



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

42  
2eje.  
3030  
AGOSTO 1973  
ATA  
30  
BLAN

-----  
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
" A R A G O N "

**DISEÑO, CONSTRUCCION Y OPERACION DE UN  
RELLENO SANITARIO**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO CIVIL  
P R E S E N T A :  
ROBERTO RAMON ALVARADO

MEXICO, D. F.

1994

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
ARAGÓN  
DIRECCION

ROBERTO RAMON ALVARADO  
P R E S E N T E .

En contestación a su solicitud de fecha 20 de agosto del año en curso, relativa a la autorización que se le debe conceder para que el señor profesor Ing. JOSE LUIS RODRIGUEZ TORRES pueda dirigirle su trabajo de Tesis denominado "DISEÑO, CONSTRUCCION Y OPERACION DE UN RELLENO SANITARIO", con fundamento en el punto 6 y siguientes del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración:

ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
San Juan de Aragón, Edo. de Méx., Sept. 17 de 1993.  
EL DIRECTOR

*Claudio C. Merrifield Castro*  
M en A CLAUDIO C. MERRIFIELD CASTRO



c c p Lic. Alberto Ibarra Rosas, Jefe de la  
Unidad Académica  
c c p Ing. José Paulo Mejorada Mota, Jefe de  
Carrera de Ingeniería Civil  
c c p Ing. José Luis Rodríguez Torres, Asesor  
de Tesis

CCMC/AIR/JJ'

*Cy*  
*Chud*

Con todo mi afecto y agradecimiento:

A la memoria de mi Padre; por lo que somos y por el legado moral que nos ha de  
jado.

A mi Madre; por su amor y atención sin medida.

A mis hermanos, con el deseo sincero de que también alcancen las metas que se-  
hayan propuesto.

A mis familiares; por su apoyo y cariño.

A mis amigos; por permitirme contar con su confianza y aprecio.

A mis maestros; Por la orientación y formación que me brindaron.

Y a todas las personas que ocupan un lugar en mi vida, también partícipes en mi-  
motivación; dedico lo que representa la conclusión de una de las etapas de mi-  
formación académica.

Roberto Ramón Alvarado.

## INDICE

	Página
INTRODUCCION .....	1
CAPITULO I. CONCEPTOS GENERALES .....	5
1.1. Relleno sanitario .....	6
1.2. Métodos de confinamiento de los rellenos sanitarios .....	9
1.3. Factores bioquímicos y físicos que actúan dentro de un relleno sanitario .....	14
1.4. Factores que determinan la elección del sitio para la disposición final de los desechos sólidos municipales en rellenos sanitarios .....	24
CAPITULO II. NORMATIVIDAD EN LA DISPOSICION FINAL DE LOS DESECHOS SOLIDOS .....	30
2.1. Generalidades de los desechos o residuos .....	31
2.2. Regulación en la disposición de los desechos sólidos municipales en rellenos sa nitarios .....	39
2.3. Impacto Ambiental .....	43
2.4. Matriz de Impacto Ambiental .....	47
CAPITULO III. VARIABLES BASICAS PARA EL DISEÑO .....	58
3.1. Generación de desechos sólidos municipales .....	59
3.2. Cálculo de la vida útil de un relleno sanitario .....	68
3.3. Estimación de la producción de los lixiviados .....	73
3.4. Cálculo de la producción de biogas .....	82
3.5. Determinación de los parámetros que definen el comportamiento del suelo y de la estructura de las celdas de confinamiento .....	84
CAPITULO IV. DISEÑO DE UN RELLENO SANITARIO .....	104
4.1. Aspectos generales del área de Bordo Poniente .....	105
4.2. Diseño de celdas y del frente de trabajo .....	109
4.3. Revisión de asentamientos .....	112
4.4. Diseño de los sistemas de captación de lixiviado y biogas .....	123
CAPITULO V. CONSTRUCCION Y OPERACION .....	137
5.1. Construcción .....	138
5.2. Operación .....	153
5.3. Costos .....	176

CAPITULO VI. DESTINO FINAL DE UN RELLENO SANITARIO .....	181
6.1. Uso o destino final de un relleno sanitario; generalidades .....	182
CONCLUSIONES .....	189
BIBLIOGRAFIA .....	193
HEMEROGRAFIA .....	196

## INTRODUCCION

Actualmente los problemas para la disposición final de los desechos sólidos generados en las ciudades de gran concentración de población, como las que registran la Cd. de México, Jalisco, Veracruz y Edo. de México, entre las más pobladas<sup>1</sup>, llegan a ser cada vez más serios. En el Distrito Federal, por ejemplo, su población (casi 10 millones de habitantes)<sup>2</sup> generan diariamente 12,000 toneladas de basura<sup>3</sup>. La magnitud de esta generación ha saturado la mayoría de los sitios destinados al confinamiento de desechos, los cuales recientemente fueron habilitados para funcionar como rellenos sanitarios. Hoy en día, solo se pueden contar con el relleno sanitario de Bordo Poniente localizando en la zona del lago de Texcoco, ya que los rellenos de Santa Catarina y Prados de la Montaña están proxinamente por cerrarse (ver fig. I-1).

Para la disposición final de desechos sólidos existen diferentes alternativas pero sin lugar a dudas, la más accesible es el relleno sanitario. Un relleno sanitario es una área de terreno controlado, donde los desechos son depositados, esparcidos y compactados, en donde al final de la jornada de estas actividades, los desechos son cubiertos con material de suelo apropiado (material de cubierta).

Como toda obra de ingeniería, y dada la importancia de su función como obra sanitaria, se deben considerar y cumplir con especificaciones y normas establecidas por los organismos correspondientes al rubro sanitario, ecológico y ambiental, los cuales normatizan los criterios para la proyección de un relleno sanitario en todas sus facetas (elección del sitio, diseño, construcción y operación).

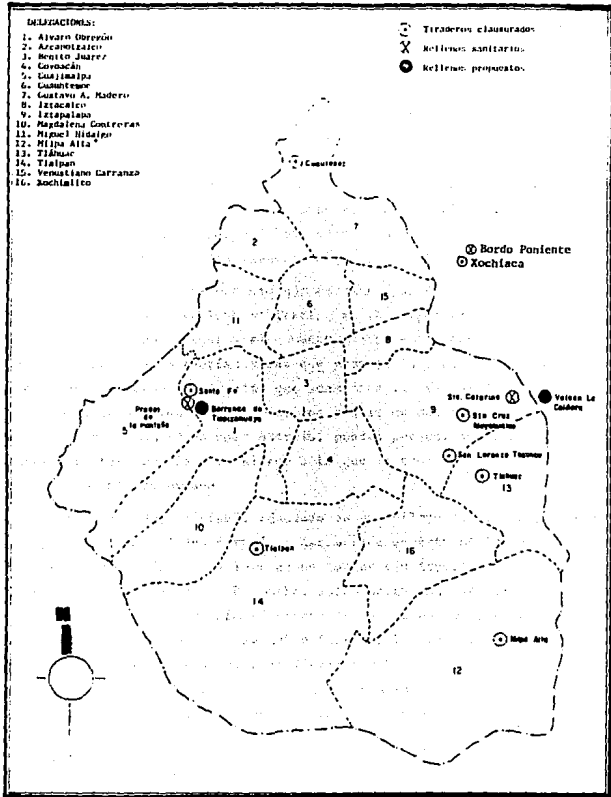
El objetivo principal de este trabajo es proporcionar los fundamentos y criterios necesarios para llevar a cabo el diseño, la construcción y la operación de estos sitios de disposición final, de tal forma que se consideren para este tipo de proyectos los aspectos de ingeniería, las demandas de volumen de acuerdo a la generación actual y a las proyecciones a futuro de la misma; y las disposiciones normativas en materia ecológica y ambiental. Estas normas han

<sup>1</sup> I.N.E.G.I., 1992.

<sup>2</sup> Loc.cit.

<sup>3</sup> D.D.F., D.G.S.U., Dirección Técnica de Desechos Sólidos, 1990.

FIGURA I-1.



Ubicación de los antiguos tiraderos a cielo abierto (ya cerrados), los rellenos sanitarios en operación y los rellenos sanitarios propuestos para futuro confinamiento de desechos.



dado, de acuerdo a las características y al tipo de desechos, una clasificación y una respectiva alternativa para el manejo, el tratamiento y la disposición de los mismos.

Por lo arriba mencionado, y considerando que existe una explotación indiscriminada de los mantos acuíferos para satisfacer la elevada demanda de agua potable, se debe asegurar que los rellenos sanitarios no presenten fugas de lixiviados que ocasionen la contaminación de los depósitos subterráneos y de las corrientes superficiales. Cuando el terreno destinado a el confinamiento de desechos tiene propiedades impermeables desfavorables, las normas a las que hemos estado haciendo referencia especifican que se debe integrar un sistema impermeable que reduzca los riesgos de contaminación del sitio.

Otro punto digno de estudio que se debe considerar para tener un adecuado funcionamiento de un relleno sanitario, es el comportamiento del suelo utilizado como soporte del mismo; y el comportamiento estructural de las celdas de confinamiento. De la teoría, y más que nada de la experiencia, se tiene conocimiento de los daños y molestias que ocasionan las fallas de talud y los asentamientos diferenciales del terreno, los cuales no son previstos o considerados en el diseño y que, en un caso extremo, pueden perjudicar significativamente la infraestructura propia del relleno o la que le rodea cuando éste es absorbido por el crecimiento urbano.

Por otro lado, el diseño adecuado de un relleno sanitario y la elección de apropiados materiales para la construcción de éste no lo es todo. Está visto que la operación del relleno es un factor tan importante como el diseño y la construcción del mismo. De hecho, estas actividades están estrechamente interrelacionadas, ya que para el diseño de debe considerar el tipo de operación y viceversa. Por esta razón se deben integrar los criterios y consideraciones de cada una de estas etapas, para llevar a cabo un adecuado manejo de los desechos sin altos riesgos de contaminación y sin inversiones adicionales a los presupuestos proyectados, dados por los gastos de operación y mantenimiento.

Dentro de la operación de un relleno sanitario se incluyen también actividades que resultan determinantes de la magnitud de los costos de esta actividad y en el grado de seguridad ambiental. A lo que nos referimos es a los pro-

gramas de monitoreo y mantenimiento del sitio de confinamiento, los cuales se deben llevar a cabo aún mucho después de que se haya terminado la vida útil -- del relleno, e intensificándose cuando éste ha sido rehabilitado para algún -- fin en especial; como lo puede ser un parque recreativo, área verde de reserva o recreativa (como destino final del sitio).

Ya que actualmente se están intensificando las medidas de seguridad y protección ambiental, lo que no excluye a las actividades del manejo de desechos, la disposición en rellenos sanitarios alcanzará a ser una necesidad prioritaria. Es por ésto, que este trabajo pretende proporcionar las bases y consideraciones de diseño acordes con las disposiciones normativas; pero además sin dejar a un lado los aspectos de seguridad estructural del relleno mismo y del -- suelo que lo sustenta. Es decir, aunado a las especificaciones de diseño y construcción en materia ambiental, se pretende integrar a éstas los análisis de mecánica de suelos y las consideraciones del movimiento de tierras (excavaciones, rellenos, terraplenes, etc.), necesarios para llevar a cabo una obra ambiental y estructuralmente adecuada, sin efectos desfavorables para el terreno del sitio de confinamiento y para el área que lo circunde.

Para aplicar los criterios que aquí revisamos, a medida de ejemplo, se expone el diseño de las celdas de confinamiento para realizar la disposición de los desechos sólidos municipales, generados actualmente por la población del Distrito Federal; considerando, como posiblemente muy pronto sucederá, que la totalidad de los desechos que se generan son destinados a confinamiento en el relleno de Bordo Poniente, el cual actualmente está recibiendo un promedio de 500 ton/día.

## CAPITULO I. CONCEPTOS GENERALES.

La conceptualización de la frase "Relleno sanitario" no es tan simple,-- ya que como sucede con cualquier otra frase que no forma parte de nuestro vocabulario cotidiano, no es fácil y, a veces, es imposible asociarla rápidamente con alguna imagen o idea específica de lo que se está hablando. El relleno sanitario no es un concepto del uso común, pero debería de serlo; así como todo lo relacionado con la recolección, transporte, tratamiento y disposición de -- los desechos que diariamente generamos. Un relleno sanitario a fin de cuentas, es requerido para el resultado de nuestro quehacer cotidiano: la generación de desechos sólidos.

En este primer capítulo se presentan los conceptos y fundamentos técnicos para llevar a cabo el diseño de la infraestructura básica de las celdas de confinamiento de un relleno sanitario; aclarando que, para este trabajo, se considera el confinamiento de desechos sólidos municipales (definidos más tarde) referidos con la palabra "desechos" con excepción de los casos indicados en su momento.

### 1.1. RELLENO SANITARIO.

Un relleno sanitario es un método de disposición de desechos sólidos sobre un espacio controlado de terreno, realizado sin crear molestias o riesgos a la salud pública y al ambiente. Tomando en cuenta principios de ingeniería, los desechos se colocan, se esparcen en capas uniformes, se compactan y finalmente, al concluir cada día de operación, se cubren con una capa de tierra (cubierta diaria). A cada porción de desechos confinados en determinada área, compactados y sellados con el material de cubierta, se le denomina como celda de confinamiento.

La cubierta diaria es el aspecto más significativo que distingue al relleno sanitario de un tiradero a cielo abierto; ésta reduce los problemas de dispersión de los desechos, evita la proliferación de vectores potenciales de enfermedades tales como, ratas, moscas y mosquitos (fauna nociva); reduce los peligros de incendio, controla la emanación de olores desagradables y proporciona una imagen más limpia y saludable del sitio de confinamiento.

En la tabla 1.1.1 se exponen las ventajas y desventajas que se pueden presentar para el confinamiento de desechos en un relleno sanitario.

TABLA 1.1.1.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Es un método de disposición en el cual el proceso es completo, en el sentido de que los desechos no requieren de un tratamiento adicional o algún otro tipo de manejo, como sucede en la incineración y el composteo*.</li> <li>- Un relleno sanitario puede recibir todo tipo de desechos (autorizados), eliminando la necesidad de una recolección separada.</li> <li>- El área utilizada para el relleno sanitario, cuando éste ha agotado su capacidad (vida útil), puede rehabilitarse o reincorporarse con la creación de parques recreativos, canchas deportivas, estacionamientos, etc.</li> <li>- Donde el material para cubierta es disponible a una distancia económica de acarreo, un relleno sanitario es el método más barato de disposición de desechos sólidos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- En áreas muy pobladas, la cantidad de material de cubierta requerido podría no estar al alcance en una distancia de trayecto económica.</li> <li>- El metano, gas muy explosivo, y otros gases generados como producto del proceso de descomposición de los desechos, podrían llegar a ser peligrosos o molestos e interferir con el destino final del relleno.</li> <li>- El destino final del relleno está restringido para la construcción de estructuras que transmitan cargas considerables, o que su uso sea alterado por los asentamientos progresivos que posteriormente se presentan en el terreno.</li> <li>- Si no se toman las medidas requeridas, el relleno sanitario puede ser el causante de significativos niveles de contaminación de los mantos freáticos u otro impacto severo al ambiente.</li> </ul>

\* Composteo es el proceso de degradación de la materia orgánica mediante la acción de bacterias en condiciones aeróbicas y bajo rangos óptimos de humedad, temperatura y oxígeno.

## ELEMENTOS DE UN RELLENO SANITARIO.

Ya definimos al relleno sanitario como método de disposición final de desechos; ahora vamos a conceptualizarlo como toda una serie de elementos que ca racterizan la infraestructura que lo forma, misma que es básica para que un re lleno sanitario funcione como tal. Es oportuno señalar que la magnitud de esta infraestructura depende de las necesidades y las dimensiones del proyecto, el cual es concebido de acuerdo a la generación de los desechos y al tipo de mane jo que sea posible darle a los mismos. Es decir, un relleno sanitario puede — constar con elementos que satisfagan simplemente la operación de confinamiento de desechos o contar con todo un sistema integral de manejo muy completo, con in fraestructura para procesar y/o reciclar una fracción considerable de los dese chos (con el fin de reducir el volumen de desechos a confinar) y dispositivos de tratamiento o de generación de energía.

Así pues, los elementos básicos con que debe contar un relleno sanitario- son los siguientes:

### \* Elementos de infraestructura periférica:

- Vías de acceso
- Sistemas de pesaje (básculas)
- Cercas de control, de seguridad o aislamiento
- Señalamientos externos e internos
- Casetas de vigilancia en los accesos principales.

### \* Elementos de construcción y operación:

- Obras de preparación del suelo, base soporte del relleno
- Colectores de lixiviado.
- Ductos de ventilación de gases
- Pozos de monitoreo
- Caminos internos
- Obras de drenaje pluvial
- Dimensionamiento de celdas.

### \* Equipo de operación:

- Tractor de carriles
- Compactadores

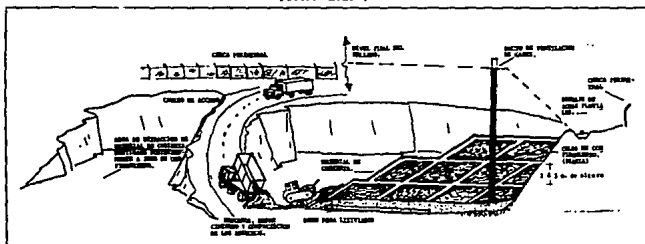
- Retroexcavadora
- Pipas para transporte y riego de agua
- Otros.

\* Elementos y obras complementarias:

- Oficinas administrativas
- Taller de mantenimiento y almacenes
- Instalaciones de tratamiento (para lixiviado y bigas) y laboratorio
- Servicios públicos
- Drenaje sanitario

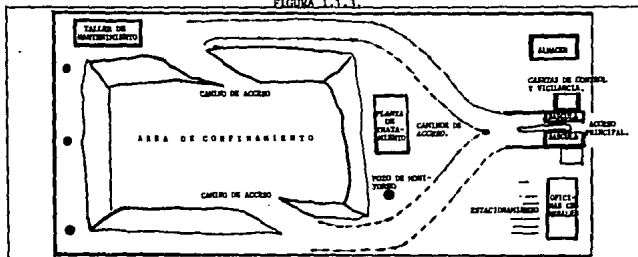
En las figuras 1.1.2 y 1.2.3 pueden visualizarse algunos de los elementos referidos arriba.

FIGURA 1.1.2.



Aspecto general de un relleno sanitario.

FIGURA 1.1.3.



Vista general (planta) de un relleno sanitario; principales elementos que lo forman.

## 1.2. METODOS DE CONFINAMIENTO DE LOS RELLENOS SANITARIOS.

De acuerdo a las características topográficas del terreno y a las condiciones bajo las que se encuentra el mismo, han sido desarrollados algunos métodos de operación basados principalmente en las experiencias obtenidas en el campo de trabajo. En general, es el terreno disponible lo que delimita el método o proceso operativo para la disposición de los desechos. Los principales métodos o variaciones de los mismos se pueden clasificar en los siguientes:

- Método de área.
- Método de trinchera.
- Método de depresión.
- Métodos combinados.

### - METODO DE AREA.

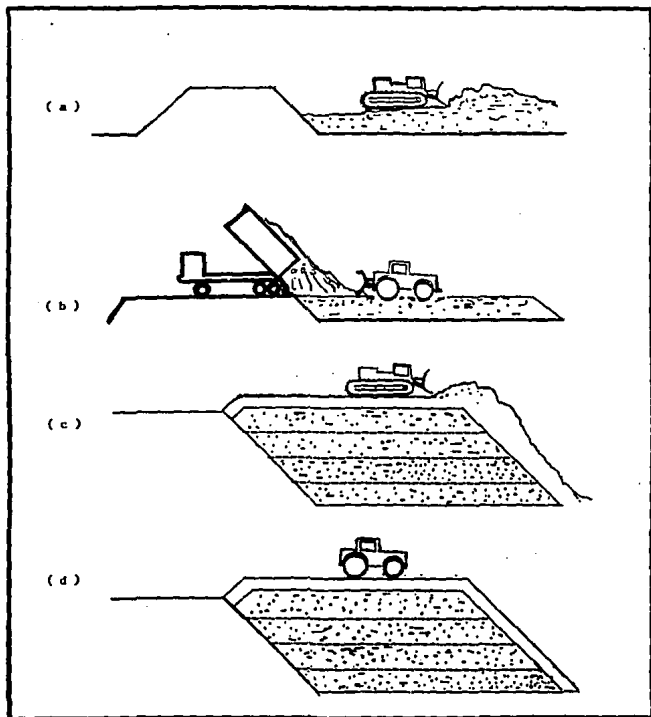
Este método de disposición de desechos sólidos es utilizado cuando las condiciones naturales del terreno impiden o hacen muy difícil la excavación de trincheras o zanjas. Las condiciones adversas para este propósito pueden ser tales como: nivel freático muy cercano a la superficie del terreno, dureza extrema del suelo, material inadecuado del suelo para usarlo como capa de cubierta, entre otros.

En este método, los desechos sólidos son depositados, esparcidos y compactados sobre la superficie y posteriormente cubiertos con el material de cubierta. Este último aspecto es en esencia la mayor desventaja de este método, ya que se requiere de un banco de material cercano al sitio de disposición de los desechos, de lo contrario, puede resultar muy costoso el transporte del material de cubierta al sitio de confinamiento (ver fig. 1.2.1 ).

La operación en el método de área usualmente es iniciada con la construcción de un dique o berma de tierra frente al cual los desechos sólidos son empujados y compactados, previo a esto los desechos son colocados en capas que generalmente varían de 20 a 50 cm para obtener un grado de compactación aceptable; posteriormente, en la etapa final de la operación los desechos son cubiertos con tierra hasta alcanzar un espesor típico de 15 cm.

La longitud del área de descarga de desechos sólidos y en general de toda la operación es llamada frente de trabajo y varía de acuerdo a las condi-

FIGURA 1.2.1.



Operación típica del Método de Área: Descarga y esparcimiento de los desechos (a), descarga del material de cubierta en la zona de confinamiento (b), cubrimiento de los desechos con el material de cubierta y compactación del mismo (c) y (d).



ciones del sitio, a la cantidad de desechos recibidos y a las características del equipo de operación. Si estas condiciones lo permiten, la longitud del frente de trabajo se puede planear de tal forma que se alcance con los desechos la altura necesaria para que sea colocado el material de cubierta al término de la jornada de trabajo y, al día siguiente, iniciar la construcción de una nueva celda. Después, sucesivos niveles pueden ser colocados hasta alcanzar la altura final diseñada.

#### - METODO DE TRINCHERA.

Este método, apropiadamente llamado de trinchera, consiste en la excavación de una gran zanja o trinchera, en la cual los desechos son confinados y cubiertos con el propio material que resulta de la excavación. Los taludes de la trinchera (generalmente de 3:1) son ocupados para el apoyo inicial para los desechos cuando éstos son compactados, previamente esparcidos en capas de espesor adecuado. Al final del día de operación, los desechos se cubren con el material de cubierta; constituyendo así la estructura básica de una celda.

Las dimensiones de la trinchera serán determinadas por los requerimientos de la operación, consistentes en las maniobras de descarga de desechos, del equipo de compactación y de manejo de los mismos; y la cantidad de desechos confinados al día. La longitud de la trinchera debe ser tal que la altura de las celdas que se inician sean terminadas y cubiertas al final de la jornada. La trinchera debe ser también lo suficientemente larga para evitar la espera de los vehículos de recolección que llegan a descargar, que podría ocasionar embogamientos. La trinchera puede ser tan profunda como el suelo y las condiciones naturales del nivel freático lo permitan. Por otro lado es recomendable que el ancho de la zanja sea como mínimo dos veces el ancho de cualquier equipo de compactación que ahí opere (ver figura 1.2.2).

Aparentemente el método de trinchera es más práctico desde el punto de vista de operación; sin embargo, este método presenta una considerable desventaja con respecto a la instalación de la infraestructura de retención y recolección de los lixiviados que marcan las normas ecológicas, que resulta generalmente costosa y que dificulta la operación. Estas mismas razones restringen el uso de este método en terrenos permeables. Este método conviene llevarlo a cabo en terrenos con gran capacidad de retención y de conducción de líquidos,

FIGURA 1.2.2.

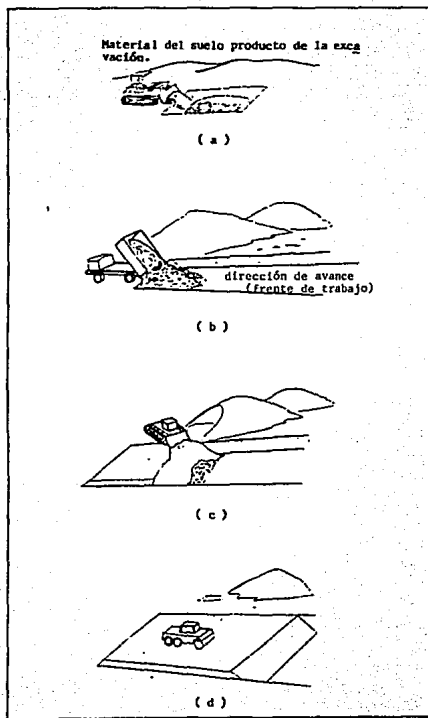


Figura ilustrativa del método de Trincheras: Formación de la zanja o trincheras (a), descarga de los desechos sólidos dentro de la zanja (b), cubierta de los desechos (c) y compactación y acabado de la celda de confinamiento.

tales como lo son los suelos cohesivos y los sedimentos de arcilla que, además son ideales para la operación porque las paredes entre una trinchera y otra -- pueden ser de poco espesor y muy escarpadas para aprovechar óptimamente el --- área disponible.

- METODO DE DEPRESION.

El método depresión es llevado a cabo en localidades donde existen depresiones naturales o artificiales y de acuerdo a su ubicación con respecto a la zona de generación de desechos y a la operación realizada podría resultar muy económico el desarrollo de un relleno sanitario. Cañones, hondonadas, barrancas, bancos de material y minas abandonadas, canteras entre otros sitios, han sido usadas para este propósito (ver ffg. 1.1.2).

Las técnicas de colocación y compactación de los desechos sólidos en los rellenos de este tipo varían con la geometría del sitio, las características - del material de cubierta, las características geológicas e hidrológicas del si tío y los accesos al mismo.

Para algunos autores este método no es más una combinación de los méto-- dos de área y trinchera, dado que cuando el fondo de un cañón o el de un ba--- rranco es considerablemente plano, en la primera disposición de los desechos - sólidos se lleva a cabo el método de trinchera. De forma contraria, y de acuerdo a las características del sitio, se puede empezar la operación con el método de área. Viéndolo así, desde el punto de vista operativo, cualquier relleno sanitario puede ser una combinación del Método de Área y el de Trinchera, y en general otros métodos son sólo adaptaciones de éstos a condiciones específicas del terreno. Cuando esto sucede, a estos métodos de construcción o de opera--- ción se les denomina Métodos Combinados.

### 1.3. FACTORES BIOQUÍMICOS Y FÍSICOS QUE ACTÚAN DENTRO DE UN RELLENO SANITARIO.

La comprensión de los procesos que se desarrollan dentro de un relleno sanitario después de que éste ha sido llenado y terminado, es de suma importancia para la planeación en el diseño, construcción y operación de los mismos en forma adecuada. Con los desechos sólidos ya confinados y enterrados actúan simultáneamente cambios químicos, biológicos y físicos de los cuales entre los más importantes se mencionan los siguientes:

- \* La descomposición o degradación biológica del material orgánico en condiciones aerobias, inicialmente; y anaerobias con la generación de gases, agua y otros fluidos metabólicos como producto del proceso.
- \* La oxidación química de los desechos.
- \* El escape de gases y la difusión de los mismos a través del relleno sanitario.
- \* Movimiento de los líquidos internos por diferencia de densidad y viscosidad.
- \* Lixiviación y disolución de materia orgánica e inorgánica por agua y movimiento de lixiviado a través del relleno.
- \* Movimiento del material disuelto por gradiente de concentración y ósmosis.
- \* Asentamientos diferenciales causados por la consolidación de material heterogéneo.

Todos estos cambios se llevan a cabo durante la degradación de los desechos que posteriormente se estabilizan. La descomposición, grado de compactación, porcentaje de humedad, presencia de material de inhibición biológica o química, temperatura y la altura final del relleno son los factores principales que influyen en el desarrollo de los procesos bioquímicos y físicos que ocurren cuando los desechos sólidos han sido confinados. Estos procesos de estudio necesarios son la descomposición y los asentamientos.

#### • DESCOMPOSICION.

Los componentes orgánicos biodegradables de los desechos sólidos comienzan a descomponerse por la acción microbiana (microorganismos que se encuentran presentes en el suelo, en el material de cubierta y en los mismos desechos) tan pronto como han sido confinados (enterrados) dentro del relleno sanitario. Inicialmente la descomposición de los desechos se lleva a cabo bajo condiciones aerobias (en presencia de oxígeno), posteriormente, cuando el oxígeno ha sido agotado, el proceso continúa anaeróbicamente.

Los desechos sólidos confinados dentro del relleno sanitario durante el proceso de descomposición química y biológica, producen sólidos, líquidos y productos gaseosos. Los productos líquidos de la degradación microbiana tales como los ácidos orgánicos, incrementan la actividad química dentro del relleno. Los desechos de material orgánico son degradados rápidamente así como relativamente lo hacen, por acción de la oxidación, los metales. Contrariamente a los desechos orgánicos, otros materiales como el plástico, hule, vidrio y algunos desechos de cascajo (desechos de material de construcción o demolición) entre otros; son de muy difícil o de lenta degradación. En general, la velocidad de degradación de los desechos sólidos es afectada por la disponibilidad de oxígeno (en la fase aeróbica), la temperatura, el contenido de humedad y la población microbiana. Dada la inestabilidad de estos factores es muy difícil o a veces imposible predecir exactamente la cantidad y velocidad de producción de los posibles contaminantes generados durante el proceso.

Como resultado de la actividad degradatoria de los microorganismos, se generan temperaturas muy altas que llegan a alcanzar los 70°C, aunque las temperaturas promedio comúnmente son del orden de 37 a 50°C. Bajo condiciones normales el grado de descomposición alcanza un punto máximo dentro de los dos primeros años y después disminuye lentamente, continuando, en muchos casos, por períodos de 25 años o más.

Para nuestro interés de estudio, los productos de la descomposición de los desechos sólidos (principalmente desechos orgánicos) confinados dentro de un relleno sanitario, de los que se tratará con más detalle, son los lixiviados y el biogas generado.

• LIXIVIADO.

El lixiviado es definido como el líquido que ha sido percolado a través de los desechos sólidos arrastrando y disolviendo sus componentes, productos de la descomposición tales como ácidos orgánicos, cationes libres, nitratos, cloruros, entre otros; que forman una solución que contiene disolventes, materia fina suspendida y microbios. En general, el lixiviado está compuesto de líquidos que han entrado al relleno sanitario por fuentes externas; como la precipitación pluvial, flujos superficiales y subterráneos de agua y líquidos producidos por la misma descomposición de los desechos sólidos.

El lixiviado que se escapa fuera del relleno sanitario puede contaminar aguas superficiales y subterráneas, es por eso que es importante conocer la composición de el lixiviado dentro de determinados efectos potenciales sobre la calidad de la superficie y del subsuelo. Los contaminantes arrastrados por el lixiviado dependen de la composición de los desechos sólidos y de las simultáneas actividades químico-biológicas que se desarrollan dentro del relleno. El lixiviado varía en sus características constitutivas con el tiempo, la precipitación y las características de los desechos dispuestos en el relleno. La composición de los lixiviados es difícil de predecir con un grado de exactitud aceptable debido a la gran diversidad de variables que afectan la solubilidad de los constituyentes orgánicos e inorgánicos, pero se ha registrado valores típicos de la composición de los lixiviados, los cuales se encuentran tabulados en la tabla 1.3.1.

