estas regiones son intercambiables.

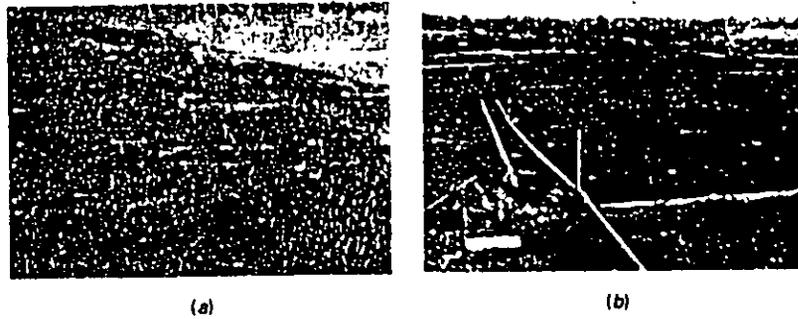
**Especies autóctonas frente a no autóctonas.** La restauración de un vertedero clausurado a su condición natural a menudo es la alternativa deseable. Es la alternativa de revegetación más barata a largo plazo y proporciona espacios abiertos y cinturones verdes en las zonas urbanas. Si el objetivo es la restauración es esencial usar plantas autóctonas. Las plantas autóctonas son aquellas que crecen naturalmente en una región geográfica determinada (ver Figura 16.7). Algunas plantas también pueden ser endémicas en una zona, es decir, sus poblaciones están restringidas en su distribución natural a aquella zona geográfica. Las plantas endémicas incluyen muchas de las plantas en peligro de extinción a lo largo del país. Las plantas autóctonas son las que se adaptan mejor a las condiciones ambientales de los suelos nativos encontrados en una región.



**FIGURA 16.7**  
Ejemplos de vegetación en vertederos completados: (a) especies autóctonas, (b) combinación de especies autóctonas y no autóctonas.

**Factores en la selección de plantas leñosas para la revegetación de vertederos.** Los factores que deberían tenerse en cuenta en la selección de plantas leñosas para la revegetación de vertederos incluyen: la velocidad del crecimiento, el tamaño del árbol, la profundidad de las raíces, la tolerancia a inundaciones, los hongos micorrizoides y la resistencia a enfermedades [4, 6]

1. Los árboles de crecimiento lento parecen adaptarse más fácilmente a las condiciones en un vertedero que los árboles que crecen más rápidamente. Los árboles de crecimiento más lento requieren menos humedad, que por lo general es un factor limitante en los suelos de cobertura de vertederos.
2. Los árboles más pequeños, menos de 1 m de altura, son capaces de desarrollar sus raíces cerca de la superficie, evitando así el contacto con el gas presente en las capas más bajas del suelo. Sin embargo, los árboles con raíces poco profundas requieren un riego más frecuente.
3. Los árboles con raíces naturalmente poco profundas están inherentemente mejor adaptados a las condiciones del vertedero. De nuevo, las raíces poco profundas requieren un riego más frecuente y estos árboles son propensos a caerse con el viento.
4. Se producen cambios similares en el suelo bajo condiciones de inundación con gas de vertedero y con agua, con la excepción del contenido en humedad. Las especies tolerantes a la inundación muestran una mejor adaptabilidad a las condiciones del vertedero que las especies no tolerantes a la inundación, pero su uso requiere un riego adecuado.
5. Los hongos micorrizoides tienen una relación simbiótica con las raíces de las plantas y permiten que las plantas absorban más nutrientes.
6. Las plantas especialmente sensibles a enfermedades específicas o a ataques de insectos no deberían usarse bajo las condiciones de crecimiento marginales de un vertedero clausurado.



**FIGURA 16.8**

Hierbas utilizadas para la revegetación de vertederos clausurados: (a) hierba natural que se ha secado con el calor del verano (observen la rotura del suelo en primer plano) y (b) hierba plantada con sistemas de riego.

**Uso de hierbas para la revegetación de vertederos.** Además de las plantas leñosas, el uso de hierbas puede ser deseable para la revegetación de vertederos (ver Figura 16.8). En este capítulo se ha prestado más atención a las plantas leñosas por sus necesidades especiales bajo las condiciones de un vertedero. Como las otras plantas, las hierbas se verán afectadas por los suelos pobres y los gases de vertedero, pero son más fáciles de cultivar que las plantas leñosas. Siendo autóctonas y no autóctonas, las raíces de las hierbas son fibrosas y poco profundas, lo que les permite sobrevivir más fácilmente en las condiciones del vertedero que las plantas leñosas. Sus ciclos de vida también proporcionan algunas ventajas. Algunas hierbas son anuales, lo que quiere decir que cumplen su ciclo de vida en un año o menos. Por tanto, las hierbas anuales se siembran y crecen durante el tiempo del año más favorable. Por ejemplo, en las regiones áridas del Oeste de Estados Unidos, las hierbas anuales aprovechan la temporada de lluvia. En el Este, las hierbas anuales son fáciles de sembrar. Las hierbas perennes viven más de un año, pero muchas de sus características son similares a las de las hierbas anuales. El sistema de raíces, el ciclo de vida y la rápida reproducción hacen que las hierbas sean más fáciles de cultivar en condiciones adversas.