La cantidad de contaminantes en el lixiviado de un relleno sanitario, en el que ya no se colocarán más desechos sólidos, puede esperarse que disminuya con el tiempo. Durante los estados activos de la descomposición existe una remoción de grandes cantidades de contaminantes por lixiviación y se hace más lenta a medida que la descomposición en el relleno se estabiliza. Si un relleno sanitario es considerado una masa de material que contiene una cantidad finita de material lixiviable, entonces, dependiendo de la velocidad de remoción, el lixiviado podría eventualmente cesar. Los medios más obvios de controlar la producción y movimiento del lixiviado es reducir el agua de la entrada al relleno en la mayor extensión posible.

TABLA 1.3.1.

CONSTITUYENTE	VALOR * mg/l.	
	INTERVALO **	TIPICO
BOD <sub>5</sub> ( demanda bioquímica de oxígeno en 5 días ).	2,000 - 30,000	10,000
TOC ( carbono orgánico total )	1,500 - 20,000	6,000
COD ( demanda química de oxígeno )	3,000 - 45,000	18,000
Sólidos suspendidos totales	200 - 1,000	500
Nitrógeno orgánico	10 - 600	200
Nitrógeno amoniacal	10 - 800	200
Nitratos	5 - 40	25
Fósforo total	1 - 70	30
Orto - fosfato	1 - 50	20
Alcalinidad como CaCO <sub>3</sub>	1,000 - 10,000	3,000
pH	5.3- 8.5	6
Dureza total como CaCO <sub>3</sub>	300 - 10,000	3,500
Calcio	200 - 3,000	1,000
Magnesio	50 - 1,500	250
Potasio	200 - 2,000	300
Sodio	200 - 2,000	500
Cloruros	100 - 3,000	500
Sulfatos	100 - 1,500	300
Hierro total	50 - 600	60

\* Excepto pH

\*\* Intervalos de valores representativos, se han reportado valores máximos para algunos de los constituyentes.

Composición de lixiviados provenientes de rellenos sanitarios.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Foree E. and J. Young. Design Guide for Sanitary Landfill. IOWA State University, 1973.

• COMPOSICION MICROBIOLOGICA.

Los desechos sólidos municipales contienen una gran población microbiana y pueden estar altamente contaminados con microorganismos patógenos; ya que - estos desechos comúnmente contienen excrementos humanos y animales, desechos de hospitales y en ocasiones lodos de cloacas; todos peligrosos para la salud. Debido a éstos, la composición microbiológica que podría esperarse comúnmente en un relleno sanitario, de acuerdo a las investigaciones que se han centrado en la detención de bacterias de indicador fecal, está representada principalmente por los siguientes microorganismos:

- Bacterias: Varios estudios<sup>2</sup> han mostrado que puede haber una significativa población de bacterias asociadas con los lixiviados generados en un relleno sanitario, así mismo se ha indicado que esta población varía con el tipo de desechos y el tiempo de su confinamiento. De las bacterias identificadas en un relleno sanitario, destacan las bacterias de indicador fecal, tales como el grupo fecal estreptococo, coliforme fecal y coliformes totales. Las características más importantes de estos grupos son: el grupo coliforme fecal es fácilmente identificable por su capacidad de fermentar lactosa, produciendo - gas a 44.5°C. El grupo coliforme es indicador tradicional de posibles constituyentes patógenos de abastecimiento de agua.

- Virus: A diferencia de las bacterias, los virus son parásitos obligados y no pueden reproducirse fuera de un organismo anfitrión. Pueden estar presentes en excrementos de humanos y animales u otro tipo de desechos provenientes de fuentes potenciales de virus, como en el caso de desechos provenientes de hospitales. En general, los virus son raramente encontrados en los lixiviados, ya que se presenta un ambiente severo para su supervivencia.

- Hongos: En la escasa información disponible sobre la presencia de hongos en los lixiviados generados en los rellenos sanitarios, se habla principalmente de levaduras, hongos saprofiticos ( los cuales crecen sobre el material putrefacto ) y mohos.

<sup>2</sup>COMPLURB. Aferro experimental de lixo. Río de Janeiro, 1978.  
Merz R. Special Studies of a Sanitary Land Fill, U.S. Washintong, 1970.



- Parásitos: En los lixiviados que se generan en los rellenos sanitarios se -- han detectado parásitos, que incluyen protozoarios, helmintos y nemátodos; debido a la presencia de excrementos humanos y animales, particularmente de aquellos rellenos que reciben lodos de drenajes no estabilizados, lo que representa un peligro potencial para la salud si no son eliminados adecuadamente.

#### • BIOGAS.

La denominación " biogas " proviene del hecho de que el gas es producido-- por la acción biológica de descomposición anaeróbica (principalmente) de los desechos sólidos confinados dentro de un relleno sanitario, en el que se generan representativamente metano, hidrógeno, bióxido de carbono, monóxido de carbono, nitrógeno, ácido sulfúrico, amonio y trazas de oxígeno.

El metano y el bióxido de carbono son los mayores constituyentes de los - gases generados dentro de las celdas de confinamiento, de hecho, son los primeros que se generan y, en la mayoría de los casos, constituyen el 90% o más del gas producido.

El bióxido de carbono es producido por microorganismos aeróbicos, que --- transforman el oxígeno presente como resultado de la degradación de ácidos grasos, carbohidratos, celulosa y aminoácidos, principalmente. Cuando se consume todo el oxígeno, los microorganismos anaeróbicos son los que predominan en el medio; y éstos metabolizan el bióxido de carbono generando principalmente metano, entre otros gases. La generación significativa de biogas comienza después de los 200 días de que los desechos han sido confinados. Teóricamente, si la - disposición es llevada a cabo por completo, cada kilogramo de desechos sólidos contiene un 40% de material orgánico que puede producir arriba de 200 litros - de biogas. Bajo condiciones normales, el grado de descomposición como la cantidad de gas producido, alcanza un punto máximo dentro de los dos primeros años- y después disminuye lentamente, y su conclusión, en muchos casos puede tardar- varios años.

La cantidad y la composición generada dentro de un relleno sanitario, depende del tipo de desechos sólidos que se descomponen. Los desechos con una --

gran fracción de material orgánico de fácil degradación producirán mayor cantidad de biogas que los desechos que en su mayor parte contienen material no orgánico.

La velocidad de producción de biogas está sujeta a los niveles y condiciones ( sobre todo de humedad ) bajo las cuales se lleva a cabo la descomposición microbiana. Cuando la descomposición ha sido terminada, la producción de biogas también cesa. En la tabla 1.3.2. se encuentran registrados la composición típica del biogas durante el desarrollo de un relleno sanitario.

TABLA 1.3.2.<sup>3</sup>

INTERVALOS DE TIEMPO (MESES)	% PROMEDIO POR VOLUMEN		
	NITROGENO N <sub>2</sub>	BIOXIDO DE CARBONO CO <sub>2</sub>	METANO CH <sub>4</sub>
0 - 3	5.2	88	5
3 - 6	3.8	76	21
6 - 12	0.4	65	29
12 - 18	1.1	52	40
18 - 24	0.4	53	47
24 - 30	0.2	52	48
30 - 36	1.3	46	51
36 - 42	0.9	50	47
42 - 48	0.4	51	48

Distribución típica de la cantidad de gases en un relleno sanitario durante los primeros 48 meses.

La formación del biogas se lleva a cabo mediante la interacción química de los elementos principales que constituyen la materia orgánica: carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O<sub>2</sub>) y nitrógeno (N). Estos elementos constituyen la fórmula mínima o básica de la materia orgánica, representada de la siguiente manera:



en donde x, y, z son las variables que identifican la cantidad molecular de cada elemento, y en donde los porcentajes de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno son ajustados al 100% tomando como base al carbono.

Mediante la fórmula mínima (\*) se puede desglosar el proceso de descomposición de la materia orgánica de los desechos que da origen a los gases que conforman el biogas (metano, dióxido de carbono, ácido sulfhídrico y otras trazas) en las fases de descomposición aeróbica y anaeróbica. En la primera fase, la fracción orgánica de los desechos está sujeta a la oxidación, dada la presencia del oxígeno, y en la que se establece el siguiente balance estequiométrico:



de la estequiometría de esta relación tenemos los coeficientes siguientes:

$$\begin{aligned} C : 1 &= B \\ H : x &= 2D + 3E \\ O : y + 2A &= 2B + D \\ N : z &= E \end{aligned}$$

de donde obtenemos:

$$\begin{aligned} D &= (x - 3z)/2 \\ A &= (4 + x - 2y - 3z)/4 \end{aligned}$$

sustituyendo estos coeficientes resulta:



ecuación que representa el proceso aeróbico de la descomposición de la materia orgánica.

En el proceso anaeróbico de la descomposición y bajo la acción del agua, se lleva a cabo lo siguiente:



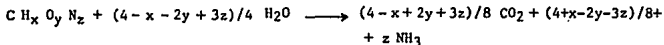
en donde:

$$\begin{aligned} \text{C} : 1 &= \text{B} + \text{D} \\ \text{H} : 2\text{A} + x &= 4\text{D} + 3\text{E} \\ \text{O} : y + \text{A} &= 2\text{B} \\ \text{N} : z &= \text{E} \end{aligned}$$

de lo anterior resulta:

$$\begin{aligned} \text{A} &= (4 - x - 2y + 3z)/4 \\ \text{B} &= (4 - x + 2y + 3z)/8 \\ \text{D} &= (4 + x - 2y - 3z)/8 \end{aligned}$$

sustituyendo tenemos:



ecuación que representa el proceso anaeróbico de la descomposición de la materia orgánica.

En los anteriores balances estequiométricos no se consideró la producción de las trazas (gases con un porcentaje de producción despreciable), pero los resultados obtenidos así, representan una aproximación aceptable de la producción del biogas.

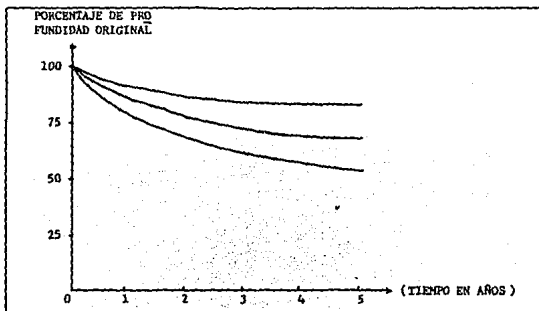
• ASENTAMIENTOS.

Los asentamientos están dados por el hundimiento o cambio de nivel de las celdas del relleno sanitario y en ocasiones por el mismo suelo sobre el cual son confinados los desechos. Los asentamientos dependen de las características físicas de los desechos, de la compactación inicial, del grado de descomposición, de los efectos de consolidación ( cuando el agua y el aire, presentes en el material compactado, son forzados a salir ); de la altura final de las celdas -- del relleno y del equipo que opere en él.

En un relleno sanitario pueden ocurrir dos tipos de asentamientos: Asentamientos regulares que abarcan grandes superficies; y los asentamientos diferenciales, acontecidos en forma heterogénea en superficies menores. Estos últimos son los que se presentan con mayor frecuencia.

Los porcentajes de los asentamientos totales debidos a la degradación de los desechos conforme ocurre, están representados gráficamente en la figura -- 1.3.3, en la que las curvas representan la deformación de los desechos en función del tiempo. Como se puede ver en esta figura, el 50% del grado de compactación total de los desechos es alcanzado teóricamente en 5 años.

FIGURA 1.3.3.



Gráfica de asentamientos teóricos debidos a la degradación de los desechos.<sup>4</sup>

<sup>4</sup>Eliassen R. Decomposition of landfill, American Journal of Public Health, vol. 32 no. 3, 1942.

#### 1.4. FACTORES QUE DETERMINAN LA ELECCION DEL SITIO PARA LA DISPOSICION FINAL DE LOS DESECHOS SOLIDOS EN RELLENOS SANITARIOS.

La elección del sitio para llevar a cabo el confinamiento de desechos sólidos en rellenos sanitarios, involucra la consideración de muchos factores, - necesarios para realizar un apropiado manejo de los desechos con una seguridad y un costo razonable. En general, todos estos factores los podemos ubicar en - cuatro principales aspectos:

- Aspectos socio-económicos:
  - Vida útil
  - Area disponible
  - Ubicación
  - Tenencia de la tierra y uso del suelo
  - Destino final
- Aspectos característicos del sitio:
  - Geología
  - Geohidrología
  - Hidrología
  - Topografía
  - Meteorología
- Aspectos de operación:
  - Vías de acceso
  - Disponibilidad de material de cubierta.
  - Facilidad de operación
- Aspectos ambientales:
  - Impacto ambiental
  - Cercanía con fuentes de agua potable y con playas u otro sitio de recreo.
  - Normatividad ecológica.

En realidad, puede verse que existe una gran interacción de todos estos - factores; como consecuencia de esto, algunos de ellos caen dentro de dos o más aspectos considerados para su clasificación. En otros casos se aprecia también que éstos son determinantes o, contrariamente, dependientes de las condiciones de otros. Para lograr un entendimiento de cada uno de los factores referidos, - éstos se manejan desde el punto de vista que está indicado en los cuatro puntos o aspectos indicados arriba.

- FACTORES SOCIO-ECONOMICOS.

Para estos factores se siguen criterios con referencia al costo que origina tanto la construcción como la operación y mantenimiento en determinado sitio; criterios que determinan buenas o malas relaciones con la población local, las autoridades municipales y la imagen urbana. Tomando en cuenta lo anterior, se da una breve referencia de los siguientes factores:

- Vida Util: Se denomina vida útil al tiempo ( en años ) que servirá el sitio para llevar a cabo el confinamiento de los desechos sólidos generados por la población de determinada localidad. La vida útil de un relleno sanitario está relacionada con la capacidad del sitio ( volumen de almacenamiento disponible ) que a su vez depende de la generación diaria, la eficiencia de recolección, el porcentaje de reciclaje o aprovechamiento, la densidad de los desechos sólidos ( ya compactados ); y aunado a todo esto, el tipo o método de operación. En general, se considera para la disponibilidad de volumen del sitio, el volumen ocupado por los desechos sólidos y el material de cubierta. Para este propósito se recomienda una superficie de terreno a desarrollar cuya rasante final del proyecto proporcione un volumen de almacenamiento disponible para diez años como mínimo.

- Area Disponible: Para la selección del sitio es deseable tener la suficiente superficie requerida para llevar a cabo la operación, cuando menos para un año. Para periodos más cortos, la operación de disposición o manejo de los desechos sólidos resulta considerablemente más difícil y costosa, debido a los trabajos de preparación del sitio, de captación y control del lixiviado y biogás principalmente.

- Ubicación: Para este factor se consideran dos puntos de vista diferentes y contradictorios el uno del otro; por una parte, el sitio para el confinamiento de los desechos sólidos debe estar localizado tan alejado como sea necesario de la población para que éste no ocasione rechazo por la misma, debido a las molestias que puede ocasionar la operación del relleno ( ruido, olores desagradables, dispersión de componentes volátiles de los desechos, etc ). Por otro lado, se requiere que la ubicación del sitio no sea demasiado lejana pa-

ra no tener distancias de trayecto que resulten costosas, que podrían afectar significativamente el diseño y la operación del sistema de manejo de los desechos sólidos. Se consideran también en este punto, las rutas de recolección de la localidad, condiciones del tráfico local y los accesos al sitio mismo. Para este último punto de vista, la distancia mínima del sitio con la población es deseable que sea de 1 km, pero considerando el primer criterio expuesto, se recomienda que la distancia entre el sitio de disposición final y los límites de la mancha urbana sea de 3 km.

- Tenencia de la tierra y uso del suelo. En cualquier caso, en un proyecto de relleno sanitario, el sitio deberá ocuparse sólo cuando la entidad responsable ( del relleno sanitario ) tenga la autorización de construir u ocupar el terreno para este fin, estipulando el período de uso y destino final, que pudiera ser, campos de golf u otro tipo de campo recreativo. Cuando el terreno sea propiedad del municipio, deberá quedar registrado en el catastro de la propiedad, señalando su uso restringido.

- Destino final. El uso contemplado a futuro para el sitio que ha sido ocupado para el confinamiento de los desechos sólidos también debe ser considerado para su elección, debido a los efectos que pudieran causar la producción de biogas y de lixiviados al entorno ecológico o urbano del sitio.

#### • FACTORES NATURALES O CARACTERISTICOS DEL SITIO.

Estos aspectos consideran la morfología, características fisicoquímicas del suelo, las condiciones del mismo y del ambiente bajo el que se encuentra. Los principales factores que consideramos son:

- Geología: Dado el eminente riesgo de contaminación de los mantos acuíferos, es muy importante considerar la estratigrafía y características generales del sitio propuesto para relleno sanitario. Para este fin, los suelos sedimentarios con composiciones arena-limo-arcillosas e idealmente en una proporción 50:30:20 respectivamente, son los más recomendables debido a su escasa permeabilidad y al mismo tiempo a su fácil manejo en la operación ( excavación, cortes y cubierta ) del relleno sanitario.



- Geohidrología. La geohidrología ( hidrología subterránea ) es quizás el factor más importante a considerar para estabilizar la susceptibilidad ambiental del área del sitio destinado a ser relleno sanitario. Por esta razón se deben llevar a cabo estudios geohidrológicos para conocer la localización y el comportamiento de las aguas subterráneas o cuerpos de agua presentes. También es necesario analizar el flujo y la cantidad de lixiviados producidos para definir el riesgo de contaminación de acuíferos potencialmente explotables con fines de abastecimiento de agua. En todos los casos de que exista la posibilidad de contaminar este tipo de acuíferos, los sitios propuestos deben ser rechazados o bien, determinar la factibilidad de establecer un sistema de control que minimicen los riesgos de contaminación de éstos.

- Hidrología. La hidrología en el área es importante para establecer las corrientes, escurrimientos y otros cuerpos de agua característicos de la zona, así como las condiciones de crecientes e inundación. Si el sitio es susceptible a estos casos, entonces se tendrán problemas de erosión de la capa de cubierta y una excesiva producción de lixiviados.

- Topografía. Los criterios que se fundamentan para definir si la topografía del sitio es favorable para llevar a cabo un adecuado desarrollo del relleno sanitario, son la capacidad del sitio para alojar el mayor volumen aprovechable por hectárea para el confinamiento de los desechos sólidos y la disponibilidad de realizar los cortes requeridos para dotar de material de cubierta. Los sitios que satisfacen estos criterios pueden ser principalmente los inicios de cañadas, socavones, bancos de préstamo y minas abandonadas, entre otros.

- Meteorología. De los sitios propuestos se debe recopilar toda la información relativa a la precipitación e intensidad pluvial, evapotranspiración, dirección y velocidad de vientos dominantes. Estos últimos, para evitar que los sitios seleccionados tengan la dirección del viento directa hacia la población. Por otro lado se deben considerar otros tipos de condiciones ambientales que sean desfavorables para la operación del relleno sanitario.

• FACTORES DE OPERACION.

Estos factores tienen mucho que ver con el aspecto económico y el desarrollo práctico del sitio como relleno sanitario, pero como se mencionó antes, para su clasificación se tomó un enfoque que definiera las necesidades apropiadas para llevar a cabo una adecuada operación de los sitios destinados al confinamiento de los desechos sólidos. Para este criterio se consideran los siguientes factores:

- Vías de acceso. Se toma en cuenta para la elección del sitio más apropiado: la facilidad y rapidez de llegada, las condiciones de los caminos de acceso - aptos para la circulación en toda época del año que eviten circunstancias que hagan difícil o retrasen la operación continua de los vehículos de transporte, entre otras cosas.

- Disposición de material de cubierta. En términos de autosuficiencia de material de cubierta necesaria para la operación del relleno sanitario, se deben considerar sitios con suelo adecuado para la excavación y manejo del material ( para la cubierta ). En caso desfavorable, contar con bancos de préstamo cercanos, de fácil acceso y con capacidad suficiente para satisfacer las necesidades durante la vida útil del relleno sanitario.

- Fácil operación. Se deben considerar sitios que no requieran de complejos o costosos métodos de operación, como los que se pueden presentar en barrancos o cañadas de paredes altas, taludes muy escarpados, suelos con nivel freático - muy cercano a la superficie, etc.

• FACTORES ECOLOGICO - AMBIENTALES.

Quizás los factores en materia ecológica o ambiental son los que están - más relacionados con los factores considerados en los dos primeros aspectos - ya mencionados, tal vez de ahí que sean los más importantes a tomarse en cuenta, considerando el auge que ha tomado últimamente la preocupación por el ambiente por parte de todos los gobiernos del mundo, sin excluir el nuestro. Así pues, dentro de estos factores a considerarse para la elección del sitio mencionado, se pueden enlistar los siguientes:

- Impacto Ambiental. Los sitios propuestos para la disposición de los desechos sólidos que presenten el menor riesgo de ser alterados, o en el peor de los casos, con la menor magnitud de perjuicios en su entorno ecológico por el establecimiento de un relleno sanitario, serán los más apropiados para este fin.

- Cercanía con fuentes potenciales de abastecimiento de agua, playas y otros sitios de recreo. Como se mencionó anteriormente, los sitios con un peligro evidente de contaminación o que pueden ser vector de enfermedad de la vida humana y de otros organismos que están en interacción con ella, tanto por seguridad como por restricción de las normas establecidas por la Ley General del Equilibrio Ecológico, no son convenientes para la disposición de desechos.

- Normatividad ecológica-ambiental. Se deben considerar los sitios que satisfagan las normas o leyes que las autoridades correspondientes señalan ( en el siguiente capítulo se tratará con más detalle este tema ).

Resumiendo, la selección de un sitio para el confinamiento de desechos sólidos en rellenos sanitarios, debe ser justificada con los resultados de estudios preliminares de los sitios posibles, estudios de los aspectos de ingeniería del diseño, estudios de costos y de impacto ambiental. Estos mismos estudios determinarán qué sitio es el más apropiado para la disposición de los desechos sólidos.

## CAPITULO II. NORMATIVIDAD EN LA DISPOSICION FINAL DE LOS DESECHOS SOLIDOS MUNICIPALES.

Dentro de las actividades consideradas como riesgosas en la Ley General del Equilibrio Ecológico, para el medio ambiente y la salud del hombre, se encuentra la disposición de desechos sólidos. Dependiendo del tipo de desechos que se generen, esta Ley ha reglamentado el manejo y el destino final de los mismos. Si los desechos a manejar presentan características (definidas por dicho reglamento) que los identifican como peligrosos, entonces estos tipos de desechos deberán, de acuerdo al caso, ser tratados, estabilizados, manejados, incinerados y confinados, bajo las normas correspondientes de seguridad establecidas en los reglamentos ecológicos locales o internacionales.

Para el caso de los desechos sólidos municipales, actualmente se cuenta con una Norma Técnica (aprobada recientemente), en la cual se establecen los lineamientos para la disposición de este tipo de desechos en rellenos sanitarios. Además, con base en los proyectos de normas para el manejo de desechos sólidos peligrosos y las normas establecidas por algunas agencias internacionales, se fundamentan los criterios básicos para el diseño de un relleno sanitario y establecer los requerimientos para el establecimiento y operación de estos mismos, acordes con las disposiciones de la Ley General del Equilibrio Ecológico.

## 2.1. GENERALIDADES DE LOS DESECHOS O RESIDUOS.

A los materiales, mezclas o sustancias que constituyen una amplia y heterogénea gama de objetos sólidos o semisólidos generados en los procesos de extracción, transformación, producción, utilización y consumo de los recursos aprovechados domésticamente por el hombre; y que ya no son poseedores del suficiente valor de uso o resguardo; o que, en otro caso, no se tiene definida una utilidad adicional directa y pueden ser almacenados, reprocesados o eliminados por algún método de disposición, los referimos como desechos sólidos.

### • CLASIFICACION.

En general, el origen de los desechos así como su composición y características físico-químicas está relacionado con el uso del suelo de la zona, la actividad económica y el nivel económico de la población que la habita.

Los desechos pueden ser clasificados con base a diferentes puntos de vista relacionados con sus características, su origen y su manejo; se clasifican simplemente en desechos orgánicos e inorgánicos; en materiales inertes ( vidrio, metales, cenizas, etc ) y materiales combustibles ( papel, cartón, madera, plástico, caucho, etc ); en desechos reciclables o aprovechables y desechos de rechazo, y por el origen de la generación, en desechos municipales, industriales, agrícolas, etc. Debido a las características tan heterogéneas de los desechos es necesario establecer una clasificación que conceptualice de una forma más clara el tipo y constitución de los desechos para realizar un adecuado manejo (recolección, almacenamiento, tratamiento y disposición final) de los mismos. Así, se considera para la siguiente clasificación de los desechos sólidos la fuente de generación y las características físico-químicas.

- Desechos sólidos municipales. Se le da esta denominación a los desechos que se generan principalmente en casas-habitación, oficinas, centros comerciales ( "supers" ), mercados y macromercados de abasto, almacenes, bodegas, sitios de reunión, pequeños comercios fijos y semifijos ( ambulantes ), establecimientos de servicios y calles peatonales. La composición de estos desechos varía significativamente con la temporada, la localidad y la fuente generadora (den

tro de esta clasificación) pero el tipo de desechos que caracterizan a los desechos sólidos municipales los podemos subdividir en los siguientes:

\* **Desechos orgánicos:** Los derivados de la preparación de alimentos, residuos de comida, residuos de abasto (frutas, vegetales y desechos de naturaleza animal), desechos de jardinería (desechos de poda, hojarasca, flores, etc.) y algunas veces, excreta humana y de animales domésticos. Químicamente, los elementos principales de los desechos orgánicos son el carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre que constituyen básicamente la celulosa, la hemicelulosa, azúcares, almidones, ácidos orgánicos, grasas, aceites y ceras. La característica principal de los desechos orgánicos es que son altamente degradables.

\* **Desechos inorgánicos:** Los que son formados por materiales sintéticos o de origen mineral, no orgánico. Representan esta clasificación los metales ferrosos y no ferrosos, vinil, uncel, vidrio, etc.

\* **Desechos combustibles:** Consistentes de materiales fácilmente incinerables como el papel, cartón, hule, plástico, madera, textil, etc.

\* **Cenizas y polvo:** Los que resultan de la incineración doméstica de madera, carbón, coque y otros desechos combustibles. Normalmente están constituidas de finos, brazas y polvo.

\* **Desechos reciclables:** Los que pueden ser reincorporados a un proceso de producción y consumo. Aunque en muy poca proporción, los principales desechos reutilizados son: el vidrio, latas de aluminio y latón, el cartón y el fierro.

\* **Desechos industriales:** Los desechos industriales son considerados a aquellos que se generan en la producción, extracción o transformación en gran escala de artículos, materiales o sustancias como materia prima o de consumo y uso directo. Estos desechos son de carácter muy variado en todo el ámbito industrial, pero homogéneos y constante tanto en cantidad como en composición en la mayoría de los procesos de fabricación. Los sectores industriales con mayor generación de desechos sólidos son: el alimenticio, el textil, metal-mecánico, la siderúrgica básica, la manufactura y el químico. Dentro de esta clase de desechos se encuentran algunos que, por sus características químicas caen dentro de la clasificación de desechos peligrosos, la cual está contemplada por la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. En las tablas 2.1.1. y -

2.1.2 se encuentran tabuladas alguna fuentes generadoras de desechos industriales en los diferentes ramos de la producción.

TABLA 2.1.1.1

RESIDUOS.	
Alimentos y similares .....	Carne, grasa, aceites, desperdicios, vegetales, etcétera.
Textiles .....	Residuos de telas y fibras.
Madera y productos de madera .....	Recortes de madera, virutas, serrín; en algunos casos metal, plásticos, fibras, colas, pinturas y solventes.
Transformados de madera .....	Idem madera y tela. Residuos de forros.
Transformados de metal .....	Metales, plásticos, vidrio, madera, caucho, adhesivos, tela, papel, etc.
Papel y similares .....	Papel y fibras químicas, tintas, colas, etc.
Industrias primarias de metal ....	Recortes de metales férricos, no férricos, escorias, arenas, etc.
F. de metales .....	Metales, cerámica, arena, escoria, cascarilla, revestimientos, solventes, líquidos de decapado.
Maquinaria no eléctrica .....	Escorias, arena, recortes de metal, madera, plásticos, resinas, cauchos, tela, pinturas, solventes, productos petrolíferos, etc.
Equipo de transporte .....	Recortes de metal, vidrio, filtros, madera, caucho, plásticos, telas, pinturas, solventes, petróleo.
Productos eléctricos .....	Residuos de metal, cordón, vidrio, metales, caucho, plásticos, resinas, fibras, telas, etc.
Productos químicos .....	Productos químicos orgánicos e inorgánicos, metales, caucho, vidrio, aceites pintura.
Petróleo.....	Asfalto y alquitrán, asbestos, papel, telas, fibras.
Caucho y productos de plástico ...	Recortes de caucho, plásticos, negro de humo, tintas.
Cueros, productos de piel .....	Recortes de piel, tintas, aceites, etc.
Productos de roca, arcillas y vidrio..	Vidrio, cemento, arcilla, cerámica, yeso, asbestos, piedra, papel y abrasivos.
Impresión y Publicación .....	papel, papel de periódico, cartón, etc.

Fuentes generadoras de desechos industriales principalmente sólidos.

TABLA 2.1.2.

ESTADO	PELIGROSOS			NO PELIGROSOS			NO DEFINIDOS.	TOTAL
	L	S	SS	L	S	SS		
AGUASCALIENTES	6	1	2	2	12	-	1	24
B.C. NORTE	50	2	4	3	27	1	1	88
B.C. SUR	3	-	-	-	2	-	-	5
CAMPECHE	-	-	-	-	5	-	-	5
COAHUILA	13	43	8	136	117	2	6	325
COLIMA	2	-	11	-	1	-	-	4
CHIASPAS	2	-	1	-	5	-	1	9
CHIHUAHUA	15	2	8	4	50	2	2	83
DURANGO	25	1	1	2	14	-	1	44
GUANAJUATO	102	1	40	4	33	4	4	188
GUERRERO	3	-	-	-	5	-	1	9
HIDALGO	3	7	2	22	72	-	1	107
JALISCO	117	7	23	23	144	-	10	331
MICHOACAN	13	-	4	1	18	2	3	41
MORELOS	9	-	5	1	32	2	1	50
NAYARIT	1	-	-	-	3	-	1	5
NUEVO LEON	94	37	32	110	179	12	12	476
OAXACA	3	-	1	-	15	-	1	20
PUEBLA	21	7	10	21	69	4	4	136
QUERETARO	12	-	1	1	19	-	2	35
QUINTANA ROO	-	-	-	-	8	-	-	8
SAN LUIS POTOSI	8	5	5	17	57	2	3	97
SINALOA	32	-	1	-	18	1	1	53
SONORA	13	1	2	2	19	1	2	40
TABASCO	6	-	-	-	8	-	-	14
TAMAULIPAS	21	1	11	4	21	5	3	66
TLAXCALA	8	2	6	6	21	2	1	46
VERACRUZ	28	13	15	40	56	6	5	163
YUCATAN	10	1	1	9	34	-	1	56
ZACATECAS	1	-	-	-	5	-	1	7
<b>TOTAL</b>	<b>621</b>	<b>131</b>	<b>184</b>	<b>408</b>	<b>1069</b>	<b>53</b>	<b>69</b>	<b>2535</b>

L- LIQUIDO, S- SOLIDO, SS- SEMISOLIDO.