### **Consideraciones de diseño para la revegetación**

La determinación del uso final de un vertedero debe formar una parte integral del diseño del vertedero. A menos que el vertedero sea utilizado para campos de golf u otros usos intensivos, los diseñadores deben esforzarse por integrar el vertedero clausurado con los alrededores naturales. Esto requiere el cultivo de plantas autóctonas. Hacen falta muchos más estudios en el campo de la adaptabilidad de las plantas a las condiciones del vertedero y sobre las prácticas de horticultura para superar estas condiciones adversas. Se han probado pocas especies y éstas solamente en regiones del país muy seleccionadas. Dada la diversidad en las condiciones ambientales a lo largo de Estados Unidos, deberían iniciarse estudios para definir la adaptabilidad de las plantas autóctonas y las prácticas de horticultura bajo las condiciones de un vertedero.

El buen diseño e implantación de la revegetación de vertederos requiere un equipo multidisciplinar de profesionales, incluyendo: ingenieros, urbanistas, arquitectos de paisajismo, científicos del suelo, botánicos y horticultores. Los objetivos del diseño del uso final incluyen: estabilización de la superficie del vertedero y reducción de la erosión, determinación del uso final específico, restauración estética del entorno, aumento de la fertilidad del suelo, selección de las plantas apropiadas y gestión de la instalación y mantenimiento de las plantaciones. En el Ejemplo 16.1 se ilustran los pasos implicados en la revegetación de vertederos.

---

**Ejemplo 16.1. Preparación de un vertedero para la revegetación.** Imagine que usted está trabajando con un vertedero que va a cerrar en dos años. Localizado en el sur de California, alrededor tiene una comunidad de plantas de tipo chaparral mezclado. La utilización final consiste en restaurar el lugar a su condición antes del vertedero utilizando las plantas que se encuentran en sus alrededores inmediatos. Fijar y dar prioridad a los pasos requeridos para llevar a cabo la revegetación.

**Solución**

1. Coordinación de proyecto.  
Coordinar con ingenieros, proyectistas, arquitectos de paisajismo y otros implicados en la planificación del uso final del lugar.
2. Identificar tipos de vegetación y otras fuentes de plantas.  
Como la restauración es el objetivo para este lugar, preparar una lista de las plantas que se van a usar. Negociar con cultivadores para conseguir las plantas necesarias. Este paso necesita aproximadamente dos años de preparación. Idealmente, como parte del proceso de planificación de la restauración, se habría establecido un programa de ensayos de plantas antes de esta etapa para obtener información sobre las tolerancias de las diversas especies a las condiciones en el vertedero y para estudiar los métodos de cultivo que pueden mejorar la tasa de supervivencia. A continuación se presenta una lista de las plantas encontradas típicamente en una comunidad de tipo chaparral mezclado en el sur de California. Están disponibles listas de plantas similares para todas las zonas de Estados Unidos en las agencias gubernamentales apropiadas y otras.
3. Inspección del lugar.  
Caminar por el lugar y hacer una inspección visual. Fijarse en las formas de crecimiento de la vegetación existente y en cualquier zona sin vegetación. Tomar muestras para el gas de vertedero, especialmente en las zonas sin vegetación o donde haya excesivas plantas muertas. ¿La vegetación natural ha invadido el lugar desde las zonas adyacentes? ¿Qué especies? ¿Cuál en su densidad? ¿Están ausentes algunas especies de una forma patente? Probar el suelo. ¿Hay olores molestos? Llevar a cabo ensayos sencillos de suelo.
4. Caracterización del suelo  
Recoger muestras del suelo de cobertura y del suelo inalterado circundante. Analizar las dos muestras y comparar los resultados. Debería estar implicado en este proceso un experto científico en suelos para asegurar la recogida de un número adecuado de muestras y para interpretar los resultados y proponer soluciones. El objetivo es aproximarse tanto como sea posible a las condiciones del suelo natural circundante.
5. Preparación del lugar.  
Reparar o instalar dispositivos de control ambiental adicionales antes de preparar el suelo para la plantación. Debería hacerse la graduación del terreno necesaria para mejorar el drenaje, particularmente en zonas de consolidación desigual. Deberían llenarse las grietas provocados por la consolidación para prevenir el escape de gas y la entrada de oxígeno y agua en el vertedero.
6. Modificaciones del suelo.  
Implantar las modificaciones del suelo necesarias, incluyendo la adición de nutrientes, indicadas por los ensayos del suelo (referirse a la Tabla 16.6). Añadir materia orgánica para igualar los niveles en el suelo circundante. El rango porcentual típico para la materia orgánica de suelo a lo largo de Estados Unidos va del 2 al 5 por 100. En algunas partes de Estados Unidos donde hay mucha lluvia y bosques densos, los niveles de materia orgánica pueden ir del 10 al 15 por 100. Añadir y mantener una capa de mulch; con el paso del tiempo, aumentará el contenido en materia orgánica del suelo.

7. Plantación.

Plantar en el lugar, utilizando todos los conocimientos y experiencia obtenidos en los pasos anteriores. La plantación debe llevarse a cabo durante la época del año más apropiada. En las zonas del país con inviernos templados ésta puede ser el otoño, o justo antes del comienzo de la temporada de lluvia. En las zonas con inviernos fríos, tales como el norte y el nordeste de Estados Unidos, deberá llevarse a cabo la plantación en la primavera, después de que se caliente el suelo. En algunas situaciones, hará falta un sistema de irrigación para ayudar a las plantas durante el período de establecimiento.

8. Supervisión.

Supervisar las plantas muy de cerca durante los primeros tres años de establecimiento, con controles menos frecuentes durante los años posteriores. La migración de gas puede causar problemas para las plantas mientras se genera por la descomposición de los residuos en el vertedero.

**Comentario.** Listas de plantas como la que se ha presentado en el paso 2 están disponibles en todas las zonas de Estados Unidos en las agencias gubernamentales apropiadas. La revegetación de vertederos es una tarea compleja y costosa que implica a ingenieros y científicos. En los pasos 2, 3, 7 y 8 deberían implicarse botánicos y horticultores, y científicos de suelo en los pasos 3, 4 y 6.

Especies comunes de la comunidad de plantas chaparral mezclado del sur de California

Nombre botánico	Crecimiento
<i>Adenostoma fasciculatum</i>	Arbusto hasta 2,60 m
<i>Arctostaphylos</i> spp.	Plantas pequeñas hasta árbol de 10 m
<i>Ceanothus</i> spp	Plantas pequeñas hasta árbol de 6 m
<i>Cercocarpus betuloides</i>	Arbusto hasta 4 m
<i>Eriodictyon</i> spp.	Arbusto hasta 1,3 m
<i>Garrya</i> spp	Arbusto hasta 3 m
<i>Heteromeles arbutifolia</i>	Arbusto-árbol hasta 8 m
<i>Pickeringia montana</i>	Arbusto hasta 2 m
<i>Prunus ilicifolia</i>	Arbusto-árbol hasta 10 m
<i>Quercus dumosa</i>	Arbusto-árbol altura varia
<i>Quercus wislizenii</i> var. <i>frutescens</i>	Arbusto hasta 3 m
<i>Rhamus californica</i>	Arbusto hasta 4 m
<i>Rhamnus crocea</i>	Arbusto hasta 3 m
<i>Rhus ovata</i>	Arbusto hasta 4 m
<i>Ribes</i> spp.	Arbusto hasta 2,60 m
<i>Toxicodendron diversilobum</i>	Enredadera hasta arbusto de 2 m

### 16.3 MANTENIMIENTO POSTCLAUSURA A LARGO PLAZO

Las instalaciones en un vertedero clausurado deben mantenerse durante el período de tiempo que el vertedero esté generando productos de descomposición. Como los residuos colocados en el vertedero se descomponen a velocidades distintas, según el diseño del vertedero, pueden darse variaciones extremas sobre el período de tiempo durante el cual sería necesario el mantenimiento de un vertedero clausurado (ver Figura 11.13). Por esta razón, las normativas federales y estatales han establecido períodos de tiempo mínimos para el mantenimiento a largo plazo de los vertederos clausurados. En la mayoría de las normativas este período de mantenimiento es de 20 a 30 años.