Cantidad de residuos industriales, de acuerdo a su peligrosidad y estado físico en los estados de la República Mexicana; miles de toneladas/año.<sup>2</sup>

<sup>2</sup>Reunión del Control Ambiental; Departamento del Distrito Federal, Secretaría de la Defensa Nacional, 1989.



\* Desechos peligrosos. Se consideran a los desechos peligrosos, cuando por sus características corrosivas, tóxicas, venenosas, reactivas, explosivas, inflamables, biológicamente infecciosas o irritantes, representan un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente<sup>3</sup>. Estos desechos o combinación de los mismos representan un peligro potencial a corto y largo plazo para los seres vivos ya que éstos pueden no ser degradables o persistentes en la naturaleza, pueden ser letales, o de otro modo, causantes de efectos detrimentes acumulativos, cancerígenos o ecotóxicos. Comúnmente estos desechos se presentan en estado líquido, pero en ocasiones llegan a encontrarse en estado gaseoso, sólido o en lodos. Dentro de un punto de vista práctico, hay una gran cantidad de componentes, productos y combinaciones de los mismos que los caracterizan como desechos peligrosos, pero se pueden considerar cinco categorías generales:

- Desechos radioactivos.
- Desechos químicos.
- Desechos biológicos.
- Desechos explosivos.
- Desechos inflamables.

Desechos radioactivos. Desechos que contienen sustancias que emiten radiación de iones. Son peligrosos porque la prolongada exposición radioactiva daña a los organismos vivos, persisten por largos períodos de tiempo hasta que decae la actividad radioactiva. El manejo de los desechos de este tipo es estrechamente controlado por el Estado Federal. Los sitios de disposición que son usados para los desechos de estas características presentan extremas medidas de seguridad y no son usados para cualquier otro tipo de desechos.

Desechos químicos. La mayoría de los desechos químicos peligrosos pueden ser clasificados en cuatro grupos principales: Orgánicos sintéticos, metales inorgánicos, sales ácidas y bases; inflamables y explosivos. Son altamente tóxicos para la mayoría de los organismos vivos y su manejo requiere de sumo cuidado, ya que el principal vector de contaminación de estos desechos son los cuerpos de agua superficiales y subterráneos.

Desechos biológicos. La fuente principal de los desechos biológicos son los hospitales y las instalaciones de desarrollo biológico o experimental. las prin

3. Artículo 2º, capítulo I, título primero de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.

principales características que presentan estos desechos son la capacidad de producir toxinas e infectar a organismos vivos. Incluidos en este tipo de desechos se encuentran los tejidos muertos desechados de la actividad quirúrgica, materiales contaminados tales como jeringas hipodérmicas, gasas, eses, medicamentos caducos, animales muertos utilizados en experimentos, desechos de material de análisis clínicos, etc.

**Desechos explosivos.** Los desechos explosivos son los que por su composición poseen características detonantes, son de alto riesgo en su recolección, almacenamiento y disposición.

**Desechos flamables.** La mayoría de este tipo de desechos están identificados -- también dentro de los desechos químicos. Esta doble agrupación es necesaria para el manejo adecuado de los mismos.

**Identificación de los desechos peligrosos.** Para determinar si una sustancia o determinado material es peligroso, se deben tomar en cuenta los criterios que establece la Ley General del Equilibrio Ecológico en el reglamento correspondiente a la materia de residuos peligrosos. Debido a que el manejo de desechos peligrosos debe ser extremadamente especializado y que generalmente no es responsabilidad de quien diseña el sistema de manejo que involucra a los desechos sólidos municipales, y dado que el estudio de este tipo de desechos es particularmente extenso, el manejo de los mismos no entra dentro de los objetivos de este trabajo ( ver tabla 2.1.3 ).

\* Desechos de otro tipo. Para desechos cuyas características no los enmarca, o bien, son poco significantes para incluirlos dentro de las anteriores clasificaciones; y que en ciertas zonas o en alguna actividades está bien definidas - las características constitutivas y la magnitud de su generación, se consideraran, para llevar un adecuado manejo de ellos, los siguientes tipos:

**Desechos agrícolas.** Son los que resultan de diversas actividades agrícolas tales como la siembra y cosecha de verduras y vegetales; actividades como la cría de animales, operación de criaderos, granjas de explotación ganadera, etc.

**Desechos de construcción y demolición (cascajos).** Los desechos que resultan de la construcción, reparación, remodelación y demolición son denominados casca--

TABLA 2.1.3.

CONSTITUYENTES	CONCENTRACION MAXIMA PERMITIDA (mg/l)
ACRILONITRILLO	5.0
ARSENICO	5.0
BARIO	100.0
BENCENO	0.07
BIS (2 CLOROETIL) ETER	0.05
CAZMIO	1.0
CLORDANO	0.03
CLOROBENCENO	1.4
CLOROFORMO	0.07
CLORURO DE METILENO	8.6
CLORURO DE VINILO	0.05
M-CRESOL	10.0
O-CRESOL	10.0
P-CRESOL	10.0
CROMO	5.0
2.4-D	1.4
1.2-DICLOROBENCENO	4.3
1.4-DICLOROBENCENO	10.8
1.2-DICLOROETANO	0.40
1.1-DICLOROETILENO	0.1
2.4-DINITROTOLUENO	0.13
DISULFURO DE CARBONO	14.4
ENDRIN	0.003
FENOL	14.4
HEPTACLORO (Y SU EPOXIDO)	0.001
HEXACLOROBENCENO	0.13
HEXACLOROBUTADIENO	0.72
HEXACLOROETANO	4.3
ISOBUTANOL	36.0
LINDANO	0.06
MERCURIO	0.2
METILETILCETONA	7.2
METOXICLORO	1.4
NITROBENCENO	0.13
PENTAFLOROFENOL	3.6
PIRIDINA	5.0
PLATA	5.0
PLOMO	5.0
SELENIO	1.0
1.1.1.2-TETRAFLOROETANO	10.0
1.1.2.2-TETRAFLOROETANO	1.3
2.3.4.6-TETRAFLOROFENOL	1.5
TETRAFLORURO DE CARBONO	0.07
TOLUENO	14.4
TOXAFENO (CANFENO CLORADO TECNICO)	0.07
1.1.1-TRICLOROETANO	30.0
1.1.2-TRICLOROETANO	1.2
TRICLOROETILENO	0.07
2.4.5-TRICLOROFENOL	5.8
2.4.5-TP (SILVEN)	0.14

Constituyentes que hacen peligroso a un residuo por su toxicidad al ambiente.<sup>4</sup>

<sup>4</sup>Gaceta Ecológica, S.E.D.U.F., noviembre 1990.

jos. La generación varía de acuerdo al tipo y a la magnitud de la obra, pero la composición característica de este tipo de desechos está bien definida: la forman piedras, concreto, fragmentos de ladrillo, varilla y alambrón, yeso, - madera, alambre, material eléctrico, y otros. Se pueden generar en grandes cantidades; la identificación de las fuentes y la correcta canalización de estos desechos pudiera ahorrar o facilitar la adquisición de material de relleno en otras obras.

Desechos de jardinería. Son los que resultan del mantenimiento de jardines, - de la atención a áreas verdes del entorno urbano tales como parques, viveros, centros recreativos y de deporte, mantenimiento de áreas que forman parte de la infraestructura urbana (camellones, alamedas, corredores, etc.), entre otras.

El estudio de las características físico-químicas, de la composición y - de la generación de los desechos sólidos permitirá llevar a cabo en forma adecuada y eficiente el manejo de los mismos, previendo su comportamiento o los efectos que pueda ocasionar al ambiente y así poder encontrar las alternativas para evitar, controlar o mitigar los efectos adversos o daños a la ecología - y a la salud pública, en acorde con las normas vigentes de los organismos responsables de la salud y la protección ambiental, de las cuales trataremos brevemente a continuación.

## 2.2. REGULACION EN LA DISPOSICION FINAL DE LOS DESECHOS SOLIDOS MUNICIPALES EN RELLENOS SANITARIOS.

Debido a la reciente operación de los rellenos sanitarios en la Ciudad de México ( a partir de 1985 se realizaron los convenios con la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos para poner en marcha la preparación de la infraestructura requerida para la operación de un relleno sanitario en la zona federal del exlago de Texcoco llamada Bordo Poniente ) y dado el latente riesgo de contaminación ocasionado por el resultado de los procesos internos desarrollados dentro de un relleno sanitario ( principalmente la lixiviación de los desechos confinados ), se han elaborado normas técnicas de acuerdo con los criterios para prevenir y controlar la contaminación del suelo, el uso de los recursos naturales; y en general, la protección al ambiente, que establecen y regulan las acciones y criterios para llevar a cabo la construcción y operación de un relleno sanitario adecuadamente; para evitar o minimizar la contaminación del aire, agua y suelo.

Así, para la sección de los sitios destinados a confinar desechos sólidos municipales en rellenos sanitarios se deben considerar los siguientes criterios<sup>5</sup>:

- 1) Los rellenos sanitarios serán destinados a sitios donde el potencial de contaminación de aire, suelo y agua sea mínimo.
- 2) Las características geológicas del sitio; se determinan por las investigaciones del sitio incluyendo las respectivas pruebas. Esta información es necesaria para :
  - Determinar la capacidad, calidad y cantidad de terreno para cubrirlo con material de cubierta.
  - Evaluar la influencia de los factores geológicos tales como taludes, que deben ser considerados para una adecuada excavación.
  - Determinar el nivel máximo y normal de aguas subterráneas y los patrones de corrientes de aguas subterráneas.
  - Evaluar la importancia pública de la fuente de agua subterránea que será afectada por la operación
  - Determinar los posibles patrones de desplazamiento de gas metano, restringido con esto el uso del suelo en los lugares cercanos al flujo.

<sup>5</sup>Artículo 4° del Proyecto de Norma Técnica para reciclaje, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos municipales, S.E.D.U.E., 1988.

- 3) Un sitio no debe ser asignado para relleno si:
- El suelo tiene un alto contenido de humedad o si el área está sujeta a inundaciones.
  - No presentan una distancia mínima de 2 metros del punto más profundo de lixiviación al nivel más elevado de aguas subterráneas ( nivel freático máximo ) el período de mayor cantidad de agua en el nivel subterráneo.
  - Es inadecuado para evitar la contaminación de aguas para uso público.
- 4) No se utilizarán los sitios donde:
- Se perturbe la flora y fauna de la zona, o se altere la composición de la biota presente.
  - Se consideren parques nacionales, reservas ecológicas, santuarios y áreas protegidas de interés ecológico en general.
  - Se pueda contaminar cuerpos de agua como: lagunas, lagos, ríos, esteros, etc.
- 5) Se recomienda que preferentemente se ubiquen en minas a cielo abierto.
- En suelos con alto porcentaje de arcilla con una gran capacidad de intercambio catiónico ( 30 meq/100 g de suelo ).
  - Ubicarse fuera de vías de oleoductos, gasoductos y líneas de conducción eléctrica.
  - Fuera de áreas de influencia por aeropuertos y almacenamiento de hidrocarburos.

Por otro lado, para la selección del método constructivo y la forma adecuada de llevar a cabo la operación se establece lo siguiente<sup>6</sup>:

Para la elección del sitio se toma en cuenta la topografía del sitio, la composición del suelo del mismo y el nivel freático. Para el primer aspecto, el relleno puede operarse en cualquier tipo de topografía, donde se logre disponer de un mayor volumen de desechos sólidos municipales por hectárea. La composición del suelo debe ser tal que la permeabilidad de éste sea menor a  $10^{-5}$  cm/seg. de otro modo se tendrá que definir si se tiene que trasladar de otro sitio el material que mejore las condiciones del suelo en el que se cons

<sup>6</sup>Proyecto de Norma Oficial Mexicana NOM-084-ECOL-1994. Secretaría de Desarrollo Social, 1994. Proyecto de Norma Técnica Ecológica para el manejo de residuos sólidos municipales. SEDUE,-- 1988.

truirán las celdas. Por último, la profundidad mínima que debe tener el nivel freático del sitio es de 10 m, y si se desea extraer material de cubierta del mismo sitio ( método de trinchera ), se debe guardar la misma relación, entre la base de la celda y el nivel freático. Si este último se encuentra por arriba del límite mencionado, entonces se debe de diseñar o establecer un sistema natural o artificial de impermeabilización en la base de las celdas que reduzca la infiltración de lixiviados hacia los mantos de aguas freáticas.

De acuerdo con lo anterior se establece que el método constructivo o de operación de las celdas diarias debe de determinarse con base a las condiciones topográficas, geomorfológicas y geohidrológicas del terreno seleccionado, recomendando que el método constructivo sea:

- De área para terrenos con topografía sensiblemente plana. El material de cubierta es trasladado de un banco de material cercano, para aplicar este método se elevará el nivel por encima de la cota de inundación.
- De trinchera o zanja en terrenos con pendientes suaves y fáciles de excavar, donde el nivel freático es profundo (localizado a más de 10m de profundidad) y donde la permeabilidad del suelo sea igual o menor a  $10^{-5}$  cm/s.
- De rampa y de terrazas en cañadas, valles u oquedades naturales y artificiales.

Para la operación, se consideran los siguiente criterios<sup>7</sup>:

1) El relleno sanitario debe contar con un manual de operación en el cual se contemplen los siguientes aspectos:

- El horario de atención a personas y vehículos autorizados.
- Las formas de registro, control y pesaje de los vehículos que lleguen al relleno sanitario.
- Un programa de mantenimiento preventivo para cada equipo de trabajo.

Para la aplicación del material de cubierta se deben seguir las siguientes especificaciones<sup>8</sup>:

<sup>7</sup> Proyecto de Norma Técnica Ecológica para el manejo de residuos sólidos municipales, segunda parte. SEDUE, 1988.

<sup>8</sup> Proyecto de Norma Oficial Mexicana, NOM-084-ECOL-1994. Secretaría de Desarrollo Social, 1994.

- El espesor de la capa de material de cubierta para la celda diaria debe ser de 30 cm.
- El espesor de la capa final de material de cubierta debe ser de 60 cm.
- Si el sitio va a utilizarse, cuando éste haya cumplido su vida útil, - como parque recreativo o para fines agrícolas, se le adicionará una capa de tierra vegetal, de 15 a 20 cm de espesor, por encima de la cubierta final.
- El material de cubierta debe ser aplicado en todas las caras expuestas de las celdas, incluyendo terraplenes, talud frontal y flancos.
- El material de cubierta se colocará formando una pendiente suficiente- para permitir el drenaje del agua pluvial.

Como se indicó anteriormente, la operación de rellenos sanitarios, así - como se define, tiene pocos años de comenzar a llevarse a cabo; y mucho más recientes son las disposiciones establecidas en las Normas Técnicas Ecológi--cas en la materia de manejo y disposición de desechos municipales. Dichas normas establecen, además de los lineamientos mencionados, los fundamentos técnicos que refuerzan las especificaciones y los criterios de diseño establecidos, así como las acciones o procedimientos constructivos y de operación de los rellenos sanitarios.

Las normas para la disposición de los desechos municipales en rellenos - sanitarios son un instrumento más de las acciones que se han desarrollado en- materia ambiental para reducir los riesgos de contaminación y los grados de alteración del ambiente, así como la manifestación de impacto ambiental, la cual se presenta en la siguiente sección.



### 2.3. IMPACTO AMBIENTAL.

Se puede definir el impacto ambiental como el resultado de la alteración o modificación de las características naturales del ambiente y de los organismos que interactúan con él, debido a la acción del hombre y de la naturaleza. En términos de reglamento legal, es un instrumento de análisis que permite predecir los efectos que un proyecto puede tener sobre el medio ambiente; es decir, los cambios que determinadas acciones, obras o servicios podrían causar en el ambiente, con efectos en los organismos vivos y en las características de los recursos naturales.

El reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al ambiente, señala que " la realización de obras y actividades públicas o privadas que puedan causar desequilibrios ecológicos o rebasar los límites y condiciones señalados en los reglamentos y normas técnicas ecológicas emitidas -- por la Federación para proteger el ambiente, deberán sujetarse a la autorización previa del Gobierno Federal.... "9. Para tal efecto, los interesados en llevar a cabo dichas actividades u obras, deberán presentar como requisito para la autorización de éstas, la manifestación de impacto ambiental, que en estos términos, es el documento mediante el cual se dan a conocer, soportado por los estudios correspondientes, los efectos que generarán las obras durante su desarrollo y durante su operación, así como las medidas planteadas para evitar los o atenuarlos en caso de que sean negativos. Podría decirse que la manifestación de impacto ambiental es también un instrumento de planeación cuya elaboración repercute en beneficio del ambiente y del interesado en realizar el proyecto; ya que en su ejecución se analizan de manera detallada todas las etapas del proyecto, su entorno ambiental y la forma en que éste se modifica por la realización de cierta obra. Esto permite definir con anticipación los posibles deterioros ambientales y planear a tiempo las acciones que reducirán, compensarán o restaurarán los impactos ambientales asociados a las distintas fases del proyecto. Este análisis dotará a las autoridades correspondientes de fundamentos técnicos para autorizar o rechazar la realización de las obras del proyecto.

La manifestación de impacto ambiental se encuentra orientada a armonizar la realización de un proyecto con su entorno ambiental y, desde otro punto de vis-

<sup>9</sup> Artículo 28 de la Gaceta Ecológica del reglamento de Impacto Ambiental, SEDUE, junio 1989.

ta, puede entenderse como un estudio complementario a otros, o como otros que se realizan en las etapas previas consideradas para el diseño del proyecto. Estos estudios en conjunto proporcionan las bases para toma de decisiones acertadas. En general, se pueden citar entre los principales objetivos de una manifestación de impacto ambiental los siguientes:

- Ordenar las actividades productivas entre sí y éstas a su vez con el ambiente con el fin de garantizar que se minimice el deterioro del medio.
- Identificar los impactos ambientales adversos de un proyecto con el fin de prevenirlos o controlarlos con el diseño de mecanismos técnicos bajo los cuales se logre esto.
- Seleccionar las alternativas de proyectos que representen los menores costos ambientales.

#### • COMPONENTES DE LA MANIFESTACION DE IMPACTO AMBIENTAL.

La información que constituye la manifestación de impacto ambiental se puede resumir en los siguientes puntos;

- 1) Datos del responsable del proyecto, obra o actividad. Nombre, denominación social, nacionalidad y domicilio de quien pretende llevar a cabo el proyecto u obras sujeto de la manifestación.
- 2) Información general del proyecto u obra. Debe contener los objetivos y justificación del proyecto, ubicación, descripción de la obra proyectada en todas sus etapas ( desde la etapa de selección del sitio hasta la etapa de operación y mantenimiento ), la superficie de terreno requerido, el programa de obra, montaje de instalaciones y operación correspondiente, las inversiones necesarias tanto de recursos naturales como económicos en todas sus etapas constructivas y en la operación, y entre otras cosas, la vida útil del proyecto.
- 3) Descripción del medio. Aspectos detallados del medio natural y socio-económico del área o zona donde se pretenda desarrollar el proyecto o la obra, que incluye aspectos de estudio como : geología, geomorfología, climatología, hidrología, oceanografía, flora, fauna, asentamientos humanos, recursos y valores estéticos patrimoniales, entre otros.

- 4) Identificación, descripción y evaluación de los impactos ambientales que ocasionaría el proyecto en sus distintas etapas y sobre todos los rubros mencionados en el inciso anterior.
- 5) Medidas o acciones de prevención o mitigación de los impactos ambientales -- detectados.
- 6) Vinculación con las normas y regulaciones sobre el uso del suelo en el área correspondiente.
- 7) Descripción del escenario modificado.

Para la evaluación de la manifestación de impacto ambiental se consideran los siguientes elementos<sup>10</sup>

- El ordenamiento ecológico. Programación y evaluación del uso del suelo y manejo de los recursos naturales para preservar y restaurar el equilibrio ecológico y proteger el ambiente.
- Las declaraciones de áreas naturales protegidas. Areas en que el ambiente original no ha sido significativamente alterado por la actividad del hombre y que han quedado sujetas al régimen de protección federal.
- Los criterios ecológicos para la protección de la flora silvestre y acuática; para el aprovechamiento de los recursos naturales y para la protección del ambiente.
- La regulación ecológica de los asentamientos humanos.
- Los reglamentos y normas técnicas vigentes en las distintas materias que regula la Ley General del Equilibrio y Protección al Ambiente y demás ordenamientos legales en la materia.

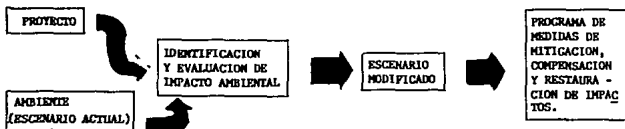
Al elaborar la manifestación de impacto ambiental existe la posibilidad de realizar estudios específicos, es por eso que resulta conveniente realizarla con suficiente anticipación a la elaboración del proyecto para que posteriormente no se tenga que efectuar modificaciones, necesarias para cumplir

<sup>10</sup> Artículo 16 de la Gaceta Ecológica en el reglamento de impacto ambiental, Junio 1989.

con los requerimientos normativos, que pudieran elevar el costo de la obra.

En la evaluación de estos aspectos participan las Direcciones Generales de Normatividad y Regulación Ecológica, de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental, de Conservación ecológica de los Recursos Naturales y de Desarrollo Urbano.

ESQUEMATIZACION DE LA COMPOSICION DE UNA MANIFESTACION DE IMPACTO AMBIENTAL



#### 2.4. MATRIZ DE IMPACTO AMBIENTAL.

La matriz de impacto ambiental es un arreglo de filas o renglones y columnas que relacionan las actividades que se desarrollarán durante la ejecución del proyecto u obra ( en cada una de sus etapas ) con cada una de las áreas o rubros donde se presenta o podría presentarse alteración y daño ( impacto ambiental ) en el entorno del proyecto; o que éste pueda ser causante de peligro a corto o a largo plazo para el hombre, u otros seres vivos y su ambiente.

En la matriz, cada actividad enlistada en los renglones o filas es interceptada con las columnas que las relacionan con las áreas que son o pueden ser susceptibles a alteraciones o cambios ocasionados por dichas actividades. Estas matrices son muy útiles para examinar las repercusiones de cada actividad en cada área de estudio y analizarla por separado o en conjunto. La intercepción de renglones y columnas será el espacio destinado para la " calificación ", codificación o indicación del dictamen del efecto de esa actividad en ese campo de estudio.

Las matrices se adaptan y adecúan de acuerdo al tipo de proyecto, obra o actividad y a las características del entorno donde se llevan a cabo.

Existen varios sistemas o métodos matriciales para identificar y evaluar el impacto ambiental que un proyecto podrían ocasionar. Entre los más comunes se encuentran los siguientes:

##### • SISTEMAS DE RED Y DE GRAFOS.

Estos sistemas corresponden a métodos de identificación que pertenecen a un análisis matricial causa-efecto principalmente representado por el método de Leopold. Estos métodos de evaluación preliminar, son métodos cualitativos, no cuantitativos, y analizan las relaciones de casualidad entre una acción y sus efectos sobre el medio. Estos sistemas son ideales para valorar cualitativamente varias alternativas de un proyecto ( para determinar la incidencia ambiental de un mismo proyecto en diferentes localizaciones, o con diversas medidas correctivas de varias escalas, empleando distintos procesos ). También son utilizados para evaluaciones preliminares, ya que permiten obtener una primera aproximación del impacto ambiental.

#### • METODO DE LEOPOLD.

Este fué el primer método que se estableció para la evaluación de impacto ambiental preparado para el Servicio Geológico del Ministerio del Interior de Estados Unidos. La base del sistema es una matriz en que las entradas, colocadas en columnas, fijan las acciones del hombre que pueden alterar el medio ambiente; y las entradas colocadas en filas determinan las características del medio ambiente (factores ambientales) que pueden ser alteradas. Con estas entradas en filas y columnas se pueden definir las interacciones existentes.

Un primer paso para la utilización de la matriz de Leopold consiste en la identificación de las interacciones existentes, para lo cual se consideran — primero todas las acciones (columnas) que pueden tener lugar dentro del proyecto en cuestión. Posteriormente, y para cada acción, se consideran todos los factores ambientales (filas) que pueden quedar afectados significativamente, trazando una diagonal en la cuadrícula correspondiente a la columna (acción) y fila (factor) considerada. Una vez hecho ésto para todas las acciones, estarán marcadas las cuadrículas que representan interacciones (o efectos) a considerarse. Cada cuadrícula admite dos valores:

- Magnitud del posible impacto, que se registra en la parte superior del cuadro dividido por la diagonal, según un número de 1 a 10, en el que el 10 corresponde a la alteración máxima provocado por el factor ambiental considerado y la alteración mínima (el cero no es válido).
- Importancia (ponderación), que da el peso relativo que el factor ambiental considerado tiene dentro del proyecto, o la posibilidad de que se presenten alteraciones. Este parámetro es calificado en la esquina inferior del cuadro dividido según una escala del 1 al 10; en donde 10 representa la máxima importancia y la mínima importancia del posible impacto (regional o local), el cero no es válido.

Los valores de magnitud van precedidos con un signo (+) o con signo (-), según se trate de efectos positivos o negativos sobre el medio ambiente.

Una vez llenas las cuadrículas, el próximo paso consiste en evaluar o interpretar resultados. Para simplificar el trabajo, es aconsejable operar con una matriz reducida en la que también se disponen en columnas las acciones y

en filas los factores ambientales entre los cuales existe una interacción. La matriz reducida final, representa una serie de valores que indica el grado de impacto de las acciones sobre los factores del medio. Los valores de los distintos cuadros que fueron registrados en la matriz no son comparables ni pueden sumarse o acumularse, a pesar de que se pondera la importancia. Sin embargo, se admite comparación en las cuadrículas correspondientes de las matrices preparadas para alternativas de un mismo proyecto.

La evaluación de los parámetros "magnitud" e "importancia" ha de hacerse, en lo posible, sobre la base de datos, cuyo sistema de procesamiento o interpretación para llegar a definir los valores magnitud e importancia, debe ir acompañado a la matriz, con la cual ésta se convierte en un número resumen del texto o estudio de impacto ambiental adjunto.

Según la especificación original de presentación del método, tales estudios detallados deben incluir, como cualquier estudio de impacto ambiental lo siguiente:

- \* la descripción y los datos técnicos suficientes para evaluar el impacto ambiental.
- \* El impacto ambiental probable del proyecto sobre el medio.
- \* Los probables efectos adversos que no pueden evitarse.
- \* Las alternativas existentes para mitigar los efectos adversos.
- \* La relación entre el uso del medio local por el hombre, a corto plazo, y el mantenimiento y aumento de productividad a largo plazo.
- \* La irreversibilidad y falta de recuperación de los recursos afectados.
- \* Las objeciones planteadas por terceros.

	a	b	c	d	e	f	EVALUACION
1	2 1	4 2				6 5	
2		7 2		8 8	9 7		
3		1 3	5 3	3 3	9 7	7 2	
EVALUACION							

Ejemplo ilustrativo de la estructuración de la matriz de identificación de impacto ambiental.

• MATRIZ DE CRIBADO.

Se usan para identificar y analizar las interacciones que se presentan entre las diversas acciones del proyecto y los efectos del ambiente potencialmente afectados, utilizando para estos; nomenclaturas indicativas sobre el diagnóstico establecido, registrado sobre las cribas o mallas realizadas.

Las actividades que se registran en estas matrices involucran 4 principales fases (esto en caso de una obra, en el caso de otro tipo de actividades - la matriz se puede adecuar) enlistadas a continuación:

- 1.- Localización y preparación del sitio donde se planea realizar la obra.
- 2.- Construcción.
- 3.- Operación " mantenimiento.
- 4.- Actividades futuras relacionadas.

Las áreas generales que se consideran, en las que se pueden presentar --- efectos ambientales son principalmente las siguientes:

- Areas físico-química ( agua, suelo, atmósfera, ruido ).
- Area ecológica ( flora, fauna y habitats ).
- Area estética ( composición ).
- Area socio-económica ( tenencia de la tierra, salud pública, recreación, trabajo, etc. ).

En la matriz se visualizan las actividades que no ocasionarán efectos en el ambiente, aquellas que lo afectan pero en el que se puede aplicar alguna medida de atenuación; aquellas cuyos efectos potenciales no se conozcan con exactitud y las actividades que produzcan efectos significativos sobre el ambiente.

Algunos parámetros que pueden usarse para la evaluación de impacto ambiental utilizados para este tipo de matrices y cuya interrelación es muy estrecha se indican a continuación:

- A) Magnitud: Definida como el grado de severidad del impacto potencial, relacionado también con la reversibilidad el mismo.
- B) Durabilidad: Se refiere a el período de tiempo en el que el impacto puede - extenderse y los efectos acumulativos que se presenten por el entrecruzamiento de otro impacto en ese tiempo.



- C) **Plazo y Frecuencia.** Esto relacionado al hecho de que un impacto ambiental se manifieste a corto o a largo plazo y, cuando el impacto es intermitente ( en diferentes periodos de tiempo ) si se logra la recuperación del área afectada.
- D) **Riesgo.** La probabilidad de un efecto ambiental serio. El conocimiento exacto del riesgo depende de las actividades del proyecto o la obra y del área de influencia.
- E) **Mitigación.** Las soluciones o acciones factibles para atenuar los impactos ambientales que se presenten.

Las actividades específicas sobre las áreas que pueden ser afectadas por ellas se evalúan para tomar las decisiones en cuanto al valor de los efectos identificados. La nomenclatura indicativa utilizada para la evaluación de estas matrices de acuerdo a los criterios mencionados pueden representar los siguientes diagnósticos:

- No existen efectos adversos. Se indica de acuerdo a observaciones y deducciones que resultan obvias de alguna acción o actividad que no ejerce influencia sobre alguna área o rubro específico en donde los efectos ambientales son nulos.
- Existen efectos poco potenciales considerados poco significativos. Esta indicación debe estar fundamentada o sostenida por el punto de vista normativo de la Subsecretaría de Ecológica o por estudios técnicos especializados del área de estudio.
- No se conocen efectos adversos potenciales. Para acciones cuyo efecto resulta desconocido. Posteriormente, esto servirá de base para futuras investigaciones al respecto con el objeto de evaluar concretamente los posibles efectos.
- Existen efectos significativos. Esta indicación es basada en el sentido común, la experiencia y a los estudios técnicos correspondientes que determinarán que tan significativo es el efecto.

La aplicación de las matrices para la evaluación preliminar del impacto ambiental tienen algunas ventajas y desventajas. Entre las primeras, son po-

cos los medios y mucha la facilidad para la identificación de los efectos, ya que contempla los aspectos físicos, biológicos y socioeconómicos involucrados; se ajusta o adecúa a cada obra, proyecto o actividad, planeando e identificando los efectos de cada acción enfocando debidamente el objeto de estudio, permite realizar algunas modificaciones al proyecto a buen tiempo si existiera el caso de que no se cumplan, en el proyecto original, las disposiciones o Normas Técnicas establecidas por los organismos correspondientes al campo sanitario y ambiental. Por otro lado, como desventajas de estos sistemas ( las matrices ); tenemos que son bastantes subjetivos puesto que no existen criterios de evaluación estandarizados; por esto mismo se consideran la matrices de impacto ambiental como un estudio preliminar cuyo soporte técnico debe ser realizado posteriormente con mayor profundidad.