En el momento de la clausura del entorno, o en otro momento especificado por las normativas locales, se desarrollará un plan de mantenimiento postclausura. El mantenimiento postclausura a largo plazo implica una serie de actividades continuas, empezando en el vertedero con la supervisión de los controles ambientales y terminando con informes escritos. En la Tabla 16.7 se identifican algunos elementos de un plan postclausura. Las cuestiones clave que hay que afrontar en un plan de clausura son las siguientes:

- Inspecciones rutinarias.
- Mantenimiento de la infraestructura.
  - Gradación y paisajismo.
  - Sistemas de control del drenaje.
  - Sistemas de gestión del gas.
  - Recogida y tratamiento de lixiviados.
- Sistemas de supervisión ambiental

El desarrollo y el uso de planes de clausura y planes de mantenimiento postclausura a largo plazo son actividades recientes para las agencias de gestión de residuos. Estas agencias deben reconocer que estos planes serán comprobados con el paso del tiempo, cuando se usen los vertederos clausurados como bienes de la comunidad, evitando así conflictos sobre el uso del terreno e incertidumbres acerca de problemas ambientales en el futuro. En todas las situaciones futuras, será importante gestionar el lugar como un vertedero clausurado. A continuación se argumenta el marco legal para el mantenimiento postclausura a largo plazo, incluyendo el establecimiento de la financiación durante los 30 años de mantenimiento.

**TABLA 16.7**  
Elementos típicos de un plan postclausura de vertedero

Elemento	Actividad típica
Utilización del terreno postclausura	Designación y adopción
Horario de inspecciones rutinarias	Ver Tabla 16.8.
Mantenimiento de infraestructura	Preparación de una descripción de los programas para la cubrición final, cubrición de vegetación, pendiente final, sistemas de drenaje, sistemas de recogida y tratamiento de lixiviados, sistemas de supervisión y control de gas, sistema de supervisión de agua subterránea
Sistemas de supervisión ambiental	Fijación de tareas y horarios específicos
Operación del sistema	Descripción de los sistemas utilizados, frecuencia de operación y agencia responsable
Información	Identificación de los informes requeridos, el horario y el formato
Cambios de instalaciones	Preparación de descripciones de los sistemas actuales de supervisión, recogida y tratamiento
Plan de emergencias	Preparación y entrega

## Inspecciones rutinarias

Se llevan a cabo inspecciones rutinarias para caracterizar las condiciones de las instalaciones de clausura del vertedero. El personal de la agencia de gestión de residuos sólidos puede ser el responsable de llevar a cabo la inspección, aunque un vertedero clausurado puede ser utilizado y el terreno gestionado por un departamento diferente dentro de la comunidad. La agencia responsable y sus obligaciones acerca de las inspecciones serán identificadas y establecidas en el plan de mantenimiento postclausura. En la Tabla 16.8 se presenta una lista de los asuntos que hay que inspeccionar, la frecuencia sugerida para la inspección y los problemas típicos que puedan surgir. La frecuencia de inspección sugerida es la normal, y pueden esperarse variaciones basadas en condiciones climatológicas locales.

**TABLA 16.8**  
Puntos de inspección, frecuencia de inspección y problemas potenciales que hay que observar en un vertedero clausurado

Punto de inspección	Frecuencia de la inspección	Problemas potenciales que hay que observar
Cubrición final	Una vez al año, y después de lluvias sustanciales	Erosión que expone al recubrimiento sintético; derrumbamientos de terreno
Cubrición de vegetación	Cuatro veces al año	Plantas muertas
Pendientes finales	Dos veces al año	Estancamiento de agua
Drenaje superficial	Cuatro veces al año y después de cada lluvia sustancial	Basuras en los drenes; tubería de dren rota
Supervisión de gas	Continua como exigencia por el plan de mantenimiento y gestión postclausura	Olores; el equipamiento de compresor y antorcha inoperable; lecturas de gas altas en las sondas de supervisión; tubería rota en los pozos de gas
Supervisión de aguas subterráneas	Como exigencia por el equipamiento y el plan de mantenimiento y gestión postclausura	Pozos dañados; muestreo inoperable
Gestión de lixiviados	Como exigencia por el plan de mantenimiento y gestión postclausura	Bombas de lixiviados inoperables, bloques en la tubería de recogida de lixiviados.

## **Mantenimiento de la infraestructura**

La infraestructura de los vertederos incluye: restauración y paisajismo, sistemas de control del drenaje, sistemas para gestionar el gas y sistemas para controlar la lixiviación. Esta estructura debe mantenerse sistemáticamente mediante un horario planificado de mantenimiento preventivo para proteger la integridad de la cobertura y prevenir la contaminación del aire, del agua y del ambiente del suelo alrededor del vertedero.

**Restauración y paisajismo.** En un vertedero clausurado se producirá un asentamiento importante, que afectará a las superficies del terreno y a las plantas utilizadas en el paisajismo (ver Sección 11.17). El gestor responsable del lugar debe disponer del equipamiento y los fondos necesarios para mantener las pendientes y las plantas requedadas. Cada vertedero clausurado tendrá un equipamiento específico y fondos basados en el tamaño y la pendiente del terreno que hay que mantener y en el tipo de vegetación.

Cuando se corrige un asentamiento de terreno en la parte superior de un vertedero clausurado, debe prestarse atención especial a la capa superior del vertedero. En las Figuras 16.9, 16.10 y 16.11 se ilustra el arreglo de una capa superior de vertedero que incluye un recubrimiento con geomembrana. El procedimiento del arreglo es complicado porque la geomembrana debe restaurarse a su condición original a prueba de fugas después del arreglo. Se puede elegir cualquiera de los métodos de reparación mostrados para un lugar clausurado con una geomembrana en la capa superior. La decisión del método de reparación se basa en los fondos disponibles y en la habilidad de la plantilla de arreglo.

**Sistemas de gestión del gas.** La gestión del gas será necesaria en los vertederos clausurados mientras se siga generando. Se instalan los sistemas para gestionar el gas durante la explotación del vertedero antes de su clausura. (En el Capítulo 11 se identificaron los tipos de sistemas para gestionar el gas.) Los pozos de extracción y las tuberías instaladas en los residuos o en la cobertura final sobre los residuos necesitan una alta frecuencia de mantenimiento por el asentamiento de los residuos. El asentamiento de los residuos dislocará las tuberías y los pozos, y una dislocación importante podría producir roturas de las tuberías y de las cajas de los pozos. Si la rotura está cerca de la superficie, se pierde el vacío en el sistema de extracción y el sistema es ineficaz o no funcional.

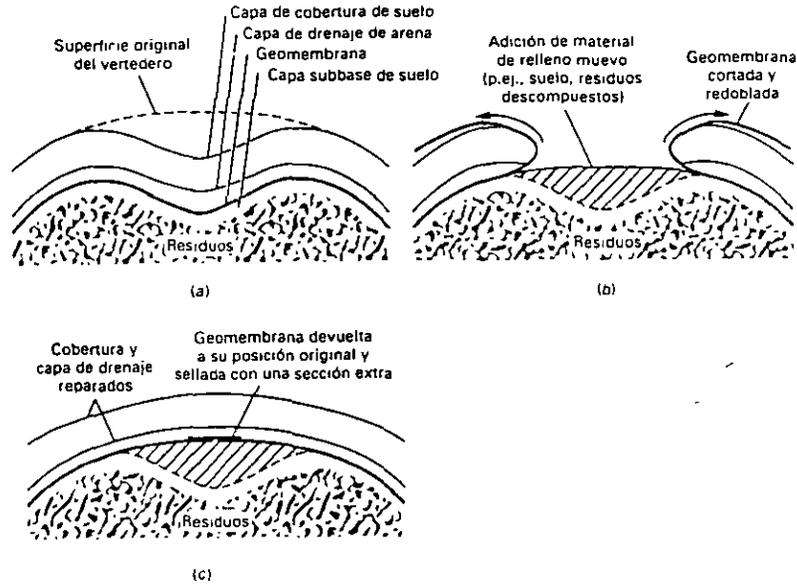
La gestión del gas en un vertedero clausurado se completa cuando se destruyen los gases extraídos y se descargan a la atmósfera. Se puede llevar a

cabo la destrucción del gas en una antorcha, que no recupera la energía, o en un sistema para la recuperación de energía. La unidad de destrucción del gas es una pieza sensible del equipamiento, que requiere un mantenimiento por técnicos formados y con experiencia. El equipamiento se debe probar periódicamente, para asegurar que cumple las normalizaciones para las emisiones aéreas, y su operación es objeto de una revisión anual por las agencias regulatorias.

**Recogida y tratamiento de lixiviados.** Los vertederos clausurados con sistemas instalados para la recogida de los lixiviados deben recoger, separar y tratar el lixiviado mientras se produzca a lo largo del período postclausura. El sistema de gestión de lixiviados funcionará tanto tiempo como sea necesario para cumplir las normativas en vigor aplicables para la descarga de agua del vertedero clausurado. El mantenimiento de las instalaciones de recogida y tratamiento de lixiviados requiere operarios del sistema preparados para manejar cantidades variables de aguas residuales que cambian en su composición.