En las figuras 2.4.1. y 2.4.2. pueden observarse las características típicas de una matriz de impacto ambiental.

La selección del relleno sanitario como método de disposición final involucra ( como ya se vio en las secciones anteriores ), los aspectos técnicos, -- económicos, ambientales y sociales, los cuales deben considerarse para la planeación, diseño, construcción y operación de las celdas de confinamiento. La evaluación de impacto ambiental es un instrumento en donde se pueden resumir todos estos aspectos y visualizar en forma general los pros y los contras de un sitio destinado a la disposición de desechos.

Con relación a los impactos que pudieran presentarse en la zona de Bordo Poniente, resaltan los riesgos de contaminación de los mantos freáticos y los asentamientos diferenciales que pueden ocasionar fallas estructurales del terreno, principalmente. Aunque las características de saturación e impermeabilidad del suelo sean favorables para reducir el paso de contaminación, no deja de ser factible la penetración de lixiviado a través de los agrietamientos ocasionados por las fallas inducidas por la sobrecarga del terreno.

Los estudios que se han realizado en la zona de Bordo Poniente para efecto de disposición de desechos han considerado que esta zona, a pesar de sus inconvenientes, es adecuada para disponer de los desechos siempre y cuando se tomen las medidas necesarias para mitigar los efectos de los que hemos hablado.



FIGURA 2.4.2.

IMPLICACIONES FISICAS, BIOLÓGICAS Y PAISAJÍSTICAS.	OPERACIONES PRODUCTORAS POTENCIALES DE IMPACTOS.										
	Alteraciones de la estructura de la vegetación	Alteraciones de la estructura de la fauna	Alteraciones de la estructura de la flora	Alteraciones de la estructura de la fauna acuática	Alteraciones de la estructura de la flora acuática	Alteraciones de la estructura de la fauna terrestre	Alteraciones de la estructura de la flora terrestre	Alteraciones de la estructura de la fauna aérea	Alteraciones de la estructura de la flora aérea	Alteraciones de la estructura de la fauna acuática aérea	Alteraciones de la estructura de la flora acuática aérea
<b>1.- CLIMA</b>											
- Alteración del régimen térmico											
- Alteración del régimen pluviométrico											
- Alteración del régimen de evapotranspiración											
- Alteración del régimen de humedad											
- Alteración del régimen de vientos											
- Alteración del régimen de radiación											
- Alteración del balance hídrico											
- Alteración del balance energético											
- Cambio de la actitud climática											
<b>2.- FAUNA</b>											
<b>2.1.- Especies, especies individuales</b>											
- Pérdida o alteración de poblaciones de interés comercial, deportivo, científico, etc.											
- Eliminación o reducción de especies raras o en peligro de extinción											
- Proliferación de ciertas especies en exceso excesivo											
- Alteración de la diversidad											
- Introducción de especies exóticas											
- Proliferación de insectos, roedores y aves que causan perjuicios											
<b>2.2.- Hábitats</b>											
- Alteración o eliminación de hábitats terrestres											
- Alteración o eliminación de hábitats acuáticos o zonas húmedas											
- Desplazamiento o concentración de especies e individuos											
<b>3.- VEGETACIÓN</b>											
- Inducción de cambios en la composición de la cubierta vegetal											
- Eliminación o reducción de la cubierta vegetal											
- Aumento del riesgo de incendios											
- Proliferación de especies exóticas											
- Dificultades para la generación											
- Disminución de la producción											
<b>4.- PUNICIONAMIENTO</b>											
- Alteración de las zonas alimentarias											
- Alteración de lugares singulares culturalmente significativos											
- Pérdida de paisajes de gran calidad											
<b>Componentes del paisaje</b>											
- Eliminación de componentes de gran valor incremental											
- Inclusión de componentes de paisaje de menor valor (setos, etc.)											
- Alteración del entorno y condiciones de observación de componentes singulares											
- Intervención en zonas ajenas a la instalación (terceros, carreteras, etc.)											
<b>Elementos visuales</b>											
- Contraste de color, forma, línea y textura											
- Dominancia visual por escala											
- Intervención por posición											

Evaluación de impacto ambiental para actividades específicas productoras potenciales de impactos.<sup>12</sup>

En la figura 2.4.3 se presenta la matriz de impacto ambiental correspondiente a una evaluación preliminar. En dicha matriz, la columna de verificación se divide en dos secciones: A y B, la primera considera el impacto ambiental dado por el conjunto de acciones humanas llevadas a cabo en el área del Lago de Texcoco, las cuales se dividen en:

- 1.- Desecación progresiva.
- 2.- Presión urbana constante, habitacional y de vías de comunicación, -- principalmente.
- 3.- Incurción de aguas negras en toda el área lacustre actual.
- 4.- Implementación del proyecto vertedero-relleno sanitario.

La columna B considera sólo el impacto en el medio proveniente del tiradero-relleno sanitario; se consideran los efectos en un área circundante específica al tiradero-relleno.

Las observaciones aclaran el enfoque tomado para la calificación del parámetro considerado.

Como se mencionó oportunamente, la matriz de impacto ambiental representa una forma de evaluación preliminar y ésta, para efectos de justificación de -- proyectos, debe estar acompañada de estudios profundos de los impactos posibles o presentes, ocasionados en las distintas áreas ambientales y socio-económicas por determinadas acciones u obras. Para el caso de la matriz a la que anteriormente se hizo referencia, el estudio de impacto ambiental<sup>13</sup> que la complementa, presenta conclusiones del impacto ambiental, en el aire, suelo y agua; de las cuales enlistamos algunas:

#### IMPACTO AMBIENTAL EN AIRE.

El impacto en la calidad del aire causado por el conjunto tiradero relleno sanitario se debe principalmente al desprendimiento de gases. En el caso -- del área de estudio, al no existir un sistema de extracción adecuado, el gas se difunde atravesando la cubierta de tierra con facilidad difundiendo en un vo lumen y velocidad mayor. Con lo anterior, y de acuerdo a la dirección predominante del viento, se concluye que los efectos sobre el aire es severo sólo en las colonias de Plaza Aragón representados por olores desagradables y el arra tre de partículas de polvo.

<sup>13</sup> Dirección Técnica de Desechos Sólidos, D.D.F., 1987.



#### IMPACTO AMBIENTAL EN SUELO.

Dado que el suelo natural (suelo salino sódico) de Bordo Poniente ya había sido severamente contaminado por la inundación de aguas negras, la contaminación del mismo por efecto de la disposición de desechos es puntual, y cuando más, abarca los terrenos que rodean los sitios por la percolación del lixiviado.

Las micelas coloidales del suelo se saturan eventualmente con los cationes más afines a ellas, hasta la capacidad de intercambio catiónico.

Por exceso de carga en la zona del tiradero, ha habido una gran compactación y se presenta severa consolidación con yacimientos de lixiviado en los límites del mismo.

#### IMPACTO AMBIENTAL EN AGUA.

Debido a que los principales cuerpos de agua superficial son de aguas negras, por la gran profundidad a que se encuentran los mantos acuíferos y por la saturación e impermeabilidad del suelo del sitio, puede concluirse que el impacto a la hidrología de la zona es mínimo.

Cabe señalar que el análisis de impacto ambiental que se llevó a cabo en la zona de Bordo Poniente, fue realizado considerando como obra un tiradero semicontrolado; con el proyecto de relleno sanitario los efectos al ambiente resultan menos significativos, pero valdría el caso de desarrollar un estudio de impacto ambiental para las condiciones actuales en que se desarrollan, o se deban desarrollar las obras de disposición de desechos sólidos municipales en rellenos sanitarios.

### CAPITULO III. VARIABLES BASICAS PARA EL DISEÑO.

El presente capítulo revisaremos los parámetros básicos que se deben considerar para el dimensionamiento de las celdas de confinamiento y en general, de todos los elementos necesarios para llevar a cabo la adecuada construcción y operación de un relleno sanitario.

El análisis numérico es desarrollado de acuerdo con los criterios y fundamentos establecidos por la bibliografía ( en su momento indicada ) y a las experiencias obtenidas en la construcción y operación de rellenos sanitarios llevados a cabo principalmente en Estados Unidos.

Las expresiones que aquí se reproducen se aplican en el siguiente capítulo, considerando los datos correspondientes a la situación actual de los desechos sólidos municipales que se generan en la Ciudad de México y a las necesidades reales de disposición; tomando en cuenta las características del sitio - destinado al confinamiento de desechos; y por supuesto, las recientes disposiciones, que a nivel ecológico o ambiental, han emitido las autoridades correspondientes.



### 3.1. GENERACION DE DESECHOS SOLIDOS MUNICIPALES.

La cantidad de desechos generados por una población específica varía, como se mencionó antes, con la localidad, el clima, temporada del año y el estrato socioeconómico de la población. Así mismo, estos factores también dan características especiales a la composición física y química de los desechos.

Como dato de diseño, la generación de los desechos es la variable principal, no sólo para el proyecto del relleno sanitario, sino para la planeación de todo el sistema de manejo de desechos sólidos ( recolección, estaciones de transferencia, tratamiento y disposición final).

Debido a que el volumen de los desechos sólidos varía de acuerdo a su composición y a sus características físicas ( densidad afectada principalmente por el contenido de humedad y la capacidad de compactación de los desechos ),- la generación es manejada en toneladas/día.

Dado el nexo que existe entre la población y la generación de desechos que ésta produce, resulta obvio que el aumento de la primera da como consecuencia el incremento de la segunda. El número que relaciona estos dos parámetros es el índice de generación, también llamado índice de generación per-capita, definido como la cantidad ( en kilogramos ) de desechos generados por habitante al día. La generación per-capita nacional promedio está estimada en 0.539 kilogramos/habitante/día<sup>1</sup>, en la Ciudad de México este valor se encuentra entre 0.585 y 0.945, lo que en promedio resulta un valor de 0.76 kg/hab/día<sup>2</sup>.

#### PROYECCION A FUTURO DE LA POBLACION Y DE LOS DESECHOS SOLIDOS.

Un proyecto de disposición final de desechos sólidos en un relleno sanitario debe contemplar el crecimiento a futuro de la población, ya que este incremento acentúa las necesidades de atención en la recolección y en la disposición final de los desechos generados. El cálculo de la población a futuro o las proyecciones de crecimiento urbano, pueden realizarse con los diversos métodos estadísticos utilizados para este fin ( ver tabla 3.1.1 ).

Con los datos de la población proyectada podemos calcular la correspondiente generación de desechos; bastará con multiplicar el número de habitantes calculado, por el índice de generación para obtener un dato aproximado.

<sup>1</sup>S.M.I.S.A.C. VII Congreso Nacional. Cocoyoc, 1992.

<sup>2</sup>D.D.F, D.G.S.U., Dirección Técnica de Desechos Sólidos, 1990

TABLA 3.1.1.

METODO DE CALCULO	EXPRESSION MATEMATICA	TIPO DE CRECIMIENTO	APLICACION
ARITMETICO	$Y_m = Y_2 + (Y_2 - Y_0) \frac{t_m - t_2}{t_2 - t_0}$	$\frac{(dy)}{(dt)} = K_a$	CUANDO LA VARIACION DE LA POBLACION EN AÑOS ANTERIORES SIGUE UNA TENDENCIA CONSTANTE.
GEOMETRICO	$\log Y_m = [\log Y_2 + \log \frac{Y_0}{Y_2}] \frac{t_m - t_2}{t_2 - t_0}$	$\frac{(dy)}{(dt)} = K_g Y_m$	CUANDO EL CRECIMIENTO ES PROPORCIONAL AL TAMAÑO DE LA POBLACION.
INCREMENTOS DIFERENCIALES	$Y_m = \frac{ct^2}{2} + C_1t + C_2$	$\frac{(dy)}{(dt)} = Ct + C_1$	CUANDO EL CRECIMIENTO DE POBLACION ES PROPORCIONAL AL TIEMPO. ES APLICABLE CUANDO LAS SEGUNDA DIFERENCIAS DE POBLACION SON APROXIMADAMENTE CONSTANTES.
MALTHUS	$Y_m = Y_2 e^{c(t_m - t_2)}$	$\ln(dy) = dtK$	CUANDO EL CRECIMIENTO POBLACIONAL EN AÑOS ANTERIORES SIGUE UNA CIERTA TENDENCIA EXPONENCIAL NO LINEAL.
LOGISTICO	$Y_m = \frac{L}{1 + M e^{-Nt}}$ PARA TRES PARES DE VALORES DE TIEMPO Y POBLACION $L = \frac{\{2Y_0 Y_1 Y_2 - Y_0^2(Y_0 + Y_2)\}}{Y_0 Y_2 - Y_1^2}$ $M = \frac{L - Y_0}{Y_0}$ $N = \frac{1}{t_1} \ln \left\{ \frac{Y_0(L - Y_1)}{Y_1(L - Y_0)} \right\}$ DONDE "t1" CORRESPONDERA AL PUNTO DE INFLEXION DE LA CURVA "S".	$\frac{(dy)}{(dt)} = \frac{Y_m}{L} (L - Y_m)$	CUANDO LA CURVA DE LA POBLACION CONSTRUIDA CON LA INFORMACION GENERAL DE AÑOS ANTERIORES, PRESENTA UNA FORMA SIMILANTE A UNA "S". LO ANTERIOR SE DEBE A QUE LA RAPIDEZ INSTANTANEA DE CRECIMIENTO ES PROPORCIONAL AL COCIENTE DE POBLACION EN EL MOMENTO CONSIDERADO (Ym/L). SIEMPRE TAMBIEN PROPORCIONAL A LO QUE FALTA POR CRECER PARA ALCANZAR ESE VALOR DE SATURACION (L - Ym).
INCREMENTOS CONSTANTES	$Y_m = Y_2 (1 + Tc)^n$ $Tc = \sqrt[n]{\frac{Y_2}{Y_0}} - 1$	$\frac{(dy)}{(dt)} = Tc$	CUANDO LOS INCREMENTOS ANUALES NO VARIAN O LA VARIACION NO ES SIGNIFICANTE Y SE CONSIDERA QUE PERMANECE CONSTANTE EN "n" AÑOS.
GRAFICO		SE ADAPTA A CUALQUIER TIPO DE CRECIMIENTO DE LA POBLACION	APLICABLE A CUALQUIER TIPO DE CRECIMIENTO POBLACIONAL YA QUE CONSISTE EN GRAFICAR LOS REGISTROS DE POBLACION, PROLONGANDO LA CURVA DE ACUERDO CON LA TENDENCIA GENERAL DE LA MISMA.
$Y_0$ : POBLACION DE PROYECTO $Y_2$ : POBLACION DEL ULTIMO CENSO $Y_1$ : POBLACION DEL PRIMER CENSO $Y_2$ : POBLACION CORRESPONDIENTE AL PUNTO DE INFLEXION DE LA CURVA "S". $L$ : POBLACION DE SATURACION.	DESCRIPCION DE VARIABLES. $t_m$ : AÑO CORRESPONDIENTE A LA POBLACION DE PROYECTO. $t_2$ : AÑO CORRESPONDIENTE AL PRIMER CENSO. $t_0$ : AÑO CORRESPONDIENTE AL ULTIMO CENSO. $t_1$ : AÑO CORRESPONDIENTE AL PUNTO DE INFLEXION DE LA CURVA "S".	$Tc$ : TASA DE INCREMENTO ANUAL $n$ : NUMERO DE AÑOS DEL INTERVALO ENTRE CENSOS. $C, C_1, C_2$ : CONSTANTES ADIMENSIONALES $M, N$ : COEFICIENTES DE LA CURVA "S" $(dy/dt)$ : VARIACION DE LA POBLACION $K, K_g, K_a$ : CONSTANTES ADIMENSIONALES.	

Métodos para el cálculo de población a futuro<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Métodos de análisis para el manejo de residuos sólidos, SEDUE, 1988.  
 Proyecto Interdisciplinario del Medio Ambiente. IPN, 1987 (recopilación).

Por otro lado, el incremento de los desechos también puede calcularse a partir de la generación actual, considerando el incremento anual de los desechos; lo que se podría expresarse de la siguiente manera:

$$G_f = G (1 + i)^n \quad (1)$$

en donde:

$G_f$  es la generación de desechos proyectada a futuro ( en ton/día ).

$G$  es la generación actual ( en ton/día ).

$i$  es el incremento anual de la generación de desechos ( en % ).

$n$  es el número de años a proyectar.

Para la aplicación de la ecuación anterior los incrementos anuales considerados deben ser constantes.

En las tablas 3.1.2 se se registran los resultados de la expresión ( 1 )- para una proyección de 20 años a partir de los datos observados en 1990, de la generación de desechos sólidos municipales en la Ciudad de México. Paralelamente, también se incluyen en ellas la proyección de la población de esta ciudad, aplicando la ecuación de los incrementos constantes, contenida en la tabla 3.1.1.

TABLA 3.1.2.

AÑO	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
POBLACION ( Habo )	8235744	8403753	8575189	8750123	8928626	9110770	9296629
GENERACION	TON/DIA	12000.0	12360.0	12730.6	13112.7	13506.1	13911.3
	m <sup>3</sup> /DIA	52123.91	53739.13	55351.30	57011.84	58722.2	60483.8
DESECHOS A DISPOSICION PROMEDIOS ( m <sup>3</sup> /DIA )	37043.5	38154.8	39299.4	40478.4	41692.7	42943.5	44231.85

Continuación

AÑO	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
POBLACION ( Habo )	9486281	9679801	9877265	10078765	10284372	10494173	10708254
GENERACION	TON/DIA	14758.5	15301.2	15657.3	16126.9	16610.8	17109.3
	m <sup>3</sup> /DIA	64167.3	66092.3	68075.1	70117.4	72220.9	74387.5
DESECHOS A DISPOSICION PROMEDIOS ( m <sup>3</sup> /DIA )	45558.8	46925.5	48333.3	49783.3	51276.8	52815.1	54399.6

Continuación

AÑO	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
POBLACION ( Habo )	10926702	11149607	11377059	116091517	11845978	12087636	12334224
GENERACION	TON/DIA	18151.1	18695.6	19256.5	19834.2	20429.2	21041.1
	m <sup>3</sup> /DIA	78917.7	81285.2	83723.8	86235.5	88822.6	91487.3
DESECHOS A DISPOSICION PROMEDIOS ( m <sup>3</sup> /DIA )	56031.6	57712.5	59443.9	61227.7	63064.0	64955.9	66904.6

Proyecciones a futuro de la población y de la generación de desechos en el D. Federal.

<sup>4</sup> Considerando una tasa de crecimiento del 2.04% calculada con la expresión indicada arriba.

<sup>5</sup> Considerando un incremento anual del 3%, un porcentaje de recolección del 90% y el 19% de reciclaje.

<sup>6</sup> Considerando una densidad promedio de 230 kg/m<sup>3</sup> (D.T.D.S., D.D.F., 1990.).

Por otro lado, para el diseño y la planeación del sitio de confinamiento, se requiere tener una idea más precisa de la cantidad neta de desechos que van a llegar al sitio de disposición; por eso hay que considerar algunos factores que van a determinar la magnitud de los desechos a confinar, tales como la eficiencia en la recolección de desechos, los porcentajes de tratamiento<sup>7</sup> y reciclaje de los mismos ( ver tabla 3.1.3 ) y la proporción de cada una de las fuentes de los desechos sólidos municipales ( tabla 3.1.4 ).

De acuerdo con los criterios anteriores, la cantidad neta de desechos a disponer se puede calcular con la siguiente expresión:

$$D_n = G ( \xi - R ) \quad ( 2 )$$

en donde:

$D_n$  es la cantidad de desechos a disponer, en ton/día.

$G$  es la generación de desechos sólidos municipales, en ton/día.

$\xi$  es la eficiencia de recolección de desechos, en %; y

$R$  es el porcentaje de desechos que son reciclados y/o aprovechados ( por cualquier proceso ), en %.

#### CARACTERISTICAS FISICOQUIMICAS DE LOS DESECHOS SOLIDOS MUNICIPALES.

El conocimiento de las características físicas tales como la densidad, -- contenido de humedad, cantidad y tipo de subproductos; y la composición química ( porcentajes de carbono, hidrógeno, fósforo, principalmente, y el pH ) de los desechos sólidos, es de suma importancia para la planeación; diseño y operación de los sistemas de manejo de los mismos, lo que incluye la selección y operación de instalaciones, equipo para recolección, tratamiento y disposición final. En los países desarrollados ( principalmente en Europa y América del Norte ), gracias al interés por el conocimiento de las características de los desechos, y por supuesto a los recursos, se ha incrementado considerablemente el reciclaje y el composteo ( ver cuadro 3.1.5 ).

#### DENSIDAD.

Es la cantidad de masa ( en peso ) por unidad de volumen. Esta varía significativamente con la localización geográfica, temporada del año que altera -

<sup>7</sup> Consideramos dentro del término tratamiento a los procesos de composteo, incineración o cualquier otro manejo que no sea el confinamiento de desechos.

TABLA 3.1.3.

DISPOSICION FINAL	%
* RECICLAJE	
• Cartón	2.43
• Papel	4.62
• Vidrio	5.59
• Lata	1.36
* INCINERACION Y COMPOSTEO	5.0
* RELLENO SANITARIO	81.0

Porcentaje del destino final de los desechos sólidos municipales en el Distrito Federal.<sup>8</sup>

TABLA 3.1.4.

FUENTE	%
- DOMICILIARIA	67.7
- COMERCIOS	16.2
- MERCADOS	6.1
- UNIDADES MEDICAS	
- LABORATORIOS	0.03
- AREAS PUBLICAS	1.19
- TERMINALES DE TRANSPORTE (Aereo y Terrestre)	0.34
- CENTROS DE READAPTACION SOCIAL	
- OFICINAS	3.62
- OTROS	8.59

Porcentajes de las fuentes que conforman los desechos sólidos municipales en el Distrito Federal.<sup>9</sup>

CUADRO 3.1.5.

PAIS	DISPOSICION FINAL			OPCIONES DE APROVECHAMIENTO DE LOS DESECHOS SÓLIDOS		OBSERVACIONES*
	RELLENO SANITARIO	INCINERACION	OTRO	COMPOSTEO	RECICLAJE	
E.U.A.	73%	14%	-	1%	12%	A
JAPON	27%	25%	-	2%	46%	B
ALEMANIA	52%	30%	-	3%	15%	C
FRANCIA	48%	40%	-	10%	3%	D
SUECIA	40%	52%	-	5%	4%	E
AMERICA LATINA	35%	5%	55%	1%	3%	F

Tabla comparativa del destino final (disposición final) de los desechos municipales formada con algunos de los países más desarrollados y la región de América Latina.<sup>10</sup>

\*A: Se puede encontrar aquí una marcada tendencia por el uso del relleno sanitario, un equilibrio en los sistemas de incineración y reciclaje como alternativas de disposición final, y un porcentaje de composteo significativamente bajo (A pesar de que existen muchas plantas de composteo operando en este país, sólo se reporta el 1% del total de desechos que son composteados; esto debido a la baja proporción de materia orgánica que presentan los desechos).

ByC: Japón y Alemania tienen elevados porcentajes de reciclaje e incineración de desechos, respectivamente, a consecuencia de esto, los porcentajes de uso del relleno sanitario disminuyen considerablemente.

DyE: En estos países llama la atención el elevado porcentaje de composteo de desechos sólidos (en comparación con los otros países) y un mayor equilibrio entre los sistemas de disposición final; lo que representa los sistemas de manejo de desechos más ventajosos.

F: La columna marcada con "otro" hace referencia a tiraderos a cielo abierto y semicontrolados.

<sup>8</sup>Dirección Técnica de Desechos Sólidos, D.G.S.U., D.D.F., 1990.

<sup>9</sup>Idem.

<sup>10</sup>Organización Mundial para la Salud, 1991.

el contenido de humedad, así como el tiempo de almacenamiento de los desechos que determina el grado de compactación de los mismos. Por lo anterior, se debe tener cuidado en la elección y en el uso de los valores de densidad promedio - registrados ( ver tabla 3.1.6 ); por ejemplo, los desechos que han sido transportados en vehículos compactadores, han registrado una densidad que varía entre 200 y 400 kg/m<sup>3</sup>. Estos datos también dependen de la fuente y del tipo de los de se chos.

#### CONTENIDO DE HUMEDAD.

Comúnmente se expresa en porcentaje, y está definida como el peso del agua contenida por unidad ( también en peso ) de materia. Dicho de otro modo, el con tenido de humedad es el porcentaje del peso húmedo del material, lo que se for mula como sigue:

$$C_h = \frac{(a - b) 100}{a} \quad ( 3 )$$

en donde:

$C_h$  es el contenido de humedad, en %.

$a$  es el peso inicial de la muestra.

$b$  es el peso de la muestra seca ( tanto  $a$  como  $b$  en unidades de peso acordadas entre ellas ).

El contenido de humedad también depende de la temporada del año ( grado de humedad dado por las condiciones meteorológicas ) y la composición física de los desechos. En la tabla 3.1.7 se tienen registrados valores promedio del con tenido de humedad de los diferentes subproductos que forman los desechos municipales de la Ciudad de México.

#### COMPOSICION FISICA.

La variedad y cantidad de subproductos ( elementos que constituyen los desechos ) dependen de las fuentes generadoras. No tienen las mismas características los desechos generados en un mercado público, un restaurante o una oficina; a los que se generan en cualquier hogar común. Pero como lo indicamos antes, los desechos municipales los conforma una mezcla de desechos provenientes, entre otras, de dichas fuentes. Estos desechos son transportados hacia los sitios

TABLA 3.1.6.

SUBPRODUCTOS Y CARACTERISTICAS FISICAS	DENSIDAD (KG / M <sup>3</sup> )	
	RANGO	TIPICO
MATERIA ORGANICA MUY HUMEDA	616 - 1008	730
MATERIA ORGANICA NO COMPACTADA (48% DE HUMEDAD)	200 - 260	240
MATERIA ORGANICA COMPACTADA	300 - 450	437
CARTON	120 - 200	150
PAPEL COMPACTADO	150 - 230	180
PAPEL NO COMPACTADO	95 - 120	100
VIDRIO FRAGMENTADO	370 - 450	400
VIDRIO PARCIALMENTE ROTO	170 - 300	260
HULE Y PLASTICO COMPACTADO	105 - 150	135
POLVO Y CENIZAS	60 - 150	110
DESECHOS ALMACENADOS (ANTES DE RECOLECTAR)	170 - 280	230
DESECHOS MUNICIPALES CONFINADOS (COMPACTACION REGULAR)*	350 - 500	450
DESECHOS MUNICIPALES CONFINADOS BIEN COMPACTADOS*	420 - 800	700

Densidades promedio de desechos con diferentes características.<sup>11</sup>

\*Compactación realizada con equipo convencional en una celda típica de los rellenos sanitarios.

TABLA 3.1.7.

SUBPRODUCTOS.	CONTENIDO DE HUMEDAD (X)		COMPOSICION EN PESO (X)	
	RANGO	TIPICO	RANGO	TIPICO
MATERIA ORGANICA	50 - 80	70	40 - 60	55.0
PAPEL	4 - 10	6	10 - 15	12.5
CARTON	4 - 8	5	2.5 - 4	3.4
PLASTICO	1 - 4	2	2.5 - 4	3.1
TEXTILES	6 - 15	10	0.4 - 0.67	0.53
HULE	1 - 4	2	0.3 - 0.5	0.35
CUERO	8 - 12	10	0.1 - 0.25	0.15
DESECHOS DE PODA	30 - 70	60	2.5 - 5.1	3.2
MADERA	15 - 40	20	0.1 - 0.25	0.15
VIDRIO	1 - 4	2	4.0 - 7.0	5.5
LATA	2 - 4	3	1.0 - 3.0	1.5
METALES FERROSOS	2 - 6	3	1.5 - 3.0	1.6
METALES NO FERROSOS	2 - 4	2	0.05 - 0.1	0.08
POLVO, CENIZAS	15 - 40	20	5.3 - 9.7	6.5

Contenido de humedad y composición física de subproductos de los desechos sólidos-municipales.<sup>12</sup>

<sup>11</sup>Herz R. y R. Stone, Special Studies of Sanitary Landfill, D.H.E.W., 1970.

<sup>12</sup>Dirección Técnica de Desechos Sólidos, s/f.

de confinamiento heterogéneamente mezclados. Otro factor que define de manera importante las características físicas de los desechos, es el nivel económico o grado de desarrollo de la población generadora. En la tabla 3.1.7 se encuentra registrada una lista de los porcentajes típicos de los subproductos presentes en los desechos municipales.

#### COMPOSICION QUIMICA.

La composición química de los desechos sólidos municipales, tiene gran importancia para la evaluación de los sistemas alternativos de tratamiento y/o disposición final de los mismos.

En general, los desechos pueden tener o no propiedades inertes o de combustión; pueden ser útiles como fuente de energía o simplemente pueden disponerse de ellos en incineradores para reducir su volumen, y así mismo, facilitar el manejo y la disposición final de éstos en forma segura. Por otro lado, en las metas más ambiciosas, la proporción orgánica de los desechos puede ser procesada para producir alimento de consumo animal o fertilizante orgánico (composta). Para lograr lo anterior, es necesario llevar a cabo análisis químicos de muestras representativas de los desechos; En tales análisis se determinará el contenido y la proporción de los elementos químicos que intervienen en los procesos de descomposición, de los cuales se generan el lixiviado y el biogas. Los resultados de estos análisis son de gran utilidad para el diseño de la infraestructura para la captación, conducción y tratamiento de dichos productos; o de la infraestructura requerida para creación de energía con el aprovechamiento del biogas, o en otro caso, el composteo de la fracción orgánica de los desechos.

En las tablas 3.1.8 y 3.1.9 se encuentran tabulados las proporciones típicas de los elementos químicos de los subproductos que caracterizan los desechos municipales y la capacidad calorífica de los mismos.



TABLA 3.1.8.

SUBPRODUCTOS	CARBONO %	HIDROGENO %	OXIGENO %	NITROGENO %	AZUFRE %	CENIZAS %	PODER CALORIFI- CO (KCAL/KG)
MATERIA ORGANICA	48.00	6.40	37.60	2.60	0.40	5.0	1555.5
PAPEL	43.50	6.00	44.00	0.30	0.20	6.0	4000.0
CARTON	44.00	5.90	44.60	0.30	0.20	5.0	3888.8
PLASTICO	60.00	7.20	22.80	-	-	10.0	7777.7
TEXTILES	55.00	6.60	31.20	4.60	0.15	2.5	3833.3
HULE	77.65	10.35	-	2.00	-	10.0	5555.5
CUERO	60.00	8.00	11.60	10.00	0.40	10.0	4166.4
DESECHOS DE PODA	47.80	6.00	38.00	3.40	0.30	4.5	1111.1
MADERA	49.50	6.00	42.70	0.20	0.10	1.5	4444.4
VIDRIO	0.52	0.07	0.36	0.03	-	-	33.3
LATA	4.47	6.00	4.38	0.05	-	-	166.6
METALES FERROSOS	4.50	0.63	4.28	0.05	-	-	166.6
METALES NO FERROSOS	4.47	6.00	4.30	0.05	-	-	166.6
POLVO CENIZAS	26.30	3.00	2.00	0.50	0.20	48.0	603.0

Composición química y poder calorífico de los subproductos de los desechos municipales.<sup>13</sup>

TABLA 3.1.9.

CARBONO :	43.0 %	HUMEDAD :	45.0 %
HIDROGENO :	6.0 %	MATERIA ORGANICA (BASE SECA) :	65.5 %
OXIGENO :	49.0 %	MATERIA VOLATIL :	85.0 %
NITROGENO :	2.0 %	pH :	7
C/N :	21.5	DENSIDAD (COMPACTADO) :	700 kg/m <sup>3</sup>

Características fisicoquímicas de los desechos sólidos municipales en el Distrito Federa<sup>14</sup>

<sup>13</sup>Dirección Técnica de Desechos Sólidos; D.D.F., 1990. Sociedad Mexicana de Ingeniería Ambiental, Cocoyoc, 1992. (recopilación).

<sup>14</sup>Dirección Técnica de Desechos Sólidos, D.D.F., 1990.

### 3.2. CALCULO DE LA VIDA UTIL DE UN RELLENO SANITARIO.

En la sección 1.4 revisamos las variables para determinar la vida útil de un sitio destinado a el confinamiento de los desechos sólidos. Resumiendo, tenemos que, para calcular la vida útil de estos sitios es necesario considerar lo siguiente:

- La cantidad ( en volumen ) de desechos a confinar, con proyecciones a futuro.
- El área disponible para tal efecto.
- La altura o nivel final de las celdas que conforman el relleno.
- El volumen ocupado por el material de cubierta.
- La densidad de los desechos, considerando el grado de compactación a que son sometidos.

En general, el valor de la vida útil del área destinada para un relleno sanitario, se obtiene al dividir el valor de la capacidad volumétrica del sitio (área x altura) entre la cantidad proyectada de desechos a confinar, es decir:

$$V_u = \frac{V_r}{365 D_{np}} \quad (4)$$

en donde:

$V_u$  es la vida útil del relleno sanitario, en años.

$V_r$  es el volumen disponible del relleno sanitario, en  $m^3$ .

$D_{np}$  es el volumen de desechos proyectado para confinamiento, en  $m^3/dfa$ .

365 es el factor de conversión de día a año.

Retomando los criterios que establecen las ecuaciones (1) y (2), la proyección del volumen de desechos a confinar ( $D_{np}$ ) resulta ser:

$$D_{np} = \frac{G(1+i)^n(\delta - R)}{f} \quad (5)$$

en donde el valor agregado  $f$  es la densidad de los desechos, confinados y compactados; y las variables restantes son las indicadas en (1) y (2).

Regresando a la ecuación (4), sustituimos en ella el valor de  $V_r$  por las

dimensiones que lo forman (área y altura) e integramos en la misma el valor del volumen correspondiente a el material de cubierta; lo que nos resulta:

$$V_u = \frac{A h}{365 (D_{np} + V_m)} = \frac{A h}{365 D_{np} (1 + v)} \quad (6)$$

en donde:

$V_u$  es la vida útil del relleno, en años.

$A$  es el área del sitio de confinamiento, en  $m^2$ .

$h$  es la altura del relleno sanitario (a nivel de la última celda), en m.

$V_m$  es el volumen correspondiente a el material de cubierta igual a  $v \times D_{np}$ , en donde  $v$  es un porcentaje del volumen de desechos a disponer ( $D_{np}$ ), que convenientemente puede variar entre 15 y 30 %.

En la práctica, para efectos de diseño, de acuerdo con las necesidades — o las circunstancias presentes en el proyecto; y considerando los criterios presentados en la sección 1.4; las variables  $V_u$ ,  $A$  y  $h$  se pueden manipular algebraicamente según lo requiera el caso. Por ejemplo, si el área disponible para el confinamiento de los desechos está restringida, pero reúne las características más favorables para tal fin, entonces podemos fijar el valor mínimo rentable de la vida útil del sitio (10 años)<sup>15</sup> y calcular la altura necesaria final del conjunto de celdas que forman el relleno, para obtener el volumen disponible que ocuparán los desechos. En otro caso, si la capacidad de carga del suelo del sitio propuesto para este tipo de disposición es el factor limitante, o es la estabilidad de los taludes del conjunto de celdas, la que no cumple determinadas condiciones de seguridad, entonces se calcula el área requerida para un volumen dado, a partir de una altura máxima permisible de las celdas, dada por las condiciones del terreno o por la estabilidad de los taludes de las mismas. Por último, si no existen limitantes como las que ya indicamos, se pueden determinar las variables que den como resultado un valor óptimo de la vida útil del sitio de confinamiento.

Como podemos ver, el valor de la vida útil está en función del área, la altura del nivel final del relleno, de la cantidad de desechos a disponer y del incremento a través del tiempo (en  $n$  años) de los mismos.

<sup>15</sup> Norma técnica ecológica NOM-084-ECOL-1994. Secretaría de Desarrollo Social, 1994.

Para conjuntar todos los criterios a los que hemos hecho mención, para de terminar la vida útil del relleno sanitario, sustituimos en la ecuación (4) - las relaciones (5) y (6); y ajustamos el valor acumulado de los incrementos- anuales de la generación de desechos. De esto resulta:

$$V_u = \frac{A h}{(1/f)(1+v)(\xi - R) S} \quad (7)$$

en donde:

$$S = 365 G [(1+i)^n - 1] / [(1+i) - 1]$$

que es el factor que expresa la suma de los incrementos anuales; es decir, S - es la cantidad de desechos acumulados para n años de proyección<sup>16</sup>; para una generación diaria G.

La ecuación (7) es la expresión con la cual se puede ajustar, de acuerdo con la cantidad de desechos a disponer diariamente, la dimensión del frente de trabajo, el área del sitio de confinamiento y el nivel final de las celdas. El valor de la generación diaria promedio puede determinarse, si es que se desea verificar o actualizar el dato, con los procedimientos que establece la -- Norma Técnica NTRS-2-GENERACION que emitió la Secretaría de Ecología y Desarrollo urbano (ver tabla 3.2.1).

Ahora, como se definió en la sección 1.4, la vida útil de un relleno sanitario es el tiempo en que el área del sitio de confinamiento, para una altura- previamente establecida, es ocupada totalmente por el volumen acumulado de los desechos. La vida útil se termina cuando el volumen de los desechos confinados (y del material de cubierta) es igual a la capacidad volumétrica del relleno- sanitario, es decir:

Volumen acumulado (desechos + material de cubierta) = Volumen del relleno.

Matemáticamente, de (7), sustituyendo el valor de S en la misma, tenemos que:

$$V_u = \frac{A h}{(1/f)(1+v)(\xi - R) 365 G [(1+i)^n - 1] / [(1+i) - 1]} = 1$$

<sup>16</sup>De acuerdo con el concepto de series numéricas (Cálculo Diferencial e Integral, Piskunov, V-11).

TABLA 3.2.1.

PARAMETRO	NORMA TECNICA	TITULO
GENERACION PER-CAPITA	NOM-AA-61-1985	DETERMINACION DE LA GENERACION.
COMPOSICION	NOM-AA-15-1985 NOM-AA-22-1985	MUESTREO - METODO DE CUARTEO SELECCION Y CUANTIFICACION DE SUBPRODUCTOS.
PESO VOLUMETRICO " IN-SITU "	NOM-AA-15-1985 NOM-AA-19-1985	MUESTREO - METODO DE CUARTEO DETERMINACION DEL PESO VOLUMETRICO "IN-SITU".
HUMEDAD	NOM-AA-16-1984	DETERMINACION DE HUMEDAD
HIDROGENO	NOM-AA-25-1984	DETERMINACION DEL pH, METODO POTENCIOMETRICO.
CENIZAS	NOM-AA-18-1984	DETERMINACION DE CENIZAS.
AZUFRE	NOM-AA-92-1984	DETERMINACION DE AZUFRE.
NITROGENO	NOM-AA-24-1984	DETERMINACION DE NITROGENO
MATERIA ORGANICA	NOM-AA-21-1985	DETERMINACION DE MATERIA ORGANICA.
PODER CALORIFICO	NOM-AA-33-1985	DETERMINACION DEL PODER CALORIFICO.
RELACION C/N	NOM-AA-67-1985	DETERMINACION DE LA RELACION C/N.
COLIFORMES FECALES	EPA 6700-73-01-1973	U.S.E.P.A. PHYSICAL, CHEMICAL AND MICROBIOLOGICAL METHODS OF SOLID WASTES-TESTING.

Parámetros básicos para el estudio de las características de los desechos sólidos. <sup>17</sup>

<sup>17</sup>Normas Oficiales, Manual de Procedimientos de Muestreo de Desechos Sólidos, SEDUE, 1990.

TABLA 3.2.1.

PARAMETRO	NORMA TECNICA	TITULO
GENERACION PER-CAPITA	NOM-AA-61-1985	DETERMINACION DE LA GENERACION.
COMPOSICION	NOM-AA-15-1985 NOM-AA-22-1985	MUESTREO - METODO DE CUARTEO SELECCION Y CUANTIFICACION DE SUBPRODUCTOS.
PESO VOLUMETRICO " IN-SITU "	NOM-AA-15-1985 NOM-AA-19-1985	MUESTREO - METODO DE CUARTEO DETERMINACION DEL PESO VOLUMETRICO "IN-SITU".
HUMEDAD	NOM-AA-16-1984	DETERMINACION DE HUMEDAD
HIDROGENO	NOM-AA-25-1984	DETERMINACION DEL pH, METODO POTENCIOMETRICO.
CENIZAS	NOM-AA-18-1984	DETERMINACION DE CENIZAS.
AZUFRE	NOM-AA-92-1984	DETERMINACION DE AZUFRE.
NITROGENO	NOM-AA-24-1984	DETERMINACION DE NITROGENO
MATERIA ORGANICA	NOM-AA-21-1985	DETERMINACION DE MATERIA ORGANICA.
PODER CALORIFICO	NOM-AA-33-1985	DETERMINACION DEL PODER CALORIFICO.
RELACION C/N	NOM-AA-67-1985	DETERMINACION DE LA RELACION C/N.
COLIFORMES FECALES	EPA 6700-73-01-1973	U.S.E.P.A. PHYSICAL, CHEMICAL AND MICROBIOLOGICAL METHODS OF SOLID WASTES-TESTING.

Parámetros básicos para el estudio de las características de los desechos sólidos.<sup>17</sup>

<sup>17</sup>Normas Oficiales, Manual de Procedimientos de Muestreo de Desechos Sólidos, SEDUE, 1990.

lo que indica que en el tiempo  $n$  de proyección se saturará el relleno; la igualdad a la unidad no hace referencia al tiempo en años ( como vida útil ), ésta es sólo la conceptualización de que para  $n$  años se tendrá una igualdad de volúmenes ( volumen disponible del relleno y volúmenes acumulados de desechos y material de cubierta ). Entonces, resolviendo para  $n$  de la igualdad anterior se tiene lo siguiente:

$$n = \frac{\log [(Ah_i / 365 G (1/E)(1 + v)(4 - R) + 1]}{\log (1 + i)} \quad (8)$$

Así, la relación (8) determina el tiempo (en años) en que el volumen del relleno alcanzará la saturación; es decir, el tiempo en que se termina la vida útil del sitio al confinamiento.

Teóricamente al valor dado por (8) se le debe adicionar un 30 % del mismo, considerando la disminución del volumen ocupado debida a la degradación de los desechos; pero para efectos de diseño, este último criterio no lo tomaremos en cuenta ya que, como se vio, en la degradación de los desechos intervienen muchos factores que pueden retardar demasiado este proceso.

### 3.3. ESTIMACION DE LA PRODUCCION DE LIXIVIADOS.

Dado el riesgo potencial de contaminación de los mantos acuíferos debido a la infiltración de contaminantes que son arrastrados por los lixiviados que se generan dentro de las celdas de confinamiento de un relleno sanitario, resulta necesario tener, si no una idea exacta, sí un valor aproximado de la cantidad de lixiviado que pueda generarse y con esto instrumentar la infraestructura necesaria para captar y tratar, o simplemente contener este peligroso líquido.

La cantidad de lixiviado generado varía significativamente, como se vio en el capítulo I, principalmente a las características meteorológicas de la región donde se establece el relleno sanitario; esta misma variación se presenta desde la vida activa del relleno hasta la posclausura del mismo.

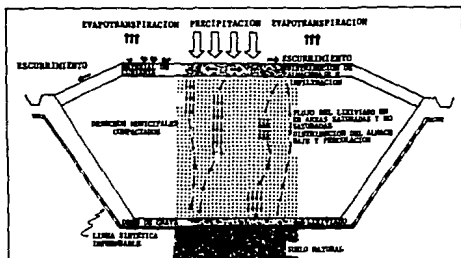
El método con el cual se puede estimar la producción de lixiviado en un sitio de confinamiento de desechos sólidos es el llamado Método de Balance de Agua o Balance Hídrico, que expresa la diferencia en la cantidad de agua que logra infiltrarse a través de las fronteras de las celdas de confinamiento; con la que se pierde debido a los fenómenos de evapotranspiración, absorción, conversión química en el proceso de degradación orgánica, escurrimientos superficiales, etc. (ver figura 3.3.1.). En otras palabras, el balance de agua es la diferencia del agua que entra y de la que no entra al relleno, es decir, cantidad neta de agua susceptible a lixiviarse dentro de las celdas de confinamiento (ver figura 3.3.2.).

El cambio de las variaciones en la cantidad de agua neta resultado de la diferencia de entradas y salidas de la misma, considerando todas las fuentes representativas posibles, se determina cuantificando y analizando los siguientes parámetros involucrados en el balance de agua:

- Precipitación.
- Evapotranspiración.
- Escurrimientos superficiales.
- Infiltración.
- Humedad metabólica (producida en el proceso de degradación orgánica).
- Capacidad de campo de los desechos.
- Contenido de humedad de los desechos.

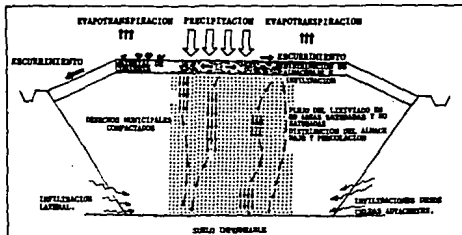


TABLA 3.3.1.



Representación de los factores que se consideran para realizar el balance de agua dentro de una celda de confinamiento; y del comportamiento del flujo de líquidos dentro de la misma, en condiciones de aislamiento (celda impermeabilizada).

TABLA 3.3.2.



Factores que se consideran para realizar el balance de agua dentro de una celda de confinamiento de desechos no aislada; y esquematización teórica del flujo de lixiviados dentro de la misma.

Cabe señalar, con respecto a los parámetros anteriormente enlistados, que el balance de agua se debe considerar para el material de cubierta en un cálculo aparte si las características físico-químicas (principalmente la impermeabilidad) y el espesor del mismo son significativas, considerando también el número de estratos de el material de cubierta dado por el número de niveles del conjunto de celdas diseñados. El cálculo del balance de agua en el material de cubierta de la frontera superior del relleno nos puede dar un dato inicial de la cantidad de agua que puede infiltrarse a través del material de cubierta y percolarse a través de los desechos y, junto con el agua contenida, producida o proporcionada por algún otra fuente, finalmente llegar a la base de las celdas como lixiviado.

Entonces, para la determinación del balance de agua del material de cubierta final de las celdas de confinamiento, los criterios siguientes pueden ser importantes:

- Cuando la precipitación mensual es mayor-igual a la evapotranspiración potencial mensual se producirá un exceso en el aporte de agua a la cubierta del suelo; cuando este excedente es absorbido alimenta las reservas de agua que el suelo almacena.
- Si la altura de la precipitación mensual es menor que la evapotranspiración potencial mensual, entonces la evapotranspiración real consumirá totalmente la precipitación. Esto dará como resultado un déficit que cubrirá el suelo con sus reservas hasta agotarse. Si estas reservas son suficientes para cubrir dicho déficit, entonces la evapotranspiración potencial será igual a la evapotranspiración real; de resultar lo contrario, entonces la evapotranspiración real queda ligada a las precipitaciones mensuales agotándose con esto las reservas del suelo y en consecuencia se establece un déficit en el almacenamiento de agua en el suelo.

Así pues, conociendo el comportamiento interno y externo de los procesos que definen la cantidad de agua potencial a infiltrarse podría determinarse el tiempo y generación de lixiviado aproximado y por lo consiguiente, deducir los criterios para el control de estos parámetros de la forma más conveniente a --

nuestros propósitos.

#### PRECIPITACION.

Se le define al agua que recibe la superficie terrestre en cualquier estado físico proveniente de la atmósfera. Esta cantidad de agua puede ser registrada o medida por pluviómetros y estadísticamente establecida. La precipitación es expresada en mm por la unidad más conveniente (día, mes y año). Para determinar en forma precisa este parámetro, se recomienda utilizar los promedios mensuales y diarios de precipitación registrados durante los períodos más largos (períodos mínimos de 25 años).

#### EVAPOTRANSPIRACION.

Proceso mediante el cual una parte del agua que se precipita sobre la superficie terrestre regresa a la atmósfera en forma de vapor a través de la acción combinada de la evaporación, transpiración y sublimación.

Para la determinación de este parámetro se deben considerar los siguientes factores:

- Evaporación.
- Factores meteorológicos.
- Características del suelo (porosidad, granulometría, etc.).
- Temperatura ambiente.

Existen muchos métodos para determinar la evapotranspiración; pero sin duda el método menos complicado es el que desarrolló H. W. Thornthwaite; ya que sólo considera para el cálculo la precipitación y la temperatura media sin tomar en cuenta otros factores que hacen compleja la deducción de este parámetro. Así, la expresión dada por Thornthwaite es la siguiente:

$$E = 1.6 \left( \frac{10T}{I} \right)^a \quad (9)$$

en donde:

E es la evapotranspiración, en mm.

i es el índice mensual dado por la relación:  $i = (T/5)^{1.514}$

I es la suma de índices mensuales:  $I = \sum_{i=1}^{12} i$

T es la temperatura media, en C°.

a es un coeficiente que está en función de la suma de índices de calor, este coeficiente está dado por:

$$a = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 - 1.792 \times 10^{-2} I + 0.49239$$

El ajuste de los valores dados por la ecuación (9) se realiza mediante - la expresión siguiente:

$$E_a = E K_e \quad (10)$$

donde:

$E_a$  es la evapotranspiración ajustada, en mm.

E es la evapotranspiración sin ajuste, en mm.

$K_e$  es el coeficiente de corrección mensual que considera el número de horas - efectivas entre la salida y la puesta del sol, así como el número de días.

#### ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL.

Es la cantidad de agua que fluye sobre la capa externa del suelo antes de que pueda infiltrarse a las capas inferiores del mismo. Para determinar la cantidad de agua que corresponde a la fracción del escurrimiento se hace uso de - un coeficiente, el cual es llamado coeficiente de escurrimiento, que depende de varios factores entre los cuales destacan principalmente las condiciones topográficas, climatológicas, las características geológicas y la vegetación de la zona de estudio ( ver tabla 3.3.3). El coeficiente de escurrimiento proporciona un medio de evaluación con buena aproximación, para determinar las cantidades de afluencia de agua de la superficie debido a la precipitación. La siguiente relación expresa los valores de escurrimiento:

$$E_s = K_e P \quad (11)$$

en donde:

$E_s$  es el escurrimiento superficial, en mm.

$K_e$  es el coeficiente de escurrimiento, adimensional.

P es la precipitación media mensual, en mm.

TABLA 3.3.3.

CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES DEL TIERREZO	K <sub>a</sub>		TIPO DE CLIMA	K <sub>e</sub>	VEGETACION	K <sub>e</sub>
	TEMPORADA DEL AÑO					
	SEQUIA	LLOVIA				
SUELO ARENOSO PLANO ( S < 2X )	0.05	0.10	HUMEDO	>= 0.35	CULTIVADOS	0.01-0.1
SUELO ARENOSO MEDIO ( 2X < S < 4X )	0.10	0.15	SEMI-HUMEDO	0.15-0.35	NO CULTIVADOS	0.75-0.50
SUELO ARENOSO INCLINADO ( S > 7X )	0.15	0.20	SEMI-ARIDO	0.05-0.15	CULTIVADOS	0.75-0.50
SUELO ARCILLOSO PLANO ( S < 2X )	0.13	0.17	ARIDO-EXTREMO (DESERTICO)	0.00-0.05	AREA BOSCOSA	0.05-0.20
SUELO ARCILLOSO MEDIO ( 2X < S < 7X )	0.18	0.22				
SUELO ARCILLOSO INCLINADO ( S > 7X )	0.23	0.35				

S = PENDIENTE DEL TIERREZO.

## INFILTRACION.

Se entiende por infiltración a la cantidad de agua que no ha podido evaporarse o escurrir, y que se introduce al interior del suelo. Esta cantidad de agua infiltrada es determinada con el siguiente balance:

$$I_n = P - E_s - E_a \quad (12)$$

donde:

$I_n$  es la infiltración potencial, en mm.

$P$  es la precipitación media mensual, en mm.

$E_s$  es el escurrimiento superficial dado por (11), en mm.

$E_a$  es la evapotranspiración real ajustada dada por (10), en mm.

## HUMEDAD METABOLICA.

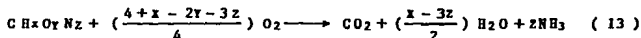
Se refiere a la cantidad de agua necesaria para que la actividad bacteriológica en el proceso de degradación se lleve a cabo o, de otro modo, es la cantidad de agua resultante de dicho proceso. Los principales factores que se consideran para el desarrollo del proceso de degradación son los siguientes:

- Propiedades fisicoquímicas de los desechos.
- Cantidad de oxígeno atrapado dentro de los desechos.
- Temperatura y humedad presente.
- Cantidad y tipo de población microbiana.

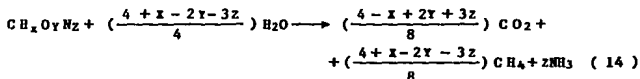
Como se vio en la sección correspondiente del capítulo I, la degradación-

de la fracción orgánica de los desechos sólidos dentro de un relleno sanitario se lleva a cabo en dos fases ( fase aeróbica y anaeróbica ). El balance estequiométrico de los cambios bioquímicos que resultan de estos procesos puede determinarse con el planteamiento de la fórmula básica de la materia orgánica (\*); desarrollada en la sección 1.3.

En la fase aeróbica se consume el oxígeno y se produce agua. Este proceso es representado y cuantificado analíticamente mediante el siguiente resultado:



En la fase anaeróbica, se consume el agua presente en los desechos y como resultado de esto se producen gases. Esto es:



A partir de las expresiones (13) y (14) se obtiene la relación con la cual se determina la cantidad de agua consumida y producida ( cantidad de agua presente ) en los procesos señalados anteriormente; expresada de la siguiente manera:

$$R_w = \frac{(d) H_2O}{CH(a) + O(b) + N(c)} \quad (15)$$

donde:

$R_w$  es la cantidad máxima de agua por unidad de materia orgánica en base seca.  $a, b, c$  y  $d$  son las constantes que resultan de las relaciones entre los pesos moleculares entre los elementos químicos actuantes en el proceso y los valores dados por la operación aritmética de los coeficientes que relacionan a  $x, y, z$ .

#### CAPACIDAD DE CAMPO.

La capacidad de campo de un material es la cantidad máxima de agua que puede retener o absorber la materia sólida (suelo, o en como en este caso, desechos sólidos) venciendo la fuerza de gravedad, sin permitir el flujo hacia estratos

inferiores. Este parámetro es obtenido experimentalmente mediante el siguiente procedimiento:

Se homogeniza una muestra de desechos ( para este caso ) y se confina en un lisímetro; al material se le compacta mientras se realiza esto con un pisón de mano, capa por capa, gradualmente hasta obtener un cierto grado de compactación. Posteriormente se le aplica al lisímetro una carga semejante a las que comúnmente se les aplica a los desechos confinados en una celda de los rellenos sanitarios; después de esto se vierte agua al lisímetro hasta alcanzar un nivel superior al de los desechos confinados en el mismo, saturando así su capacidad de absorción; hecho esto, se lleva a cabo un drenado inicial del lisímetro durante 15 minutos para después efectuar un drenado final constante durante 24 - horas continuas hasta alcanzar un escurrimiento mínimo, que generalmente se lo gra después de 48 horas.

Para esta prueba se considera la humedad presente en los desechos, la densidad de los mismos y las condiciones establecidas en el método experimental; de acuerdo a esto se tiene la siguiente relación:

$$C_c = \left[ \frac{(V_3 D H / 100) + (V_1 - V_2) d}{V_3 D (1 - H / 100)} \right] F \quad (16)$$

en donde:

$C_c$  es la capacidad de campo del material sólido ( desechos o el material de cubierta ) en porcentajes de humedad en base seca.

$H$  es la humedad del material sólido antes de realizar la prueba, en porciento en peso,

$D$  es la densidad reportada " in situ " de los desechos sólidos ( o del material de cubierta ), en  $kg/m^3$ .

$d$  es la densidad del agua ( 1 ton/ $m^3$  ).

$V_1$  es el volumen de agua con que se saturó el lisímetro al inicio de la prueba, en  $m^3$ .

$V_2$  es el volumen de agua extraído del lisímetro mediante los drenados realizados durante la prueba, en  $m^3$ .

$V_3$  es volumen ocupado por los desechos sólidos compactados dentro del lisímetro, en  $m^3$ .

F es un factor adimensional que reduce el valor de la capacidad de campo, ya que se considera la sobre carga a que son sometidos los desechos. Este factor es despreciable cuando el contenido de humedad y la proporción orgánica en los desechos no son representativos; cuando sucede lo contrario, la experiencia indica que la capacidad de campo disminuye hasta un 30 % por efecto de la compactación dada por las cargas aplicadas a los desechos.

Ahora podemos utilizar los resultados obtenidos anteriormente, para calcular la generación de lixiviados dentro de una celda típica de un relleno sanitario, mediante el siguiente balance:

$$Lix = I_n + \left(\frac{H}{100}\right) D + R_o D + H d - C_c \quad (17)$$

en donde:

Lix es la cantidad ( por unidad de área ) de lixiviado producido, en mm/m<sup>2</sup>/mes; el resto de las variables son las referenciadas en ( 12 ), ( 15 ) y ( 16 ).



### 3.4. CALCULO DE LA PRODUCCION DE BIOGAS.

El volumen de los gases liberados durante la descomposición dentro de las celdas de confinamiento de un relleno sanitario, puede ser estimada por medio del balance estequiométrico desarrollado en la sección 1.4, de la misma manera como se presentó en la sección anterior para el cálculo de la humedad metabólica, a partir de las relaciones (13) y (14), se estima la cantidad de biogás generado por los procesos bioquímicos señalados; para esto se considera la conversión completa a metano y bióxido de carbono, principalmente. Además se asume que alguna cantidad residual del material orgánico no se descompone.

Para llevar a cabo la estimación de biogás mediante este balance se requiere determinar, por medio de un análisis de laboratorio, los contenidos de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, de acuerdo a los procedimientos técnicos establecidos (ver tabla 3.2.1) y desarrollar la fórmula mínima (\*), ajustando los porcentajes obtenidos al 100 %. Entonces, determinamos la magnitud de los valores de los coeficientes de las expresiones (13) y (14) y obtenemos las respectivas generaciones de metano ( $\text{CH}_4$ ), bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y amoníaco ( $\text{NH}_3$ )\* con las siguientes relaciones:

$$R_1 = \frac{(e) \text{CH}_4}{C + (a)H + (b)O + (c)N} \quad (18)$$

$$R_2 = \frac{(f) \text{CO}_2}{C + (a)H + (b)O + (c)N} \quad (19)$$

$$R_3 = \frac{(g) \text{NH}_3}{C + (a)H + (b)O + (c)N} \quad (20)$$

donde:

$R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$  son la cantidad (en tonelada por tonelada de materia orgánica) de metano, bióxido de carbono y amoníaco, respectivamente, resultado de los procesos bioquímicos de descomposición aeróbica y anaeróbica.

a, b, c, d, e, f y g son los valores de los coeficientes del balance estequio-

\*No se consideran los constituyentes los gases cuya generación es insignificante, comparado co la producción del metano, bióxido de carbono y el amoníaco.

métrico (13) y (14), los que resultan de la relación de pesos específicos — de los elementos químicos interactuantes.

Así pues, los volúmenes de los gases que componen el biogas generado en el proceso de degradación se obtienen de las siguientes expresiones:

$$V_{CH_4} = \frac{R_1 (M_o)}{d_1} \quad (21)$$

$$V_{CO_2} = \frac{R_2 (M_o)}{d_2} \quad (22)$$

$$V_{NH_3} = \frac{R_3 (M_o)}{d_3} \quad (23)$$

donde:

$V_{CH_4}$  es la generación de metano, en  $m^3$  por  $m^3$  de desechos.

$V_{CO_2}$  es la generación de bióxido de carbono, en  $m^3$  por  $m^3$  de desechos.

$V_{NH_3}$  es la generación de amoníaco, en  $m^3$  por  $m^3$  de desechos.

$d_1$ ,  $d_2$  y  $d_3$  son las densidades del metano, bióxido de carbono y amoníaco, respectivamente, en  $kg/m^3$ .

$M_o$  es la materia orgánica en base seca (tonelada por  $m^3$  de desechos) dada por:

$$M_o = [f_o \epsilon V - (\epsilon V H \frac{0.8}{100})] (1 - \frac{C_z}{100}) \quad (24)$$

donde:

$f_o$  es la fracción orgánica de los desechos, en por ciento.

$\epsilon$  es la densidad de los desechos compactados, en  $kg/m^3$ .

$V$  es el volumen unitario de los desechos, en  $m^3$ .

$H$  es el porcentaje de humedad de los desechos.

$C_z$  es la fracción de cenizas contenida en la materia orgánica en base seca, en por ciento respecto al peso.

### 3.5. DETERMINACION DE LOS PARAMETROS QUE DEFINEN EL COMPORTAMIENTO DEL SUELO Y DE LA ESTRUCTURA DE LAS CELDAS DE CONFINAMIENTO.

Los principales parámetros que se necesitan determinar, para predecir en forma aproximada el comportamiento del suelo donde se desplantarán las celdas de confinamiento y asegurar la estabilidad estructural de las mismas, son los siguientes:

- Las cargas actuantes sobre el terreno.
- Los asentamientos.
- La estabilidad de talud de las celdas.

Si las condiciones del suelo son favorables, es decir, si la estabilidad estructural del terreno es aceptable o excelente, como en los casos de los suelos arenosos y en los suelos formados por estratos rocosos, probablemente resultaría innecesario analizar algunos de los parámetros indicados arriba. De lo contrario, por ejemplo, en el caso de los suelos constituidos por arcilla o con alto contenido de la misma, es muy importante conocer el comportamiento del suelo del sitio, el cual puede determinarse por la magnitud de las cargas actuantes, el grado de consolidación alcanzado y las características de las fallas de talud que puedan presentarse. Esto servirá para prevenir grandes molestias y considerables gastos de reconstrucción por daños a la estructura del relleno o a las estructuras cercanas que lo circundan.

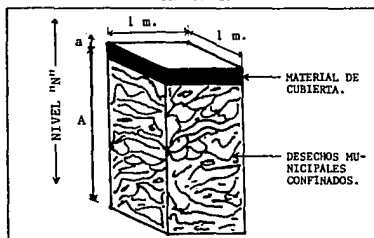
Debido a que los suelos del tipo arcilloso cuentan con mejores características impermeables (siempre y cuando no se tengan grietas debidas a fallas mecánicas, a saturación y a desecación), usualmente son ocupados, en la medida de las posibilidades, para sustentar el confinamiento de los desechos municipales o para formar parte del sistema impermeable diseñado para minimizar los riesgos de contaminación de los mantos freáticos. Es por esto que nos ocuparemos del análisis de cargas, de los asentamientos a corto, medio y a largo plazo ocasionados por éstas; además del estudio de la estabilidad de talud; este último requerido para cualquier tipo de suelo o material que conformará la estructura (para este caso formada principalmente por desechos).