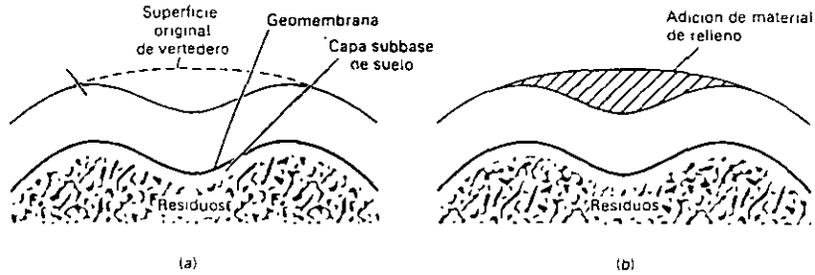
## **Sistemas de supervisión ambiental**

Los sistemas de supervisión ambiental que serán mantenidos durante el período postclausura son los sistemas designados en el plan postclausura y aprobados por la agencia regulatoria. Aunque cada vertedero clausurado tendrá requisitos específicos de supervisión, los sistemas típicos mantenidos incluirán sondas en la zona no aireada, pozos de agua y tapas de pozos, sondas de gas y testigos de asentamientos.



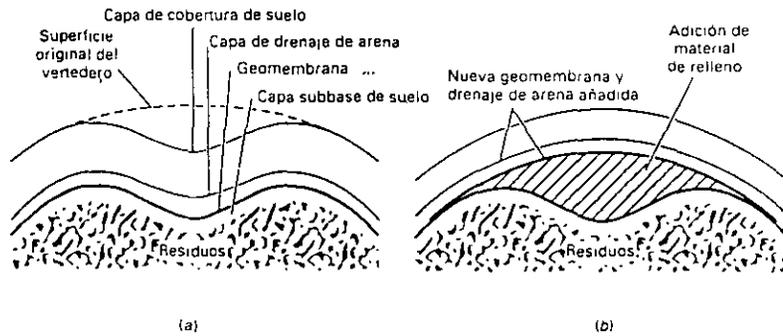
**FIGURA 16.9**

Representación esquemática de un arreglo realizado para restaurar el drenaje sobre una cobertura de vertedero empleando una geomembrana: (a) vertedero después de la clausura y del asentamiento, (b) procedimiento de arreglo del vertedero y (c) vertedero después de la reparación para restaurar el drenaje superficial.



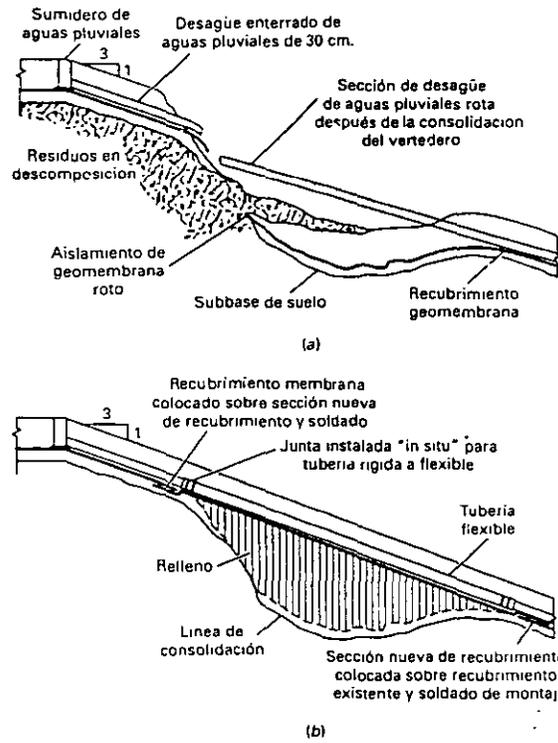
**FIGURA 16.10**

Representación esquemática de una reparación realizada para restaurar el drenaje sobre una cobertura de vertedero empleando una cobertura espesa de suelo y una geomembrana: (a) vertedero después de la clausura y asentamiento y (b) vertedero después de la reparación para restaurar el drenaje superficial.



**FIGURA 16.11**

Representación esquemática del reemplazamiento de la cobertura del vertedero después del asentamiento implicando la restauración de la superficie del vertedero y la instalación de una nueva geomembrana, capa de drenaje y cobertura de suelo: (a) vertedero después de la clausura y asentamiento y (b) nueva cobertura de vertedero instalada después del asentamiento.



**FIGURA 16.12**

Representación esquemática del arreglo de una tubería de drenaje rota después del asentamiento del vertedero: (a) tubería de drenaje dañada y (b) arreglo de la sección rota de la tubería de drenaje.

## **16.4 MARCO LEGAL**

---

Las leyes delimitan las responsabilidades para los residuos colocados en un vertedero. Actualmente, se están probando estas leyes en los tribunales sobre una base de caso por caso, y hasta ahora no existen líneas directrices para determinar los impactos sobre las agencias de gestión de residuos sólidos. Dentro del marco legal se pueden destacar: las cuestiones legales, la responsabilidad durante el mantenimiento postclausura y la financiación del mantenimiento postclausura.