### DETERMINACION DE CARGAS.

Para el cálculo de las cargas actuantes, se consideran dos tipos de cargas; las cargas permanentes constituidas por el peso de la estructura propia del relleno formada principalmente por el conjunto de celdas, y las cargas accidentales o cargas vivas dadas por el tráfico de los vehículos de transferencia y el equipo de operación tales como los cargadores, compactadores, motoconformadoras, etc.

Las cargas ocasionadas por la acumulación o el confinamiento de desechos, que denominamos cargas permanentes, están en función de la altura final del conjunto de celdas y de la densidad de los desechos confinados, determinada por la compactación y el contenido de humedad de los mismos. Por otro lado, se considera también el peso del material de cubierta en condiciones de compactación. Entonces, para calcular estas cargas permanentes que actúan sobre el suelo donde se desplantan las celdas de confinamiento, se considera una columna de área unitaria en la cual se representa la estructuración de las celdas (ver figura-3.5.1.).

FIGURA 3.5.1.



Columna de área unitaria de una celda de desechos municipales en un nivel de confinamiento.

Así, la carga generada por el peso de los desechos sólidos para una columna unitaria está dada por:

$$P_d = \epsilon V N \quad (25)$$

en donde:

$P$  es la carga debida al peso de los desechos, en  $\text{kg}/\text{m}^2$ .  
 $f$  es la densidad de los desechos compactados, en  $\text{kg}/\text{m}^3$ .  
 $V$  es el volumen ocupado por los desechos en la columna de área unitaria, en  $\text{m}^3$ .  
 $N$  es el número de niveles de las celdas de confinamiento (considerando la altura constante para todas las celdas).

Análogamente, el peso de las capas formadas por el material de cubierta - se obtiene con la siguiente relación:

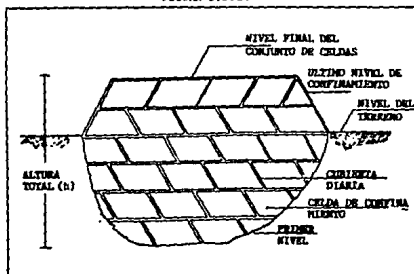
$$P_m = f_m V_m N \quad (26)$$

en donde:

$P_m$  es la carga debida al peso del material de cubierta, en  $\text{kg}/\text{m}^2$ .  
 $f_m$  es la densidad del material de cubierta compactado, en  $\text{kg}/\text{m}^3$ .  
 $V_m$  es el volumen ocupado por el material de cubierta en la columna de área unitaria, en  $\text{m}^3$ .  
 $N$  es el número de niveles, considerando los mismos espesores del material de cubierta en todos los niveles.

Con la suma de los resultados dados por (25) y (26), obtenemos las cargas generadas por la estructura general que conforman las celdas. Estas cargas, como ya se comentó, dependen de la altura final de las celdas, o bien del número de niveles de las mismas (ver figura 3.5.2.).

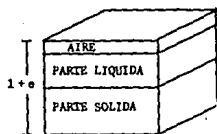
FIGURA 3.5.2.



Estructuración de un conjunto de celdas de confinamiento dado por "n" niveles de celdas.

## ANÁLISIS DE LOS ASENTAMIENTOS DEBIDOS A LA SOBRECARGA DEL TERRENO.

Los asentamientos de un terreno (principalmente del tipo arcilloso) están regidos por el fenómeno de consolidación unidimensional ocasionado por el flujo de agua no establecido, a través de una masa porosa. El proceso de consolidación se lleva a cabo en un determinado lapso de tiempo, al disminuir la relación de vacíos ( $e$ ) del material que forma el suelo (ver figura 3.5.3) cuando éste es sometido a determinados esfuerzos originados por una sobrecarga  $\Delta p$ . Para el análisis de este proceso, se considera que las partículas del agua y del suelo, son totalmente incompresibles y que éste último está totalmente saturado.



$$e = \frac{\text{volumen de vacíos}}{\text{volumen de sólidos}}$$

FIGURA 3.5.3. Composición física de una muestra de suelo, en la que se considera un volumen unitario constituido sólo por la parte sólida de la muestra.

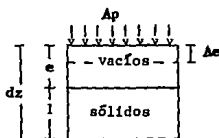


FIGURA 3.5.4. Representación esquemática de la disminución de vacíos ( $e$ ) debido a la aplicación de una carga ( $\Delta p$ ).

Como es entendido, el conocimiento de los materiales en cuanto a su relación esfuerzo/deformación y la variación de ésta con el tiempo, nos ayuda a determinar el comportamiento de los mismos. Así pues, para el análisis en suelos debemos entender cómo se lleva a cabo la distribución de esfuerzos bajo las condiciones a que éstos son sometidos; así mismo, entender las nuevas condiciones dadas por la construcción de alguna estructura, cuya transmisión de cargas llega a ser claramente definida.

Las soluciones aplicadas a la determinación de esfuerzos están basadas en la teoría de la elasticidad y es limitada por la hipótesis de que el suelo (o el material que lo forma) es homogéneo, isótropo y linealmente elástico. Aunque anterior en la realidad no se cumple, en la mayoría de los casos prácticos los resultados que se logran con esta teoría son una estimación aproximada de-

los fenómenos reales estudiados.

Los esfuerzos que intervienen en el proceso de consolidación son ocasionados por los siguientes tipos de presiones:

Presión Neutral ( $U_n$ ). La presión neutral corresponde a la presión del agua intersticial que está dada por la suma de las presiones debidas a la hidrostática ( $U_h$ ), que corresponde a una distribución lineal de equilibrio estático; y la presión en exceso de la hidrostática ( $U$ ) presente por el incremento de carga ( $\Delta p$ ). Así, tenemos que:

$$U_n = U_h + U \quad (27)$$

en donde:

$$U_h = \rho_w Z \quad (28)$$

Presión Total ( $p$ ). Es la presión debida al peso propio del material (supuesto homogéneo) que forma el suelo a una profundidad  $Z$ . Análoga a la ecuación (28), la presión total se expresa de la siguiente forma:

$$P = \rho_m Z \quad (29)$$

en (28) y (29).  $\rho_w$  y  $\rho_m$  representan las densidades del agua y del material que forma el suelo, respectivamente. Lo anterior equivale a considerar la totalidad de carga por peso propio sobre un nivel considerado, por unidad de área.

Presión Efectiva ( $\bar{p}$ ). Así se les considera a aquellas presiones normales que gobiernan los cambios volumétricos del suelo, o la resistencia del mismo. En el caso de que el agua se encuentre en condición puramente hidrostática, la presión efectiva (también considerada intergranular) debida al peso propio estará dada en la forma que sigue:

$$\bar{p} = P - U_h = (\rho_m - \rho_w) Z \quad (30)$$

Cuando es aplicada sobre el suelo una sobrecarga  $\Delta p$ , se crea una presión en exceso de la hidrostática  $U$ . En el primer instante de la aplicación,  $\Delta p = U$ , pero conforme pasa el tiempo se lleva a cabo un reparto de presiones tal como se describe en la analogía mecánica de Terzaghi<sup>18</sup>. Entonces, en dicho instante-

<sup>18</sup>Modelo mecánico propuesto por Karl Terzaghi, constituido de celdas cilíndricas acondicionadas con un resorte interno cada una, las cuales soportan un pistón que trasmite una carga. Dentro de las celdas se aloja también un fluido, el cual reacciona a la presión aplicada (Juárez Badillo y R. Rodríguez, Mecánica de suelos, sección X-4, tomo 1.)

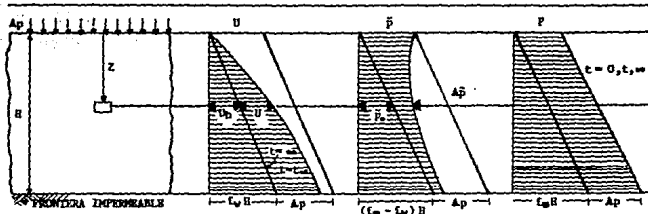
se tiene:

$$\Delta p = \Delta \bar{p} + U \quad (31)$$

Con lo anterior puede deducirse que la presión efectiva, al igual que la presión neutral, varían con el tiempo y la profundidad, mientras que la presión total  $P$  permanece constante.

Los análisis anteriores se pueden visualizar con la siguiente figura:

FIGURA 3.5.5.



Distribución de presiones en un estrato superficial de suelo homogéneo y compresible; el N.A.F. (nivel de aguas freáticas) se considera en la frontera superior.  $t_s$  y  $t_w$  corresponden a las densidades del suelo y del agua, respectivamente.

#### DEDUCCION DE LAS CONSTANTES DEL PROCESO DE CONSOLIDACION.

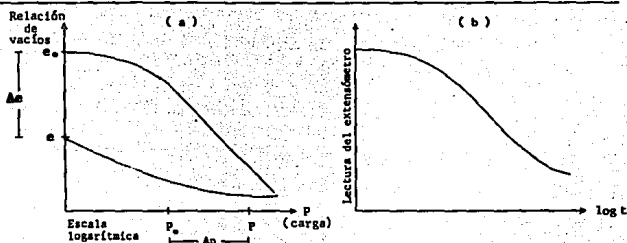
Los análisis de asentamientos de un suelo pueden realizarse con buena aproximación, llevando a cabo las pruebas de consolidación en muestras "inalteradas" del mismo, utilizando para esto, el consolidómetro. Con los resultados de estas pruebas se pueden dibujar las curvas de consolidación y las curvas de compresibilidad (figuras 5.5.6).

La presión efectiva será entonces, el parámetro que se considera para determinar los esfuerzos que actúan en cada punto de un estrato del suelo estudiado. Los esfuerzos originados por la sobrecarga  $\Delta p$  pueden determinarse, por un lado, utilizando las ecuaciones de Boussinesq<sup>19</sup>, considerando para este caso, la aplicación de una carga (por unidad de área) distribuida uniformemente sobre una superficie rectangular. La expresión para esta condición de carga es - la siguiente:

<sup>19</sup> Métodos de cálculo de esfuerzos debidos a una carga actuante en la superficie horizontal de un medio semi-infinito, homogéneo, isótropo y linealmente elástico (op cit. Cap. II, sección II-2, v.2)



FIGURA 3.5.6.



Curva de compresibilidad (a) y de consolidación (b).

$$G_z = \frac{w}{4\pi} \left[ \frac{2xyz(x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}}{z^2(x^2 + y^2 + z^2) - x^2y^2} \cdot \frac{x^2 + y^2 + 2z^2}{x^2 + y^2 + z^2} + \text{ang tang} \frac{2xyz(x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}}{z^2(x^2 + y^2 + z^2) - x^2y^2} \right] \quad (32)$$

en donde:

$G_z$  es el esfuerzo actuante a la profundidad  $z$ , en  $\text{kg/cm}^2$ .

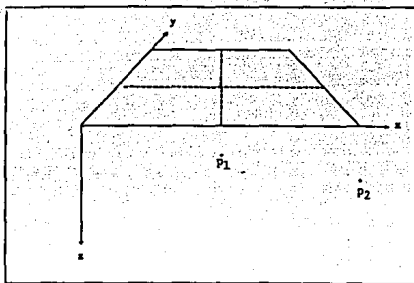
$w$  es la carga aplicada al suelo (por unidad de área)

$x$ ,  $y$  y  $z$  son las componentes del espacio tridimensional de un punto en el estrato estudiado;  $x$  y  $y$  corresponden a las dimensiones de la superficie rectangular cargada y  $z$  representa la profundidad bajo la cual se localiza el punto de análisis.

La ecuación anterior es aplicada en los puntos localizados bajo una esquina de la superficie rectangular (ver figura 3.5.7.).

De otra manera, considerando que la carga aplicada sobre el terreno, definida por la estructura de las celdas, es similar a la que transmite un terraplén; se pueden aplicar también las relaciones desarrolladas por Carothers para una carga trapecial de longitud infinita, que determinan los esfuerzos indu-

FIGURA 3.5.7.



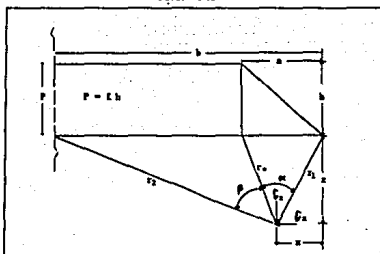
Puntos de estudio bajo una área cargada.

cidos por estas condiciones de carga. La distribución de estos esfuerzos en un punto dado bajo la carga en estudio (ver figura 3.5.8) se determinan con las siguientes relaciones:

$$\sigma_z = \frac{P}{2H} \left[ \beta + \frac{x}{a} \alpha - \frac{x}{(r_2)^2} (x - b) \right] \quad (33)$$

$$\sigma_x = \frac{P}{2H} \left[ \beta + \frac{x}{a} \alpha + \frac{2z}{a} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{x}{(r_2)^2} (x - b) \right] \quad (34)$$

FIGURA 3.5.8.



Variables para el cálculo de distribución de esfuerzos (β y α en radianes).

Por otro lado, el grado de consolidación o la magnitud de los asentamientos del terreno en estudio, puede determinarse a partir de las curvas de consolidación (figura 3.5.6-b), en las cuales se registran las lecturas del extensómetro (medidor de deformaciones) para diferentes tiempos, correspondientes a una muestra representativa del suelo. Para cada incremento de carga aplicada a estas muestras se obtiene una gráfica de consolidación. De estas curvas, ya completados todos los incrementos de carga, se obtienen los valores para construir la curva de compresibilidad (figura 3.5.6-a) relacionando los valores de  $e$  con los valores de la presión aplicada. Así mismo, de esta curva se obtiene el coeficiente de compresibilidad  $a_v$ , el cual representa la pendiente de ésta misma en escala natural. Entonces, como se puede deducir de la figura 3.5.4., el coeficiente de compresibilidad está dado por la siguiente relación:

$$a_v = \frac{de}{dp} \quad (35)$$

El valor  $a_v$  depende de la presión actuante sobre el suelo, y físicamente representa la variación de vacíos con respecto a la presión que provoca esta disminución. Un valor elevado de  $a_v$  es característico de un suelo muy compresible.

La representación matemática del fenómeno de consolidación, que considera la distribución de esfuerzos y la variación de presiones sobre un estrato de suelo en estudio; que representa además el cambio de volumen de un elemento de espesor  $dz$  en un tiempo  $dt$ , está dada por la siguiente ecuación:

$$\Delta dV = - \frac{k}{\epsilon_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz dt \quad (36)$$

en donde la diferencial  $\Delta dV$ , representa la variación de volumen del elemento de espesor  $dz$  en el tiempo  $dt$ ; deducida con la aplicación de la Ley de Darcy, en la que se realiza un análisis del flujo de agua para un elemento de área unitaria y de permeabilidad  $k$ , en el que se determina el gradiente hidráulico representativo del elemento, en un tiempo  $t$ .

Por otro lado, la conexión entre la variación de la relación de vacíos y el cambio de volumen de un elemento (muestra de suelo) sujeto a la prueba está expresada con la siguiente relación:

$$\Delta dV = \frac{de}{1+e} dz \quad (37)$$

Sustituyendo el valor de (35) en (36) y resolviendo en términos de  $de$ , tenemos el siguiente resultado:

$$\Delta dV = \frac{a_v}{1+e} d\bar{p} dz \quad (38)$$

en donde  $d\bar{p}$  representa el cambio de presión sobre la estructura del suelo a una profundidad constante  $z$  que pudiera tenerse en el tiempo  $dt$ . Ahora, considerando que:

$$d\bar{p} = -du = -\frac{\partial u}{\partial t} dt$$

podemos escribir la relación (38) de la siguiente manera:

$$\Delta dV = -\frac{a_v}{1+e} \frac{\partial u}{\partial t} dt dz \quad (39)$$

Tomando en cuenta la hipótesis de incompresibilidad del agua y de las partículas sólidas del suelo; así como la saturación de este mismo, se pueden igualar las relaciones (36) y (39). Esto equivale físicamente a expresar que la pérdida de agua del suelo (en volumen) es igual a la pérdida de volumen de la masa del mismo. Entonces, la igualación de dichas ecuaciones trae el resultado siguiente:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k(1+e)}{a_v \lambda_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (40)$$

La ecuación (40) es conocida como la ecuación diferencial de la consolidación unidimensional; ésta permite conocer la distribución de presiones en el suelo durante este proceso, ya que establece la relación entre la presión en --

exceso a la hidrostática ( $u$ ), la profundidad ( $z$ ) y el tiempo ( $t$ ). Con esta misma ecuación se define el coeficiente de variación volumétrica ( $m_v$ ), el cual representa, físicamente, la compresibilidad del suelo con respecto al volumen inicial. Así mismo, en términos de este coeficiente, se determina el coeficiente de consolidación ( $C_v$ ); estos coeficientes están dados, respectivamente, por las siguientes relaciones:

$$m_v = \frac{a}{1 + e} \quad (41)$$

$$C_v = \frac{k}{m_v \gamma_w} \quad (42)$$

#### ASENTAMIENTO DE UN ESTRATO ARCILLOSO SUJETO A CONSOLIDACION.

El asentamiento de un estrato de arcilla de espesor  $H$ , ocasionado por una sobrecarga  $\Delta p$  que actúa en la superficie de dicho estrato, puede determinarse considerando las condiciones representadas en la figura 3.5.4 y a partir de los resultados obtenidos de las pruebas a las muestras representativas del suelo o estrato en estudio. De la figura referida es clara la siguiente expresión:

$$\Delta H = \frac{\Delta e}{1 + e} H \quad (43)$$

en donde  $\Delta H$  representa la disminución o decremento del espesor total  $H$  del estrato estudiado, independientemente de las condiciones de drenaje presentes en el mismo.

La relación (41) es considerada como la fórmula general para el cálculo de asentamientos debidos a consolidación. Para su aplicación se considera que los incrementos de presión  $\Delta p$  transmitidos al suelo son constantes y que las variaciones dadas por la relación  $\Delta e/1+e$  (deformación unitaria) no son significativas a lo largo del espesor del estrato. En caso contrario, la relación (43) debe desarrollarse en forma diferencial a lo largo de todo el estrato mediante un proceso de integración para obtener el asentamiento total buscado. Así, la deformación en un punto definido del estrato puede determinarse como sigue:

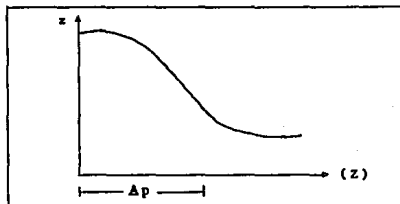
$$\Delta z = \frac{\Delta e}{1 + e} dz \quad (44)$$

la cual, al aplicar la integración (suma de las diferenciales de los decrementos de espesor  $dz$ ) resulta:

$$\Delta H = \int_0^H \frac{\Delta e}{1 + e} dz \quad (45)$$

Como se mencionó anteriormente, con las pruebas de consolidación efectuadas a las muestras "inalteradas" representativas del estrato compresible a diversas profundidades, se cuentan con datos con los cuales se construye una curva de compresibilidad para cada incremento de carga, de las que se deduce el comportamiento del suelo a una profundidad específica. Sobre estas gráficas podrá llevarse el valor de  $P_0$  (presión actual efectiva que afecta al suelo a tal profundidad, expresada en términos de esfuerzo; ver figura 3.5.9), con este valor se obtiene un correspondiente  $e_0$ . El valor  $\Delta p$  se puede determinar con cualquiera de los métodos analíticos anteriormente expuestos [(32) y (33)] o con cualquier otro que se ajuste adecuadamente a las condiciones de carga establecidas por la estructura del relleno. Este último valor representa el nuevo esfuerzo efectivo que afecta la fase sólida del suelo al alcanzar consolidación por efecto de las cargas exteriores. Así, el valor de  $P$  (igual a  $P_0 + \Delta$ ) proporciona, recurriendo a la gráfica de la curva de compresibilidad, la  $e$  final que, teóricamente, alcanza el suelo a la profundidad del punto en estudio y de terminar así el  $\Delta e$  respectivo.

FIGURA 3.5.9.



Gráfica de esfuerzos en función de la profundidad del suelo.

Retomando la ecuación (45), podemos expresar ésta en términos del coeficiente de variación volumétrica  $m_v$ , para simplificar los cálculos, de la forma siguiente:

$$\Delta H = \int_0^H m_v A_p dz \quad (46)$$

que integrando, resulta:

$$\Delta H = m_v A_p H \quad (47)$$

En caso especiales  $a_v$  y  $m_v$  pueden considerarse constantes, como en el caso de  $m_v$  en la solución de (46). Así mismo, estas constantes pueden ser obtenidas de las pruebas de laboratorio, siendo las que rigen en un estrato del suelo; pudiendo ser aplicadas en las expresiones anteriores.

#### RELACIONES DEL TIEMPO CON EL PROCESO DE CONSOLIDACION.

En un estrato real del suelo se admite que las deformaciones acontecidas en el mismo son proporcionales al grado de consolidación de dicho estrato. Como grado de consolidación o porcentaje de consolidación [ $U(z)$ ], se define a la relación entre la consolidación que ya ha tenido lugar, en un instante  $t$  y a una cierta profundidad  $z$ ; y a la consolidación total que ha de producirse bajo la acción de un incremento de carga. Así, el asentamiento ocurrido en un tiempo  $t$  ( $S_t$ ) está relacionado para el proceso de consolidación de la siguiente manera:

$$\frac{S_t}{\Delta H} 100 = U(z) \quad (48)$$

en donde  $\Delta H$ , como ya se ha indicado, representa el asentamiento total primario. Entonces, de (47) y de (48) obtenemos el siguiente resultado:

$$S_t = m_v A_p H \left[ \frac{U(z)}{100} \right] \quad (49)$$

La relación anterior significa que el asentamiento en cada tiempo  $t$  es igual al asentamiento total que ha de producirse, por el grado de consolidación que el estrato ha alcanzado en ese tiempo. Para determinar el  $S_t$  a través del tiempo, se requiere determinar previamente el coeficiente de consolidación del

suelo ( $C_v$ ) pues  $U(Z)$  está en función del factor tiempo  $T$ , el cual a su vez depende de las constantes físicas del complejo suelo-agua que rige el proceso de consolidación. Este factor está dado por la siguiente expresión:

$$T = C_v \frac{t}{H^2} \quad (50)$$

y de aquí:

$$t = \frac{H^2}{C_v} T \quad (51)$$

Los valores de  $T$  están dados por las curvas de consolidación, calculando el coeficiente de consolidación dentro del intervalo de presiones debidas a la sobrecarga aplicada al estrato de espesor  $H$  (sin dejar de considerar la hipótesis de que el estrato analizado es incompresible, homogéneo y de espesor pequeño). Así, pueden tabularse los valores del tiempo en que el estrato alcanza los grados de consolidación correspondientes a esos factores de tiempo considerados, según se desarrolla el proceso. Por otro lado, se han obtenido valores de  $U(Z)$  para diferentes valores de  $T$ , evaluados en la relación teórica que se desprende de la solución de la ecuación (40); estos resultados están tabulados en la tabla 3.5.10.

TABLA 3.5.10.

$U(\%)$	$T$	$U(\%)$	$T$
0	0.000	55	0.238
10	0.008	60	0.287
15	0.018	65	0.342
20	0.031	70	0.405
25	0.049	75	0.477
30	0.071	80	0.565
35	0.096	85	0.684
40	0.126	90	0.848
45	0.159	95	1.127
50	0.197	100	$\infty$

Relación teórica  $U(\%) - T$ ; valores que resultan de la aplicación de la ecuación diferencial de la consolidación unidimensional.<sup>20</sup>

<sup>20</sup>Retomada de la sección X-7, Cap. X, Juárez Badillo y R. Rodríguez, Mecánica de Suelos, V.-1.



## ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE TALUD.

Como talud se define, en ingeniería, a cualquier superficie inclinada con respecto a la horizontal que ha de adoptar permanentemente una estructura de tierra (terraplén formado con uno o más tipos de materiales), principalmente. Los taludes pueden ser clasificados básicamente en dos clases: Taludes naturales, característico de la morfología geológica; y taludes artificiales, formados por la acción del hombre tales como las obras de corte y terraplén.

Una actividad muy común en la construcción y operación de un relleno sanitario es la excavación (corte) y en esencia, la construcción de terraplenes formados por desechos y material de cubierta (tierra). Es por esto que en el diseño de las celdas de confinamiento y en la operación general del relleno se debe realizar un previo análisis de la estabilidad de los taludes propuestos durante la construcción u operación de los mismos. Los resultados de estos análisis muchas veces definirán el procedimiento constructivo del relleno; sobre todo si éste se realiza en una barranca o ladera de pendiente considerable, en la que la inestabilidad del terreno podría ocasionar problemas o accidentes que afectan que ponen en riesgo al personal, el equipo y la operación del relleno.

Existen gran cantidad de causas por las que un talud falla; las excavaciones son unas de las principales. Así mismo, los mecanismos de falla de talud tienen también un número considerable de variantes, éstos se hacen presentes dependiendo de las características mecánicas e hidráulicas de los materiales que constituyen el talud, y a las condiciones de la geología local; pero las formas más comunes de las superficies de falla son las de traslación, de rotación y de una combinación de éstos dos tipos (ver figura 3.5.11).

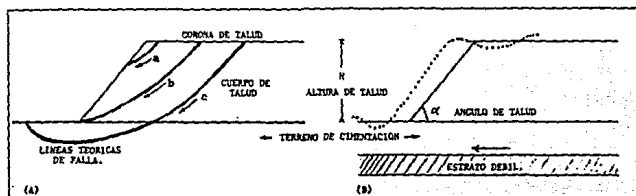
Para los análisis de la estabilidad de Talud, se cuentan con varios métodos de cálculo; pero los más populares, debido a la facilidad de aplicación práctica (en particular para el análisis de fallas por rotación), son los comprendidos por el Método Sueco<sup>20</sup> en el que se considera que las superficies de falla en un terraplén son cilíndricas o circulares.

El Método Sueco consiste básicamente en determinar el conjunto de fuerzas resistentes ( $F_r$ ) a lo largo de la superficie circular de falla de longitud  $L$ , que equilibre la tendencia al deslizamiento de la masa del terraplén, ocasiona

<sup>20</sup>Método basado en la división de las masa del talud en estudio en dovelas, para un análisis de equilibrio de las mismas. (Juárez Badillo y R. Rodríguez, Mecánica de Suelos, Cap. V, vol. 2.).

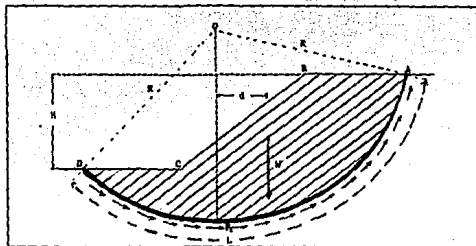
do por el peso de la misma y por alguna sobrecarga que pudiera actuar sobre la corona del talud (momento motor  $M_n$ ). Las fuerzas que se oponen a este deslizamiento ( $F_r$ ) pueden ser las originadas por los efectos de cohesión, fricción o por el efecto de ambas (ver figura 3.5.12).

FIGURA 3.5.11.



Tipos de fallas básicas: (A) De rotación; a Local, b De pie de talud y c de base. (B) Fallas de Traslación.

FIGURA 3.5.12.



Círculo hipotético considerado para determinar la estabilidad de talud en fallas por rotación de pie y de base de talud.

De acuerdo a la figura 3.5.12, en la que se considera un arco de circunferencia de radio R, con origen en el punto O, como la traza de una superficie tectónica de falla (zona rallada) y considerando, para todo el análisis, un espesor de talud unitario normal al plano del papel; y que no existen sobrecargas, resulta que el momento motor está dado por lo siguiente:

$$M_m = W d \quad ( 52 )$$

Las fuerzas resistentes que actúan a lo largo de la superficie de falla crearán un momento de equilibrio opuesto al momento motor  $M_r$ , respecto al eje de rotación O, normal al plano del papel. Este momento de equilibrio se define como momento resistente ( $M_r$ ) y está dado por:

$$M_r = F_r L R \quad ( 53 )$$

Es claro que la condición de equilibrio se presenta cuando  $M_m = M_r$ . Entonces, para efectos de diseño, se define el factor de seguridad  $F_s$  como la relación entre la resistencia promedio al esfuerzo cortante a lo largo de la superficie de falla, y los esfuerzos cortantes que se determinan en dicha superficie. Así, dicho factor de seguridad está dado por la siguiente relación:

$$F_s = \frac{M_r}{M_m} \quad ( 54 )$$

De la relación anterior se ve que valores del  $F_s$  mayores que uno garantizan la estabilidad del talud (para esa superficie de falla considerada). En la práctica, la experiencia de campo establece un  $F_s = 1.5$  como un valor compatible con una estabilidad razonable. Así, se considera que valores de  $F_s$  mayores o iguales a 1.5 dan como segura una estructura de talud. Por supuesto, es claro también que existen  $n$  superficies hipotéticas de falla con sus respectivos valores de  $F_s$ ; lo cual resulta que el problema específico es determinar la superficie de falla que presente las condiciones de equilibrio más críticas (circulo crítico) del talud que se analiza. Es por esto que este procedimiento de cálculo resulta ser un método de tanteos, en el que se escogen superficies de falla circulares con diferentes centros y radios; y ver que entre sus factores

de seguridad, el mínimo encontrado no sea menor a 1.5. En la práctica, se recomienda encontrar dos círculos críticos: uno que pase por el pie de talud, y otro que determine la falla de base (ver figura 3.5.11-A). Entonces, el círculo elegido será el más crítico de los dos.

En general, las hipótesis consideradas por el método Sueco para determinar la estabilidad de un talud son las que se enlistan a continuación:

- Falla circular.
- Aplicación en general a círculos de falla de base y por pie de talud.
- El análisis responde a un estado de deformación plana.
- Se cumple la ley de resistencia de Mohr-Coulomb<sup>21</sup>.
- La resistencia al esfuerzo cortante se distribuye al mismo tiempo y por completo en toda la superficie de deslizamiento.

Un procedimiento de aplicación muy popular del método Sueco es el de "dovelas", desarrollado por Fellenius (en 1927) que consiste en dividir el círculo de falla propuesto como lo muestra la figura 3.5.13. En dicha figura se muestra las fuerzas que actúan en una dovela para el análisis de equilibrio de la misma. Para este análisis se considera que los efectos de las fuerzas normales  $P_1$  y  $P_2$ ; y las fuerzas tangenciales  $T_1$  y  $T_2$  debidas a la acción de las dovelas adyacentes a las dovelas en estudio, se contrarrestan; ya que se establece la hipótesis de que éstas son colineales, iguales y contrarias unas con otras. También se considera que cada dovela actúa en forma independiente de las otras y que las fuerzas  $N_i$  y  $F_{ri}$  (fuerzas normal y resistente) equilibran el peso de la dovela ( $W_i$ ). Con estas consideraciones se puede calcular el momento motor, ocasionado por cada dovela, de la siguiente manera:

$$M_m = R \sum |F_{ri}| \quad (55)$$

Por otro lado, el momento resistente está dado por:

$$M_r = R \sum S_i A_i l_i \quad (56)$$

en donde  $S_i$  representa la resistencia al esfuerzo cortante actuante en esa dovela a lo largo del segmento de superficie de falla  $A_i l_i$ . Así, del diagrama de cuerpo

<sup>21</sup>Esta Ley considera que la resistencia de un material puede determinarse con el esfuerzo cortante máximo que puede soportar ese material, el cual a su vez, es función del esfuerzo normal que actúa en el plano en el que ocurre la falla. ( Juárez Badillo, Mecánica de Suelos; Cap. XI, v.1)

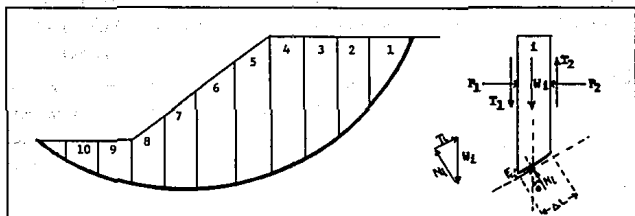
libre de la figura 3.5.14. y de las condiciones de equilibrio, resulta:

$$Fr_1 = W_1 \operatorname{sen} \theta \quad (57)$$

$$N_1 = W_1 \operatorname{cos} \theta \quad (58)$$

Como se ve en el análisis anterior, el ángulo  $\theta$  definirá la contribución de  $Fr_1$  y  $N_1$  para equilibrar el sistema en cada dovela.