### **Cuestiones legales**

La agencia de gestión de residuos sólidos o el operador de vertederos privados están afectadas por las leyes sobre clausura de vertederos en estas áreas: responsabilidades como propietarios del lugar y responsabilidades para los residuos del lugar. Cuando el vertedero es propiedad de la agencia pública y de los residentes, la agencia tiene una doble responsabilidad acerca de las dos áreas. Cuando la propiedad de un vertedero es independiente de los generadores de los residuos que han entregado los residuos a un vertedero, la responsabilidad está repartida.

**Responsabilidades del propietario del lugar.** Cuando se cierra un vertedero, la ley requiere que el propietario tenga un plan de mantenimiento postclausura, y una forma de financiación para el mantenimiento y la supervisión postclausura. A nivel del gobierno federal, el marco legal se define en la RCRA Subtítulo D. Además de las leyes federales, muchos estados han aprobado leyes que rigen la clausura de vertederos y las garantías financieras. Las leyes requieren que el propietario del lugar cierre y mantenga el lugar conforme con un plan de clausura aprobado. Ese plan de clausura tendrá un plan de garantías financieras para proporcionar fondos suficientes para llevar a cabo las actividades postclausura durante un período de tiempo estipulado, normalmente el período de tiempo completo para el mantenimiento postclausura.

**Responsabilidades para los residuos del vertedero.** La ley federal ha definido las responsabilidades para los impactos de los residuos de un vertedero cerrado, que recaen sobre el generador de los residuos. Para los grandes generadores de residuos, tales como establecimientos comerciales e industrias, la asignación de la responsabilidad está clara. Sin embargo, los residuos de generadores domésticos no pueden asignarse a casas individuales, porque se mezclan los residuos de muchas casas en un solo camión de recogida. Los residuos domésticos son responsabilidad de la jurisdicción gubernamental del lugar donde se generan los residuos. El gestor de residuos sólidos tiene que afrontar cada vez más cuestiones legales mientras disminuyan el número de vertederos en el futuro, y muchos generadores están entregando los residuos a vertederos regionales de uso común. En cada comunidad, el gestor de los residuos sólidos está evaluando los costes actuales de localización y construcción de vertederos dentro de la comunidad o los costes futuros, si hay un problema en un vertedero regional y la comunidad tiene que pagar costes de responsabilidades en los tribunales. Estas cuestiones todavía no son casos en los tribunales y no es posible proporcionar consejos sobre las alternativas con menos riesgos para una comunidad.

## **Responsabilidad de mantenimiento postclausura**

Las leyes acerca del mantenimiento postclausura son menos claras, al mismo tiempo que se venden y se revenden los vertederos clausurados. El comprador del terreno no tiene interés en la propiedad como ex vertedero que requiere un mantenimiento para preservar los controles ambientales. En la mayoría de los casos, el comprador se interesa en las mejoras del terreno para subir su valor. Los vertederos cerrados son unas propiedades atractivas cuando tienen en sus alrededores zonas urbanas. La responsabilidad del mantenimiento postclausura debe transferirse con las escrituras del terreno cuando se venden los vertederos clausurados. El gestor de residuos sólidos debe preparar una declaración clara sobre las responsabilidades del mantenimiento postclausura que acompañan al vertedero clausurado, y registrar la declaración en el registro de propiedades.

## **Financiación del mantenimiento postclausura**

La ley ha insistido en las garantías financieras para el mantenimiento postclausura de forma que existan suficientes fondos para pagar el mantenimiento en el futuro. La base del fondo es el presupuesto del coste de mantenimiento postclausura. Se han desarrollado varios métodos distintos para establecer y mantener las garantías financieras para el vertedero clausurado, incluyendo bonos, fondos de amortización, fondos de empresa, e ingresos o propiedades como garantías del propietario del lugar. A pesar del método utilizado, las garantías tienen que ser irrevocables. Cuando se va a acumular el fondo de amortización con las tarifas de evacuación cobradas en el vertedero durante su explotación, el operador debe establecer tarifas que acrecentarán el fondo total dentro de la vida operativa del vertedero. Como las garantías financieras son nuevas en las normativas federales de 1992, habrá un período de prueba con métodos distintos a los mencionados aquí. El gestor de residuos sólidos debería supervisar las normativas y seleccionar los métodos más apropiados para la comunidad.