TABLA 3.5.13.



Método de dovelas para determinar el equilibrio dinámico de la masa del talud. En éste, se considera el análisis particular de cada dovela (ver detalle a la izquierda del talud).

FIGURA 3.5.14.

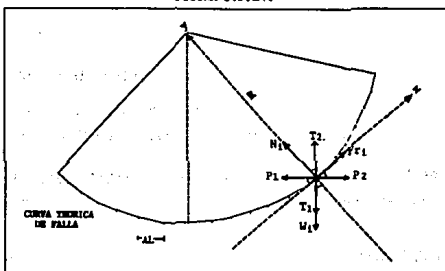


Diagrama de cuerpo libre en un tramo AL en el que se encuentra una de las dovelas en estudio a lo largo de la superficie de falla considerada.

## ESTABILIDAD DE TALUD DE LAS CELDAS DE CONFINAMIENTO.

Las celdas de confinamiento están formadas en un 85% por desechos sólidos (el resto es material de cubierta) aproximadamente. El principal problema para analizar la estabilidad del talud formado por estos desechos reside en obtener los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante dados por la fricción, la cohesión o por ambas, expresados en  $\phi$  y  $C'$  (fuerzas de fricción y de cohesión). Para la mayoría de los diferentes tipos de desechos, las pruebas de resistencia realizadas en otros materiales no son aplicables por las siguientes razones:

- Los desechos tienen una constitución extremadamente heterogénea.
- Los desechos degradables cambian sus propiedades.
- Es difícil el manejo de los desechos en laboratorio en las proporciones requeridas.

Por lo anterior, analizar la estabilidad de los desechos es complicado; sin embargo, puede combinarse el análisis empírico de campo con las teorías de estabilidad desarrolladas; utilizando factores de seguridad más altos (1.5-2) o, por otro lado, usando valores más bajos de  $\phi$  y  $C'^*$  para determinar con esto, un ángulo de pendiente estable. Teniendo estos datos, se debe tener cuidado en checar que la totalidad del círculo de falla analizado pase sólo a través de los desechos y no interseque partes de las bermas de apoyo.

La práctica en la operación de rellenos sanitarios ha obtenido datos respecto a la estabilidad de talud de los desechos, reportando como taludes estables los construidos con las siguientes pendientes:<sup>22</sup>

Desechos municipales	3 : 1 y 4 : 1
Lodos con un contenido mínimo de 40% de sólidos	6 : 1 y 7 : 1

Aun así, la estabilidad de talud de las celdas de confinamiento puede verse alterada en forma negativa por las malas condiciones del suelo donde son construidas.

\*Si se pudieran obtener los esfuerzos de resistencia debido a la fricción y/o la cohesión estos deben reducirse de un 15 a 25 %.

<sup>22</sup>Bagchi Anandoo; Design, Construction and Monitoring of Sanitary Landfill, 1990.

#### CAPITULO IV. DISEÑO DE UN RELLENO SANITARIO.

Ahora que se han revisado las consideraciones más importantes para llevar a cabo la construcción de los elementos básicos de un relleno sanitario, podemos proseguir con el diseño de éstos. Para ello, se aplican las ecuaciones presentadas en el capítulo anterior, utilizando los datos (número indicadores) - que fueron recopilados y presentados en las tablas en su momento indicadas. - Los resultados obtenidos definen el dimensionamiento de las celdas de confinamiento y de la infraestructura complementaria; y establecen además, los criterios para llevar a cabo la construcción y la operación de un relleno sanitario. En este caso, para desarrollar nuestro ejemplo de aplicación de los conceptos estudiados, se considera lo siguiente:

El sitio que se toma en cuenta para el diseño de las celdas de confinamiento está ubicado en la Zona del Lago de Texcoco denominada Bordo Poniente. Actualmente este sitio está operando oficialmente como relleno sanitario desde 1987; captando aproximadamente el 60 % de los desechos municipales que se generan en el Distrito Federal. El resto de los desechos es absorbido por los rellenos sanitarios de Santa Catarina y de Prados de la Montaña, cuya vida útil, de éstos últimos, está por terminarse. Por tal razón, se considera que la totalidad de los desechos a disponer serán, en breve tiempo, confinados en la zona de Bordo Poniente, cuyas características más significativas para nuestros propósitos de diseño, se mencionan en la primera sección de este capítulo. Así mismo, se utilizan los datos de la tabla 4a como parámetros básicos para el proyecto.

TABLA 4a.\*

AREA DEL SITIO DE CONFINAMIENTO:	800 ha
GENERACION DIARIA ( PROYECTADA ):	13,112,700 kg/día
INCREMENTO ANUAL DE LA GENERACION:	3 %
EFICIENCIA DE LA RECOLECCION :	80 %
PORCENTAJE DE DESECHOS RECICLADOS Y/O TRATADOS:	19 %
VOLUMEN DEL MATERIAL DE CUBIERTA:	15 % DEL VOLUMEN DE DESECHOS A DISPONER
DENSIDAD DE LOS DESECHOS CONFINADOS:	700 kg/m <sup>3</sup>

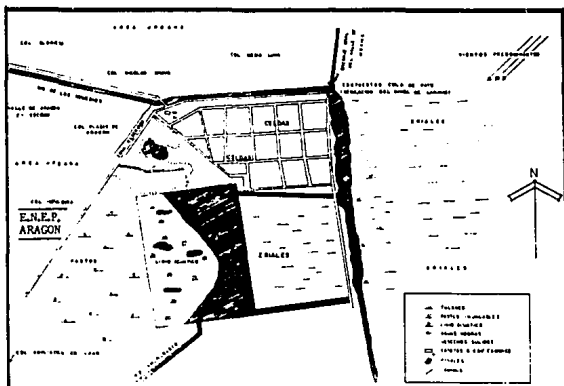
\* Las fuentes, así como los criterios que soportan a estos datos, están ya referenciados en las tablas y en el marco teórico de las secciones correspondientes.

#### 4.1 ASPECTOS GENERALES DEL AREA DE BORDO PONIENTE.

El área destinada para la disposición de desechos sólidos municipales en el área de Bordo Poniente consta de cuatro etapas. La primera y segunda etapa con 70 y 75 hectáreas respectivamente; la tercera etapa ( en la cual se está llevando a cabo la actual disposición ) cuenta con 100 hectáreas, las cuales están por saturarse en un tiempo no muy lejano. La cuarta etapa se pretende extender en una extensión aproximada de 800 hectáreas. Esta última etapa es considerada para desarrollar el presente diseño de las celdas de confinamiento y de la infraestructura complementaria.

**LOCALIZACION.** Bordo Poniente se encuentra al nororiente del Distrito Federal, dentro de la Zona Federal del Exlago de Texcoco; colinda al poniente con el Lago de Regulación Horaria y las colonias Ciudad Lago y Plazas de Aragón; al oriente con el Dren General del Valle de México; al norte con el Río de los Remedios y al sur por la carretera Peñón- Texcoco ( ver figura 4.1.1 ). Las coordenadas geográficas del sitio son: latitud  $19^{\circ}20'$ , longitud  $99^{\circ}14'$ .

FIGURA 4.1.1.



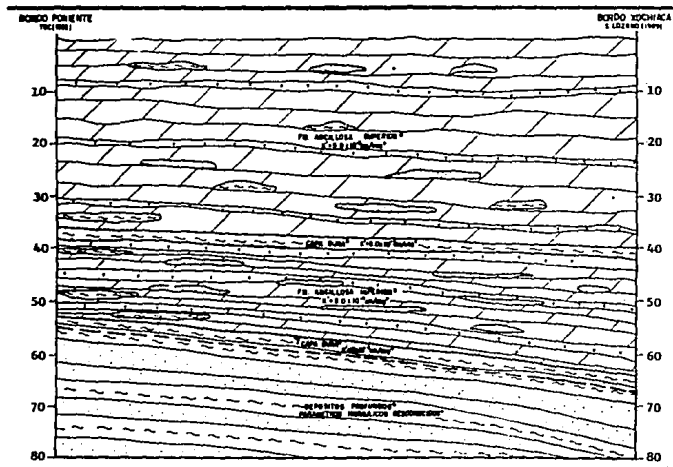
Localización del área destinada para el confinamiento de desechos sólidos municipales (Relleno Sanitario de Bordo Poniente).



CLIMA. El clima de la zona es semiseco, templado frío, con baja concentración-térmica en verano; las lluvias se presentan con valores cercanos a 550 mm/año. La temperatura oscila en un rango muy variable entre 12 y 20 °C.

SUELO. El suelo del área en estudio es característicamente de material arcilloso. Los análisis de mecánica de suelos<sup>1</sup> llevados a cabo en este sitio indican estratos de arcilla intercalados con lentes de arena y ceniza volcánica de 60-cm de espesor, detectados a profundidades de 9, 14, 20 y 36 metros. Entre los 38 y 42 m. de profundidad existe un estrato duro de 1.5 m de espesor (ver figura 4.1.2).

FIGURA 4.1.2.



Estratigrafía de la Zona de Bordo Poniente.

\*Terminología litoestratigráfica informal dada por Marsal y Mazan (1959)

+Según Rudolph et al (1989).

Las arcillas de este suelo son muy blandas; tienen una densidad próxima de  $1375 \text{ kg/m}^3$  y un contenido de agua de 151%. Estas tienen una consistencia blanda y una resistencia a la penetración estándar de 3 golpes y valores pro-

<sup>1</sup>Dirección Técnica de Desechos Sólidos, D.D.F., 1991 (Informe interno de los estudios realizados por Laboratorios Tlalili, 1983.).

medio de resistencia de  $0.13 \text{ kg/cm}^2$ . Las muestras de suelo estudiadas determinaron una relación de vacíos de 9.4 y una permeabilidad de  $3.49 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ . La densidad de sólidos es del orden de 2.53. En el estudio de suelos más reciente (1990)<sup>2</sup> se determinó, con un factor de seguridad igual a 3 y utilizando la relación de Zeevaert, una capacidad de carga de  $0.28 \text{ kg/cm}^2$ . Se encontró también una cohesión de  $0.20 \text{ kg/cm}^2$ . El nivel freático fluctúa entre los 2.5 m y 3.0 m de la superficie. Para efecto de análisis nosotros consideraremos el N.A.F. a 2.5 m de profundidad.

#### VIDA UTIL DEL SITIO.

De acuerdo a los datos de la tabla 4a. y con la aplicación de la relación (8), podemos determinar el número de años "n" proyectados para saturar, con los desechos que se generan, el sitio destinado para el confinamiento de los mismos. Así pues, substituyendo los datos referidos en (8) tenemos:

$$n = \frac{\log [ (8 \times 10^6 \text{ m}^2) (7.95 \text{ m}) / (365 \text{ días/año}) (13112700 \text{ kg/día}) / (700 \text{ kg/m}^3) (0.7) + 1 ]}{\log (0.03)}$$

$$n = 11.33 \text{ años}$$

Con la generación proyectada para este tiempo, y utilizando la misma relación, se puede graficar el valor acumulado de los desechos y el porcentaje del espacio ocupado en el relleno durante la vida útil del mismo. Estos resultados están graficados y tabulados en la gráfica 4.1.3. y la tabla 4.1.4.

En la práctica, se puede considerar un 30% adicional al tiempo de vida útil proyectado; esto debido al volumen dado por los asentamientos debidos a la descomposición de los desechos que generalmente se da a los cinco años (dependiendo principalmente de la composición física de los desechos). Si se quiere utilizar este volumen, se requiere realizar un análisis de la capacidad de carga del suelo para absorber sobrecargas adicionales que no son consideradas en el estudio inicial.

<sup>2</sup>Santoyo, 1989; T.C.C, 1990.

GRAFICA 4.1.3.

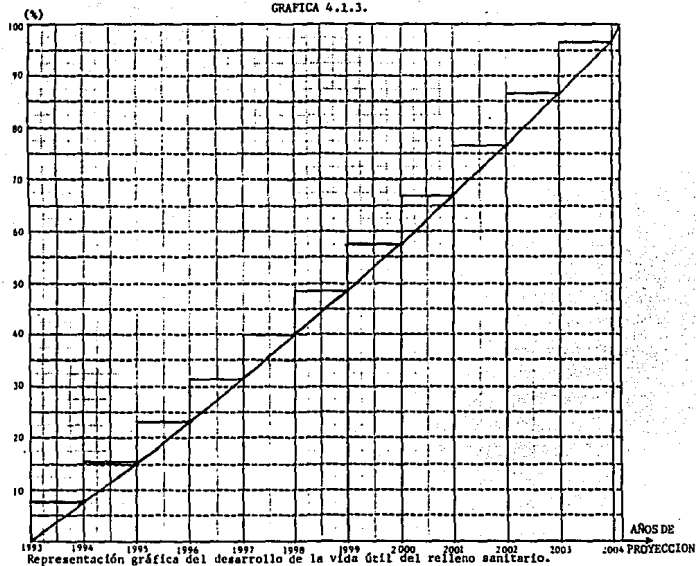


TABLA 4.1.4.

AÑO	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
VALORES ACUMULADOS	479491.50	973647.75	1482166.5	2006411.0	2546669.9	31015076.2	36751168.5	42631125.0	48727050.3	54981251.3	61421202.4	63600000.0
PORCENTAJES DE ESPACIO OCUPADO	7.54	15.31	23.31	31.51	40.03	48.78	57.78	67.06	76.61	86.45	96.58	100.0

Valores de los volúmenes acumulados dados por la ecuación (8) y de los respectivos porcentajes de espacio ocupado (vida útil).

#### 4.2. DISEÑO DE CELDAS Y DEL FRENTE DE TRABAJO.

Como se mencionó anteriormente, una celda de confinamiento de desechos es la conformación geométrica que se le da a los desechos sólidos y al material - de cubierta debidamente compactados, llevada a cabo en una operación diaria. Los elementos de una celda lo constituyen la altura, el largo, ancho, pendientes - de taludes y el espesor de la capa de tierra como cobertura. A la zona de descarga y en general, de las primeras maniobras de arrastre y compactación de -- los desechos, se le denomina como " frente de trabajo ".

El ancho mínimo del frente de trabajo depende de la longitud de la cuchilla del equipo que se utilice en la construcción de las celdas ( se recomienda, considerando este criterio, que el ancho del frente de trabajo sea 2.5 veces - el largo de cuchilla del equipo empleado ) y el número de vehículos que llegan al sitio de confinamiento en una hora " pico ". El ancho del frente de trabajo - debe ser tal, que se asegure la facilidad de maniobra del equipo en operación - y el libre flujo de los vehículos de transferencia de desechos (tractocamiones para regiones con alta generación de desechos ). La tabla 4.2.1 muestra los va - lores recomendados del ancho de frente de trabajo, la cual considera los crite - rios arriba mencionados.

TABLA 4.2.1.

TONELADAS DIARIAS QUE LLEGAN AL RELLENO	LONGITUD DE CUCHILLA RECOMENDADA (m)..					ANCHO MINIMO DEL FRENTE (m).				
20-50	4.0					10				
50-130	5.5					14				
130-250	6.5					16				
250-500	7.5					19				
> 500	más de una máquina					> 20				
NUMERO DE VEHICULOS EN LA HORA PICO.	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
ANCHO DEL FRENTE DE TRABAJO (m).	20	24	28	32	36	40	44	48	52	

Valores recomendados para frentes de trabajo de una celda de confinamiento.<sup>3</sup>

Por otro lado, en las Normas Oficiales de Ecología<sup>4</sup>, se establece fórmu-- las de cálculo para el dimensionamiento ( altura, largo y ancho o frente de tra - bajo ) de las celdas diarias, las cuales consideran, además de lo ya mencionado,

<sup>3</sup>Manual para el manejo de desechos sólidos; SEDUE, 1990.

<sup>4</sup>Proyecto de Norma Oficial Mexicana NOM-084-ECOL-1994, que establece los requisitos para el diseño de un relleno sanitario y la construcción de sus obras complementarias. Publicada en el Diario -- Oficial el 22 de junio de 1994.

la población de la zona de generación de desechos y el tiempo promedio de descarga de cada vehículo recolector.

#### ESPACIO REQUERIDO AL DIA

El espacio requerido diariamente para el confinamiento de desechos está en función de la cantidad neta de éstos y del volumen del material de cubierta (tierra de cobertura), como se ha indicado. Para efectos de operación, se determina el área requerida, en el primer año, para llevar a cabo el confinamiento de desechos durante una jornada de trabajo (celda diaria). Entonces, proponiendo una altura de celda diaria de 2.5 m y considerando los datos de la tabla 4a, aplicamos la relación (6) para un día de operación; lo que resulta:

$$A = (1/700 \text{ kg/m}^3)(0.61)(1.15)(13,112,700. \text{ kg/día})/(2.5 \text{ m}) \\ = 5,256.32 \text{ m}^2$$

Considerando la tabla 4.2.1, se propone un frente de trabajo de 60 m. Así, la longitud diaria de avance será:

$$L = \frac{5,256.32 \text{ m}^2}{60 \text{ m}} = 87.60 \text{ m} \approx 88.0 \text{ m.}$$

Entonces, tenemos que las dimensiones de la celda diaria para el confinamiento de desechos municipales son de 88 m de largo por 60 m de ancho (frente de trabajo).

#### MATERIAL DE CUBIERTA.

El espesor de la capa de tierra para la cobertura diaria de los desechos debe ser tal, que sea un volumen entre el 15 y 30% del volumen de desechos a confinar; es decir, considerando un volumen unitario en una área unitaria, entre 0.15 y 0.30 m de espesor<sup>5</sup>. Considerando criterios económicos, se propone un espesor de tierra para cobertura de 0.15m.

#### TALUD DE CELDA.

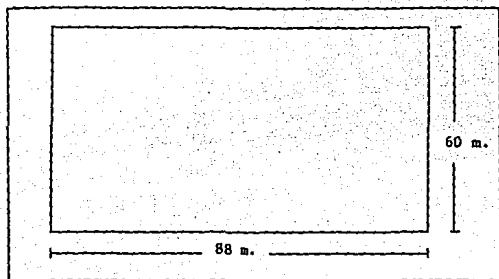
Es el plano inclinado contra el cual se empujan los desechos para compactarlos. Para facilidad de operación, la experiencia ha demostrado que los taludes recomendables son los que tienen una relación de 3:1.

En las figuras 4.2.2 y 4.2.3 se representan las dimensiones (no a escala)

<sup>5</sup>En la Norma Oficial anteriormente citada, también se establece el espesor que debe considerarse para la cubierta diaria; siendo éste de 0.30 y 0.60 m para los niveles intermedios y el nivel final, respectivamente. Por el costo y por la disponibilidad del material adecuado, estas medidas pueden ser difícilmente aplicadas.

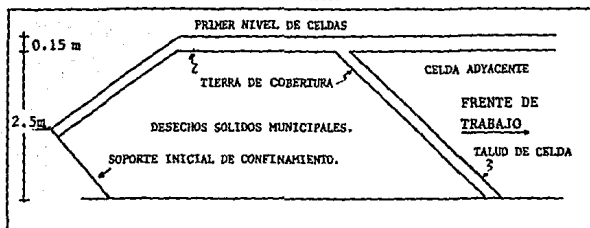
de la celda propuesta para el primer año de operación.

FIGURA 4.2.2.



PLANTA DE LA CELDA PROPUESTA PARA EL CONFINAMIENTO DE DESECHOS.

FIGURA 4.2.3.



VISTA TRANSVERSAL DE LA CELDA PROPUESTA (PRIMER NIVEL).

#### 4.3. REVISIÓN DE ASENTAMIENTOS.

De acuerdo a los datos recopilados sobre las características del suelo local en donde se proyecta la construcción de las celdas de confinamiento, a las dimensiones propuestas de las celdas diarias y las consideraciones expuestas - en las secciones anteriores; se determinan los siguientes parámetros:

DETERMINACION DE CARGAS. Aplicando las ecuaciones (25) y (26) considerando 3-niveles, con una altura de 2.5 m cada uno y 0.15 m de espesor del material de cubierta; tenemos que el peso por  $m^2$  aplicado al suelo es:

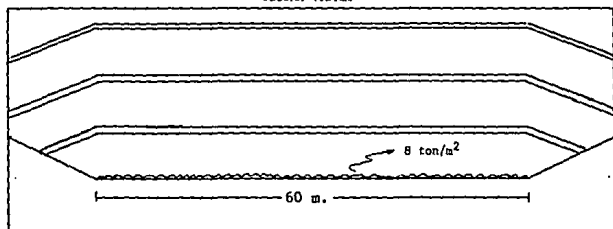
$$W_d = 3 (2.5 \text{ m})(700 \text{ kg/m}^3) = 5,250.0 \text{ kg/m}^2$$

$$W_m = 3 (0.15\text{m})(1350 \text{ kg/m}^3) = 607.5 \text{ kg/m}^2$$

$$W_d + W_m = 5,250.0 + 607.5 = 5,857.5 \text{ kg/m}^2 \approx 6.0 \text{ ton/m}^2$$

considerando una carga adicional (cargas vivas) de  $2 \text{ ton/m}^2$ , tenemos una carga total de  $8.0 \text{ ton/m}^2$  (ver figura 4.3.1).

FIGURA 4.3.1.



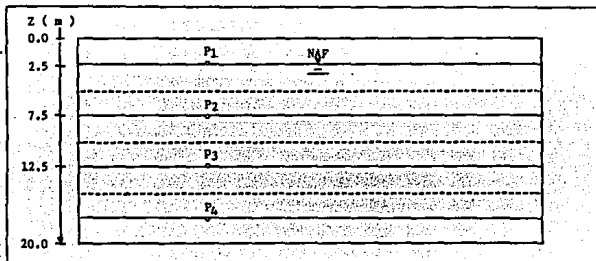
Vista general de las celdas de confinamientos (3 niveles).

#### CALCULO DE ASENTAMIENTOS.

El análisis de asentamientos se llevará a cabo de acuerdo con el procedimiento indicado en el capítulo anterior, considerando las cargas arriba calculadas y realizando el análisis bajo el área que ocupa una celda diaria y bajo el área ocupada por los desechos sólidos acumulados en un año de operación (módulo de confinamiento).

DETERMINACION DE LAS CONDICIONES INICIALES DE ESFUERZO. Las condiciones de es fuerzo antes de la sobre carga del terreno, se determinan aplicando las rela-- ciones (27), (28), (29) y (30); considerando muestras a las profundidades in-- dicadas en el diagrama 4.3.2.

FIGURA 4.3.2.



Esquema representativo de la profundidad de cada punto en los estratos considerados.

Tomando en cuenta la figura anterior tenemos:

$$\bar{V}_{P_1} = (2.5 \text{ m})(1375 \text{ kg/m}^3) = 3,437.5 \text{ kg/m}^2$$

$$\bar{V}_{P_2} = (5.0 \text{ m})(375. \text{ kg/m}^3) + \bar{V}_{P_1} = 5,312.5 \text{ kg/m}^2$$

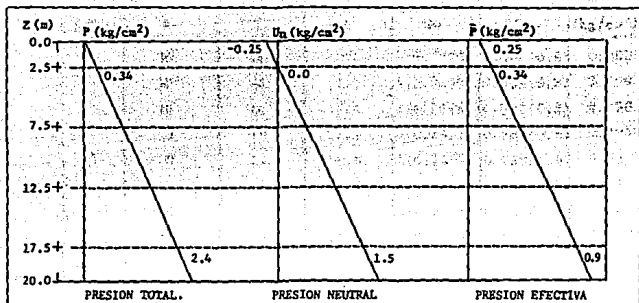
$$\bar{V}_{P_3} = (5.0 \text{ m})(375.0 \text{ kg/m}^3) + \bar{V}_{P_2} = 7,187.5 \text{ kg/m}^2$$

$$\bar{V}_{P_4} = (5.0 \text{ m})(375.0 \text{ kg/m}^3) + \bar{V}_{P_3} = 9,062.5 \text{ kg/m}^2$$

Con estos resultados podemos graficar los diagramas de esfuerzo total, neutral y efectivo que representan las condiciones de esfuerzo del suelo an tes de la aplicación de cargas (ver figura 4.3.3).



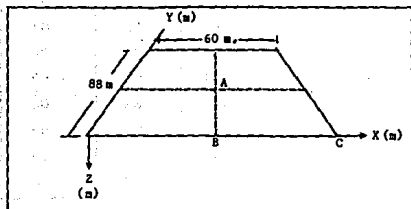
FIGURA 4.3.3.



Distribución de esfuerzos (fuera de escala) bajo el suelo en estudio en condiciones iniciales (sin carga) considerando las características del terreno indicadas previamente.

CALCULO DE LA DISTRIBUCION DE ESFUERZOS DEBIDOS A SOBRECARGA DEL TERRENO. Los esfuerzos sobre el suelo producidos por la carga actuante están tabulados en la tabla 4.3.5. Estos son el resultado de la aplicación de la ecuación (32). Para esto se consideran tres puntos sobre la superficie (A, B y C) de la celda-proyectada y a profundidades  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  y  $P_4$  indicadas en los esquemas anteriores (ver figura 4.3.4).

FIGURA 4.3.4.



Ubicación de los puntos de interés (críticos) y la respectiva división del área para aplicar la relación (32) y determinar la distribución de esfuerzos en dichos puntos para el cálculo de asentamientos en los mismos.

TABLA 4.3.5.

PUNTO	X	Y	Z	W <sub>0</sub>	W <sub>0</sub> W	(kg/cm <sup>2</sup> )
A	30	44	0.0	4(0.2500)	1.000(0.8)	0.8000
	30	44	2.5	4(0.2499)	0.999(0.8)	0.7997
	30	44	5.0	4(0.2494)	0.997(0.8)	0.7981
	30	44	7.5	4(0.2481)	0.992(0.8)	0.7940
	30	44	10.0	4(0.2458)	0.983(0.8)	0.7866
	30	44	12.5	4(0.2423)	0.960(0.8)	0.7755
	30	44	15.0	4(0.2376)	0.950(0.8)	0.7605
	30	44	17.5	4(0.2319)	0.920(0.8)	0.7421
	30	44	20.0	4(0.2252)	0.900(0.8)	0.7207
B	30	88	0.0	2(0.2500)	0.500(0.8)	0.4000
	30	88	2.5	2(0.2499)	0.499(0.8)	0.3999
	30	88	5.0	2(0.2495)	0.498(0.8)	0.3992
	30	88	7.5	2(0.2484)	0.496(0.8)	0.3975
	30	88	10.0	2(0.2465)	0.493(0.8)	0.3943
	30	88	12.5	2(0.2435)	0.487(0.8)	0.3897
	30	88	15.0	2(0.2397)	0.479(0.8)	0.3835
	30	88	17.5	2(0.2349)	0.469(0.8)	0.3759
	30	88	20.0	2(0.2252)	0.450(0.8)	0.3671
C	60	88	0.0	1(0.2500)	0.250(0.8)	0.2000
	60	88	2.5	1(0.2499)	0.249(0.8)	0.1999
	60	88	5.0	1(0.2497)	0.249(0.8)	0.1999
	60	88	7.5	1(0.2497)	0.249(0.8)	0.1998
	60	88	10.0	1(0.2494)	0.249(0.8)	0.1995
	60	88	12.5	1(0.2489)	0.248(0.8)	0.1991
	60	88	15.0	1(0.2481)	0.248(0.8)	0.1985
	60	88	17.5	1(0.2471)	0.247(0.8)	0.1977
	60	88	20.0	1(0.2458)	0.245(0.8)	0.1966

Resultados de la aplicación de la relación (32). Distribución de esfuerzos bajo los puntos A, B y C a las profundidades indicadas.

Los esfuerzos obtenidos bajo los puntos B y C pueden considerarse iguales a los de los de los otros puntos del área rectangular que la delimitan. Es decir, las esquinas del rectángulo total pueden designarse con el punto C y la parte media de cada tramo que forma el mismo, con el punto B. Lo anterior debido a que al dividir el área de la celda propuesta en cuatro secciones iguales, estos puntos coinciden en distancias con el punto A usado como referencia. Por esto mismo, para aplicar la ecuación (32) se considera como área cargada, para el punto A, cuatro veces el área  $\overline{AB-BC}$ , dos veces el área  $\overline{BB-BC}$  para el punto B y el área  $\overline{CC-CC}$  para el punto C.

El objetivo de realizar esta división del área, es el de analizar los asentamientos en las zonas críticas del área cargada (centro, esquinas y partes medias); y para esto, el punto de referencia para aplicar la ecuación (32) debe ser un esquina del área rectangular sobre el punto de estudio.

Los esfuerzos para cada punto y para cada profundidad Z resulta de multiplicar  $W_u$  [valores dados por (32)] por la carga W considerada uniformemente distribuida sobre el área rectangular, cuyo valor resultó, de acuerdo al análisis realizado en la sección anterior, de  $0.80 \text{ kg/cm}^2$ . La distribución de esfuerzos para cada punto puede verse en la figura 4.3.7.

Enseguida, calculamos el asentamiento de cada uno de los estratos bajo los puntos A, B y C delimitados entre 0.0 y 5.0 m, 5.0 y 10.0 m, 10.0 y 15.0 m y entre 15.0 y 20.0 m, en los cuales se considera para el análisis, un punto intermedio situado a 2.5, 7.5, 12.5 y 17.5 m, respectivamente. Además, no se consideran los pequeños estratos de arena que reporta la estratigrafía del sitio (figura 4.1.2).

Así pues, aplicando los resultados registrados en la tabla 4.3.5, los valores expresados en el diagrama de la figura 4.3.3 y la ecuación (43), podemos llenar la tabla 4.3.6, en la cual se indican los asentamientos estimados para cada punto. En la parte C de la figura 4.3.7 está representado un esquema tridimensional del área en estudio y los respectivos asentamientos de cada uno de sus puntos críticos.

TABLA 4.3.6.