## 16.5 TEMAS DE DEBATE Y PROBLEMAS

- 16.1. Localice uno o más vertederos llenos en su comunidad o región e identifique los tipos de instalaciones para controlar la escorrentía superficial del vertedero y desviar las aguas pluviales del terreno circundante al vertedero. Basándose en sus observaciones, argumente la eficacia de las instalaciones en cumplir su objetivo de desviar las aguas pluviales fuera del vertedero. ¿Se mantienen correctamente?
- 16.2. Localice uno o más vertederos llenos en su comunidad o región e identifique qué tipo de cobertura final de vertedero se utilizaba. Basándose en sus observaciones, argumente la eficacia de la cobertura final para limitar la emisión incontrolada de los gases de vertedero.
- 16.3. Localice uno o más vertederos llenos en su comunidad o región e identifique los tipos de instalaciones para controlar los gases de vertedero. ¿Se mantienen correctamente las instalaciones?
- 16.4. Localice uno o más vertederos llenos en su comunidad o región e identifique los tipos de instalaciones para controlar y capturar lixiviados.
- 16.5. Localice uno o más vertederos llenos en su comunidad o región e identifique los tipos de instalaciones utilizadas para supervisar la calidad de las aguas subterráneas.
- 16.6. Localice uno o más vertederos llenos dentro de su comunidad o región e identifique los tipos de plantas que se han utilizado para la revegetación del vertedero. Clasifique las plantaciones por especies autóctonas o no autóctonas.
- 16.7. Localice uno o más vertederos llenos en su comunidad o región. Prepare una lista con las plantas autóctonas que se podrían utilizar para la revegetación de un vertedero.
- 16.8. En muchos diseños de vertedero, la agencia reguladora requiere que la cobertura final tenga una permeabilidad menor o igual que la permeabilidad del recubrimiento del vertedero. ¿Está usted de acuerdo con este requisito? Si está de acuerdo, ¿cuáles son las implicaciones para el mantenimiento a largo plazo del lugar?
- 16.9. Con referencia a la Figura 16.12 Suponga que se ha producido el asentamiento durante cinco años y el contratista ya no está trabajando en el lugar. Usted ha sido elegido para arreglar todos los asentamientos superficiales e informar de las actividades de arreglo a la agencia reguladora. Como ingeniero municipal, describa la secuencia de construcción que utilizaría para los arreglos. Sus posibilidades son utilizar operarios municipales o un contratista. Si elige utilizar sus propios operarios, ¿cómo proporcionaría las garantías de calidad de construcción?
- 16.10. EPA (Estados Unidos) y muchas agencias estatales requieren garantías financieras para el mantenimiento a largo plazo de los vertederos. ¿Qué métodos de garantía financiera utilizaría usted? ¿Por qué?

## 16.6 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. DONAHUE, R. L.; MILLER, R. W., y SCHICKLUNA, J. C. *Soils: An Introduction to Soils and Plant Growth*, 5ª ed., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1983
2. FLOWER, F. B.; GILMAN, E. F., y LEONE, I. A. «Landfill gas, what it does to trees and how its injurious effects may be prevented», *Journal of Arboriculture*, vol. 7, núm. 2, febrero 1981.
3. FLOWER, F. B., y LEONE, I. A. «Damage to vegetation by landfill gases», *The Shade Tree*, vol. 50, núms. 6 y 7, junio y julio 1977.
4. GILMAN, E. F., FLOWER, F. B., y LEONE, I. A. «Standardized procedures for planting vegetation on completed sanitary landfills», *Waste Management and Research*, vol. 3, pp. 65-80, 1985
5. GILMAN, E. F., LEONE, I. A., y FLOWER, F. B. «Factors affecting tree growth on resource recovery residual landfills», *Proceedings of the 1980 National Waste Processing Conference* The American Society of Mechanical Engineers, Nueva York, 1980
6. GILMAN, E. F., LEONE, I. A., y FLOWER, F. B. «Influence of soil gas contamination on tree root growth», *Plant and Soil*, vol. 65, pp. 3-10, 1982
7. HOGAN, E. L., et al. (eds.) *Sunset Western Garden Book*, 5ª ed., Lane Publishing, Menlo Park, CA, 1988
8. LEONE, I. A., y FLOWER, F. B. «Soil characteristics of landfill cover soils in nine U. S. climatological regions», presentado en el International Symposium on Remote Sensing of the Environment, Third Thematic Conference, Remote Sensing for Exploration Geology, Colorado Springs, CO, 16-17 de abril de 1984.
9. LYON, T. L., y BUCKMAN, H. O. *The Nature and Properties of Soils*, 4ª ed., revisada por H. O. Buckman, Macmillan, Nueva York, 1949.
10. U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Remedial Action at Waste Disposal Sites*, edición revisada, EPA Technology Transfer Publication, EPA/625/6-85/006, octubre 1985