PUNTO	Z	H	P <sub>o</sub>	e <sub>o</sub>	Ap	P	e	Δe	ΔH
A	2.5	5.0	0.343	4.1	0.799	1.14	2.6	1.5	1.47
A	7.5	5.0	0.531	8.6	0.794	1.32	5.5	3.1	1.61
A	12.5	5.0	0.718	6.9	0.775	1.49	4.0	2.9	1.83
A	17.5	5.0	0.906	5.2	0.742	1.64	3.9	1.3	1.04
ΔH = 5.95									
B	2.5	5.0	0.343	4.1	0.399	0.74	2.9	1.2	1.17
B	7.5	5.0	0.531	8.6	0.397	0.92	6.3	1.7	0.88
B	12.5	5.0	0.718	6.9	0.389	1.10	5.8	1.1	0.69
B	17.5	5.0	0.906	5.2	0.375	1.28	4.3	0.9	0.72
ΔH = 3.46									
C	2.5	5.0	0.343	4.1	0.200	0.54	3.2	0.9	0.88
C	7.5	5.0	0.531	8.6	0.199	0.73	6.8	1.8	0.93
C	12.5	5.0	0.718	6.9	0.199	0.91	6.3	0.3	0.18
C	17.5	5.0	0.906	5.2	0.197	1.10	4.7	0.5	0.40
ΔH = 2.39									

TABLA DE RESULTADOS DEL CALCULO DE ASENTAMIENTOS EN LOS PUNTOS A, B Y C CU YA UBICACION SE MUESTRA EN LA FIGURA 4.3.4; Y EN DONDE:

Z = PROFUNDIDAD DEL ESTRATO EN METROS.

H = ESPESOR DEL ESTRATO EN METROS.

P<sub>o</sub> = PRESION INICIAL (SIN CARGA) EN kg/cm<sup>2</sup>.

e<sub>o</sub> = RELACION DE VACIOS PARA P<sub>o</sub> (DATOS DE LABORATORIO), ADIMENSIONAL.

Ap = ESFUERZO DEBIDO A LA CARGA (0.80 kg/cm<sup>2</sup>) APLICADA AL SUELO.

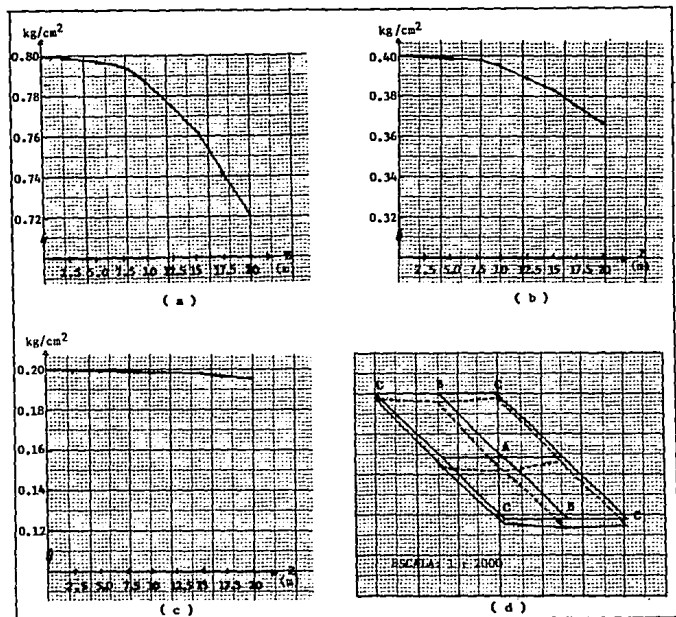
P = P<sub>o</sub> + Ap

e = RELACION DE VACIOS PARA P (DE GRAFICAS).

$$\Delta e = e_o - e$$

$$\Delta H = \frac{\Delta e}{(e_o + 1)} H$$

FIGURA 4.3.7.



Gráficas de distribución de esfuerzos bajo los puntos A (a), B (b) y C (c). En el recuadro (d) de esta figura se representan, en una perspectiva tridimensional, los asentamientos calculados en los puntos indicados.

El análisis anterior corresponde a los efectos debidos a las cargas (producidas por el pesos de los desechos, principalmente) actuantes sobre el área que ocupa una celda de confinamiento, considerando el diseño propuesto y utilizando la fórmulas de Boussinesq para una superficie rectangular uniformemente cargada. Para efectos de comparación y con el objetivo de comprender mejor el comportamiento del suelo del sitio de confinamiento, realizamos a continuación el análisis de asentamientos para el área ocupada por el conjunto de celdas -- construidas en un año de operación; utilizando ahora para el cálculo, el método desarrollado por Carothers, ya que en este caso se considera una carga trapezoidal de longitud infinita (por la forma trapecio-rectangular que presenta la estructura final del conjunto de celdas). Los resultados de este análisis se encuentran registrados en la tabla 4.3.8.

TABLA 4.3.8.

PUNTO	Z	b	a	u	r <sub>1</sub>	r <sub>2</sub>	r <sub>3</sub>	m	d	r <sub>4</sub>	r <sub>5</sub>	r <sub>6</sub>	r <sub>7</sub>	r <sub>8</sub>	r <sub>9</sub>	r <sub>10</sub>	r <sub>11</sub>	r <sub>12</sub>	r <sub>13</sub>	r <sub>14</sub>	r <sub>15</sub>	r <sub>16</sub>	r <sub>17</sub>	r <sub>18</sub>	r <sub>19</sub>	r <sub>20</sub>	r <sub>21</sub>	r <sub>22</sub>	r <sub>23</sub>	r <sub>24</sub>	r <sub>25</sub>	r <sub>26</sub>	r <sub>27</sub>	r <sub>28</sub>	r <sub>29</sub>	r <sub>30</sub>	r <sub>31</sub>	r <sub>32</sub>	r <sub>33</sub>	r <sub>34</sub>	r <sub>35</sub>	r <sub>36</sub>	r <sub>37</sub>	r <sub>38</sub>	r <sub>39</sub>	r <sub>40</sub>	r <sub>41</sub>	r <sub>42</sub>	r <sub>43</sub>	r <sub>44</sub>	r <sub>45</sub>	r <sub>46</sub>	r <sub>47</sub>	r <sub>48</sub>	r <sub>49</sub>	r <sub>50</sub>	r <sub>51</sub>	r <sub>52</sub>	r <sub>53</sub>	r <sub>54</sub>	r <sub>55</sub>	r <sub>56</sub>	r <sub>57</sub>	r <sub>58</sub>	r <sub>59</sub>	r <sub>60</sub>	r <sub>61</sub>	r <sub>62</sub>	r <sub>63</sub>	r <sub>64</sub>	r <sub>65</sub>	r <sub>66</sub>	r <sub>67</sub>	r <sub>68</sub>	r <sub>69</sub>	r <sub>70</sub>	r <sub>71</sub>	r <sub>72</sub>	r <sub>73</sub>	r <sub>74</sub>	r <sub>75</sub>	r <sub>76</sub>	r <sub>77</sub>	r <sub>78</sub>	r <sub>79</sub>	r <sub>80</sub>	r <sub>81</sub>	r <sub>82</sub>	r <sub>83</sub>	r <sub>84</sub>	r <sub>85</sub>	r <sub>86</sub>	r <sub>87</sub>	r <sub>88</sub>	r <sub>89</sub>	r <sub>90</sub>	r <sub>91</sub>	r <sub>92</sub>	r <sub>93</sub>	r <sub>94</sub>	r <sub>95</sub>	r <sub>96</sub>	r <sub>97</sub>	r <sub>98</sub>	r <sub>99</sub>	r <sub>100</sub>	r <sub>101</sub>	r <sub>102</sub>	r <sub>103</sub>	r <sub>104</sub>	r <sub>105</sub>	r <sub>106</sub>	r <sub>107</sub>	r <sub>108</sub>	r <sub>109</sub>	r <sub>110</sub>	r <sub>111</sub>	r <sub>112</sub>	r <sub>113</sub>	r <sub>114</sub>	r <sub>115</sub>	r <sub>116</sub>	r <sub>117</sub>	r <sub>118</sub>	r <sub>119</sub>	r <sub>120</sub>	r <sub>121</sub>	r <sub>122</sub>	r <sub>123</sub>	r <sub>124</sub>	r <sub>125</sub>	r <sub>126</sub>	r <sub>127</sub>	r <sub>128</sub>	r <sub>129</sub>	r <sub>130</sub>	r <sub>131</sub>	r <sub>132</sub>	r <sub>133</sub>	r <sub>134</sub>	r <sub>135</sub>	r <sub>136</sub>	r <sub>137</sub>	r <sub>138</sub>	r <sub>139</sub>	r <sub>140</sub>	r <sub>141</sub>	r <sub>142</sub>	r <sub>143</sub>	r <sub>144</sub>	r <sub>145</sub>	r <sub>146</sub>	r <sub>147</sub>	r <sub>148</sub>	r <sub>149</sub>	r <sub>150</sub>	r <sub>151</sub>	r <sub>152</sub>	r <sub>153</sub>	r <sub>154</sub>	r <sub>155</sub>	r <sub>156</sub>	r <sub>157</sub>	r <sub>158</sub>	r <sub>159</sub>	r <sub>160</sub>	r <sub>161</sub>	r <sub>162</sub>	r <sub>163</sub>	r <sub>164</sub>	r <sub>165</sub>	r <sub>166</sub>	r <sub>167</sub>	r <sub>168</sub>	r <sub>169</sub>	r <sub>170</sub>	r <sub>171</sub>	r <sub>172</sub>	r <sub>173</sub>	r <sub>174</sub>	r <sub>175</sub>	r <sub>176</sub>	r <sub>177</sub>	r <sub>178</sub>	r <sub>179</sub>	r <sub>180</sub>	r <sub>181</sub>	r <sub>182</sub>	r <sub>183</sub>	r <sub>184</sub>	r <sub>185</sub>	r <sub>186</sub>	r <sub>187</sub>	r <sub>188</sub>	r <sub>189</sub>	r <sub>190</sub>	r <sub>191</sub>	r <sub>192</sub>	r <sub>193</sub>	r <sub>194</sub>	r <sub>195</sub>	r <sub>196</sub>	r <sub>197</sub>	r <sub>198</sub>	r <sub>199</sub>	r <sub>200</sub>	r <sub>201</sub>	r <sub>202</sub>	r <sub>203</sub>	r <sub>204</sub>	r <sub>205</sub>	r <sub>206</sub>	r <sub>207</sub>	r <sub>208</sub>	r <sub>209</sub>	r <sub>210</sub>	r <sub>211</sub>	r <sub>212</sub>	r <sub>213</sub>	r <sub>214</sub>	r <sub>215</sub>	r <sub>216</sub>	r <sub>217</sub>	r <sub>218</sub>	r <sub>219</sub>	r <sub>220</sub>	r <sub>221</sub>	r <sub>222</sub>	r <sub>223</sub>	r <sub>224</sub>	r <sub>225</sub>	r <sub>226</sub>	r <sub>227</sub>	r <sub>228</sub>	r <sub>229</sub>	r <sub>230</sub>	r <sub>231</sub>	r <sub>232</sub>	r <sub>233</sub>	r <sub>234</sub>	r <sub>235</sub>	r <sub>236</sub>	r <sub>237</sub>	r <sub>238</sub>	r <sub>239</sub>	r <sub>240</sub>	r <sub>241</sub>	r <sub>242</sub>	r <sub>243</sub>	r <sub>244</sub>	r <sub>245</sub>	r <sub>246</sub>	r <sub>247</sub>	r <sub>248</sub>	r <sub>249</sub>	r <sub>250</sub>	r <sub>251</sub>	r <sub>252</sub>	r <sub>253</sub>	r <sub>254</sub>	r <sub>255</sub>	r <sub>256</sub>	r <sub>257</sub>	r <sub>258</sub>	r <sub>259</sub>	r <sub>260</sub>	r <sub>261</sub>	r <sub>262</sub>	r <sub>263</sub>	r <sub>264</sub>	r <sub>265</sub>	r <sub>266</sub>	r <sub>267</sub>	r <sub>268</sub>	r <sub>269</sub>	r <sub>270</sub>	r <sub>271</sub>	r <sub>272</sub>	r <sub>273</sub>	r <sub>274</sub>	r <sub>275</sub>	r <sub>276</sub>	r <sub>277</sub>	r <sub>278</sub>	r <sub>279</sub>	r <sub>280</sub>	r <sub>281</sub>	r <sub>282</sub>	r <sub>283</sub>	r <sub>284</sub>	r <sub>285</sub>	r <sub>286</sub>	r <sub>287</sub>	r <sub>288</sub>	r <sub>289</sub>	r <sub>290</sub>	r <sub>291</sub>	r <sub>292</sub>	r <sub>293</sub>	r <sub>294</sub>	r <sub>295</sub>	r <sub>296</sub>	r <sub>297</sub>	r <sub>298</sub>	r <sub>299</sub>	r <sub>300</sub>	r <sub>301</sub>	r <sub>302</sub>	r <sub>303</sub>	r <sub>304</sub>	r <sub>305</sub>	r <sub>306</sub>	r <sub>307</sub>	r <sub>308</sub>	r <sub>309</sub>	r <sub>310</sub>	r <sub>311</sub>	r <sub>312</sub>	r <sub>313</sub>	r <sub>314</sub>	r <sub>315</sub>	r <sub>316</sub>	r <sub>317</sub>	r <sub>318</sub>	r <sub>319</sub>	r <sub>320</sub>	r <sub>321</sub>	r <sub>322</sub>	r <sub>323</sub>	r <sub>324</sub>	r <sub>325</sub>	r <sub>326</sub>	r <sub>327</sub>	r <sub>328</sub>	r <sub>329</sub>	r <sub>330</sub>	r <sub>331</sub>	r <sub>332</sub>	r <sub>333</sub>	r <sub>334</sub>	r <sub>335</sub>	r <sub>336</sub>	r <sub>337</sub>	r <sub>338</sub>	r <sub>339</sub>	r <sub>340</sub>	r <sub>341</sub>	r <sub>342</sub>	r <sub>343</sub>	r <sub>344</sub>	r <sub>345</sub>	r <sub>346</sub>	r <sub>347</sub>	r <sub>348</sub>	r <sub>349</sub>	r <sub>350</sub>	r <sub>351</sub>	r <sub>352</sub>	r <sub>353</sub>	r <sub>354</sub>	r <sub>355</sub>	r <sub>356</sub>	r <sub>357</sub>	r <sub>358</sub>	r <sub>359</sub>	r <sub>360</sub>	r <sub>361</sub>	r <sub>362</sub>	r <sub>363</sub>	r <sub>364</sub>	r <sub>365</sub>	r <sub>366</sub>	r <sub>367</sub>	r <sub>368</sub>	r <sub>369</sub>	r <sub>370</sub>	r <sub>371</sub>	r <sub>372</sub>	r <sub>373</sub>	r <sub>374</sub>	r <sub>375</sub>	r <sub>376</sub>	r <sub>377</sub>	r <sub>378</sub>	r <sub>379</sub>	r <sub>380</sub>	r <sub>381</sub>	r <sub>382</sub>	r <sub>383</sub>	r <sub>384</sub>	r <sub>385</sub>	r <sub>386</sub>	r <sub>387</sub>	r <sub>388</sub>	r <sub>389</sub>	r <sub>390</sub>	r <sub>391</sub>	r <sub>392</sub>	r <sub>393</sub>	r <sub>394</sub>	r <sub>395</sub>	r <sub>396</sub>	r <sub>397</sub>	r <sub>398</sub>	r <sub>399</sub>	r <sub>400</sub>	r <sub>401</sub>	r <sub>402</sub>	r <sub>403</sub>	r <sub>404</sub>	r <sub>405</sub>	r <sub>406</sub>	r <sub>407</sub>	r <sub>408</sub>	r <sub>409</sub>	r <sub>410</sub>	r <sub>411</sub>	r <sub>412</sub>	r <sub>413</sub>	r <sub>414</sub>	r <sub>415</sub>	r <sub>416</sub>	r <sub>417</sub>	r <sub>418</sub>	r <sub>419</sub>	r <sub>420</sub>	r <sub>421</sub>	r <sub>422</sub>	r <sub>423</sub>	r <sub>424</sub>	r <sub>425</sub>	r <sub>426</sub>	r <sub>427</sub>	r <sub>428</sub>	r <sub>429</sub>	r <sub>430</sub>	r <sub>431</sub>	r <sub>432</sub>	r <sub>433</sub>	r <sub>434</sub>	r <sub>435</sub>	r <sub>436</sub>	r <sub>437</sub>	r <sub>438</sub>	r <sub>439</sub>	r <sub>440</sub>	r <sub>441</sub>	r <sub>442</sub>	r <sub>443</sub>	r <sub>444</sub>	r <sub>445</sub>	r <sub>446</sub>	r <sub>447</sub>	r <sub>448</sub>	r <sub>449</sub>	r <sub>450</sub>	r <sub>451</sub>	r <sub>452</sub>	r <sub>453</sub>	r <sub>454</sub>	r <sub>455</sub>	r <sub>456</sub>	r <sub>457</sub>	r <sub>458</sub>	r <sub>459</sub>	r <sub>460</sub>	r <sub>461</sub>	r <sub>462</sub>	r <sub>463</sub>	r <sub>464</sub>	r <sub>465</sub>	r <sub>466</sub>	r <sub>467</sub>	r <sub>468</sub>	r <sub>469</sub>	r <sub>470</sub>	r <sub>471</sub>	r <sub>472</sub>	r <sub>473</sub>	r <sub>474</sub>	r <sub>475</sub>	r <sub>476</sub>	r <sub>477</sub>	r <sub>478</sub>	r <sub>479</sub>	r <sub>480</sub>	r <sub>481</sub>	r <sub>482</sub>	r <sub>483</sub>	r <sub>484</sub>	r <sub>485</sub>	r <sub>486</sub>	r <sub>487</sub>	r <sub>488</sub>	r <sub>489</sub>	r <sub>490</sub>	r <sub>491</sub>	r <sub>492</sub>	r <sub>493</sub>	r <sub>494</sub>	r <sub>495</sub>	r <sub>496</sub>	r <sub>497</sub>	r <sub>498</sub>	r <sub>499</sub>	r <sub>500</sub>	r <sub>501</sub>	r <sub>502</sub>	r <sub>503</sub>	r <sub>504</sub>	r <sub>505</sub>	r <sub>506</sub>	r <sub>507</sub>	r <sub>508</sub>	r <sub>509</sub>	r <sub>510</sub>	r <sub>511</sub>	r <sub>512</sub>	r <sub>513</sub>	r <sub>514</sub>	r <sub>515</sub>	r <sub>516</sub>	r <sub>517</sub>	r <sub>518</sub>	r <sub>519</sub>	r <sub>520</sub>	r <sub>521</sub>	r <sub>522</sub>	r <sub>523</sub>	r <sub>524</sub>	r <sub>525</sub>	r <sub>526</sub>	r <sub>527</sub>	r <sub>528</sub>	r <sub>529</sub>	r <sub>530</sub>	r <sub>531</sub>	r <sub>532</sub>	r <sub>533</sub>	r <sub>534</sub>	r <sub>535</sub>	r <sub>536</sub>	r <sub>537</sub>	r <sub>538</sub>	r <sub>539</sub>	r <sub>540</sub>	r <sub>541</sub>	r <sub>542</sub>	r <sub>543</sub>	r <sub>544</sub>	r <sub>545</sub>	r <sub>546</sub>	r <sub>547</sub>	r <sub>548</sub>	r <sub>549</sub>	r <sub>550</sub>	r <sub>551</sub>	r <sub>552</sub>	r <sub>553</sub>	r <sub>554</sub>	r <sub>555</sub>	r <sub>556</sub>	r <sub>557</sub>	r <sub>558</sub>	r <sub>559</sub>	r <sub>560</sub>	r <sub>561</sub>	r <sub>562</sub>	r <sub>563</sub>	r <sub>564</sub>	r <sub>565</sub>	r <sub>566</sub>	r <sub>567</sub>	r <sub>568</sub>	r <sub>569</sub>	r <sub>570</sub>	r <sub>571</sub>	r <sub>572</sub>	r <sub>573</sub>	r <sub>574</sub>	r <sub>575</sub>	r <sub>576</sub>	r <sub>577</sub>	r <sub>578</sub>	r <sub>579</sub>	r <sub>580</sub>	r <sub>581</sub>	r <sub>582</sub>	r <sub>583</sub>	r <sub>584</sub>	r <sub>585</sub>	r <sub>586</sub>	r <sub>587</sub>	r <sub>588</sub>	r <sub>589</sub>	r <sub>590</sub>	r <sub>591</sub>	r <sub>592</sub>	r <sub>593</sub>	r <sub>594</sub>	r <sub>595</sub>	r <sub>596</sub>	r <sub>597</sub>	r <sub>598</sub>	r <sub>599</sub>	r <sub>600</sub>	r <sub>601</sub>	r <sub>602</sub>	r <sub>603</sub>	r <sub>604</sub>	r <sub>605</sub>	r <sub>606</sub>	r <sub>607</sub>	r <sub>608</sub>	r <sub>609</sub>	r <sub>610</sub>	r <sub>611</sub>	r <sub>612</sub>	r <sub>613</sub>	r <sub>614</sub>	r <sub>615</sub>	r <sub>616</sub>	r <sub>617</sub>	r <sub>618</sub>	r <sub>619</sub>	r <sub>620</sub>	r <sub>621</sub>	r <sub>622</sub>	r <sub>623</sub>	r <sub>624</sub>	r <sub>625</sub>	r <sub>626</sub>	r <sub>627</sub>	r <sub>628</sub>	r <sub>629</sub>	r <sub>630</sub>	r <sub>631</sub>	r <sub>632</sub>	r <sub>633</sub>	r <sub>634</sub>	r <sub>635</sub>	r <sub>636</sub>	r <sub>637</sub>	r <sub>638</sub>	r <sub>639</sub>	r <sub>640</sub>	r <sub>641</sub>	r <sub>642</sub>	r <sub>643</sub>	r <sub>644</sub>	r <sub>645</sub>	r <sub>646</sub>	r <sub>647</sub>	r <sub>648</sub>	r <sub>649</sub>	r <sub>650</sub>	r <sub>651</sub>	r <sub>652</sub>	r <sub>653</sub>	r <sub>654</sub>	r <sub>655</sub>	r <sub>656</sub>	r <sub>657</sub>	r <sub>658</sub>	r <sub>659</sub>	r <sub>660</sub>	r <sub>661</sub>	r <sub>662</sub>	r <sub>663</sub>	r <sub>664</sub>	r <sub>665</sub>	r <sub>666</sub>	r <sub>667</sub>	r <sub>668</sub>	r <sub>669</sub>	r <sub>670</sub>	r <sub>671</sub>	r <sub>672</sub>	r <sub>673</sub>	r <sub>674</sub>	r <sub>675</sub>	r <sub>676</sub>	r <sub>677</sub>	r <sub>678</sub>	r <sub>679</sub>	r <sub>680</sub>	r <sub>681</sub>	r <sub>682</sub>	r <sub>683</sub>	r <sub>684</sub>	r <sub>685</sub>	r <sub>686</sub>	r <sub>687</sub>	r <sub>688</sub>	r <sub>689</sub>	r <sub>690</sub>	r <sub>691</sub>	r <sub>692</sub>	r <sub>693</sub>	r <sub>694</sub>	r <sub>695</sub>	r <sub>696</sub>	r <sub>697</sub>	r <sub>698</sub>	r <sub>699</sub>	r <sub>700</sub>	r <sub>701</sub>	r <sub>702</sub>	r <sub>703</sub>	r <sub>704</sub>	r <sub>705</sub>	r <sub>706</sub>	r <sub>707</sub>	r <sub>708</sub>	r <sub>709</sub>	r <sub>710</sub>	r <sub>711</sub>	r <sub>712</sub>	r <sub>713</sub>	r <sub>714</sub>	r <sub>715</sub>	r <sub>716</sub>	r <sub>717</sub>	r <sub>718</sub>	r <sub>719</sub>	r <sub>720</sub>	r <sub>721</sub>	r <sub>722</sub>	r <sub>723</sub>	r <sub>724</sub>	r <sub>725</sub>	r <sub>726</sub>	r <sub>727</sub>	r <sub>728</sub>	r <sub>729</sub>	r <sub>730</sub>	r <sub>731</sub>	r <sub>732</sub>	r <sub>733</sub>	r <sub>734</sub>	r <sub>735</sub>	r <sub>736</sub>	r <sub>737</sub>	r <sub>738</sub>	r <sub>739</sub>	r <sub>740</sub>	r <sub>741</sub>	r <sub>742</sub>	r <sub>743</sub>	r <sub>744</sub>	r <sub>745</sub>	r <sub>746</sub>	r <sub>747</sub>	r <sub>748</sub>	r <sub>749</sub>	r <sub>750</sub>	r <sub>751</sub>	r <sub>752</sub>	r <sub>753</sub>	r <sub>754</sub>	r <sub>755</sub>	r <sub>756</sub>	r <sub>757</sub>	r <sub>758</sub>	r <sub>759</sub>	r <sub>760</sub>	r <sub>761</sub>	r <sub>762</sub>	r <sub>763</sub>	r <sub>764</sub>	r <sub>765</sub>	r <sub>766</sub>	r <sub>767</sub>	r <sub>768</sub>	r <sub>769</sub>	r <sub>770</sub>	r <sub>771</sub>	r <sub>772</sub>	r <sub>773</sub>	r <sub>774</sub>	r <sub>775</sub>	r <sub>776</sub>	r <sub>777</sub>	r <sub>778</sub>	r <sub>779</sub>	r <sub>780</sub>	r <sub>781</sub>	r <sub>782</sub>	r <sub>783</sub>	r <sub>784</sub>	r <sub>785</sub>	r <sub>786</sub>	r <sub>787</sub>	r <sub>788</sub>	r <sub>789</sub>	r <sub>790</sub>	r <sub>791</sub>	r <sub>792</sub>	r <sub>793</sub>	r <sub>794</sub>	r <sub>795</sub>	r <sub>796</sub>	r <sub>797</sub>	r <sub>798</sub>	r <sub>799</sub>	r <sub>800</sub>	r <sub>801</sub>	r <sub>802</sub>	r <sub>803</sub>	r <sub>804</sub>	r <sub>805</sub>	r <sub>806</sub>	r <sub>807</sub>	r <sub>808</sub>	r <sub>809</sub>	r <sub>810</sub>	r <sub>811</sub>	r <sub>812</sub>	r <sub>813</sub>	r <sub>814</sub>	r <sub>815</sub>	r <sub>816</sub>	r <sub>817</sub>	r <sub>818</sub>	r <sub>819</sub>	r <sub>820</sub>	r <sub>821</sub>	r <sub>822</sub>	r <sub>823</sub>	r <sub>824</sub>	r <sub>825</sub>	r <sub>826</sub>	r <sub>827</sub>	r <sub>828</sub>	r <sub>829</sub>	r <sub>830</sub>	r <sub>831</sub>	r <sub>832</sub>	r <sub>833</sub>	r <sub>834</sub>	r <sub>835</sub>	r <sub>836</sub>	r <sub>837</sub>	r <sub>838</sub>	r <sub>839</sub>	r <sub>840</sub>	r <sub>841</sub>	r <sub>842</sub>	r <sub>843</sub>	r <sub>844</sub>	r <sub>845</sub>	r <sub>846</sub>	r <sub>847</sub>	r <sub>848</sub>	r <sub>849</sub>	r <sub>850</sub>	r <sub>851</sub>	r <sub>852</sub>	r <sub>853</sub>	r <sub>854</sub>	r <sub>855</sub>	r <sub>856</sub>	r <sub>857</sub>	r <sub>858</sub>	r <sub>859</sub>	r <sub>860</sub>	r <sub>861</sub>	r <sub>862</sub>	r <sub>863</sub>	r <sub>864</sub>	r <sub>865</sub>	r<
-------	---	---	---	---	----------------	----------------	----------------	---	---	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	----

Por otro lado, los asentamientos calculados en este último análisis, están registrados en la siguiente tabla:

TABLA 4.3.9.

PUNTO	Z	H	P <sub>o</sub>	e <sub>o</sub>	AP	P	e	Ae	AH
A	2.5	5.0	0.3430	4.1	0.080	0.428	3.4	0.7	0.68
	7.5	5.0	0.5310	8.6	0.199	0.730	6.6	2.0	1.04
	12.5	5.0	0.7180	6.9	0.261	0.979	5.8	1.1	0.69
	17.5	5.0	0.9060	5.2	0.297	1.203	4.5	0.7	0.56
									<u>2.97</u>
B	2.5	5.0	0.3430	4.1	0.358	0.701	3.1	1.0	0.98
	7.5	5.0	0.5310	8.6	0.299	0.830	6.4	2.2	1.14
	12.5	5.0	0.7180	6.9	0.268	0.986	5.8	1.1	0.69
	17.5	5.0	0.9060	5.2	0.251	1.157	3.9	1.3	1.04
									<u>3.85</u>
C	2.5	5.0	0.3430	4.1	0.798	1.141	2.9	1.2	1.17
	7.5	5.0	0.5310	8.6	0.798	1.329	5.2	3.4	1.77
	12.5	5.0	0.7180	6.9	0.798	1.516	3.9	3.0	1.89
	17.5	5.0	0.9060	5.2	0.798	1.704	3.7	1.5	1.20
									<u>6.03</u>

Como puede observarse en la tabla anterior, la magnitud de los asentamientos en los puntos indicados son congruentes con los asentamientos presentados, bajo los mismos puntos, para el área de carga de las celdas particulares; aclarando que los puntos de estudio A, B y C de ésta, corresponden con los puntos C, B y A, respectivamente, del área cargada con el conjunto de celdas.

Para ambos análisis se desarrolla el procedimiento descrito en la sección 4.3. Ahora, Los esfuerzos inducidos por el "terraplén" formado por los desechos se determinan en tres puntos bajo la estructura del mismo: el punto A, que corresponde al pie de talud del terraplén; el punto B, situado bajo el extremo superior del talud; y el punto C, colocado bajo la parte central de esta estructura (ver figura 4.3.10-d). Las condiciones iniciales de esfuerzo y las cargas consideradas son las mismas para este análisis; así como la profundidad --

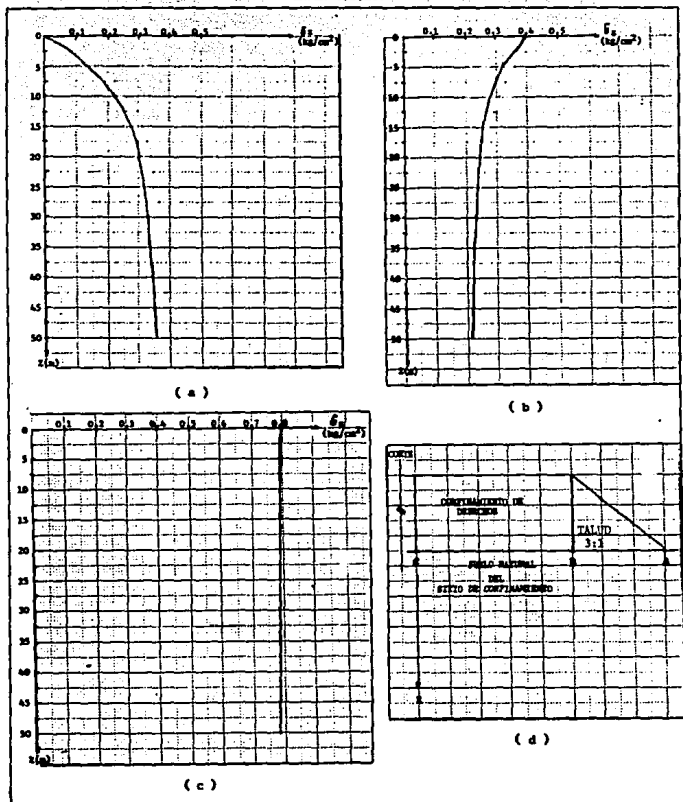
del estrato estudiado ( 20 ). Sin embargo, para el cálculo de la distribución de esfuerzos, se extendió la determinación de esfuerzos hasta una profundidad de 50 m; esto con el fin de observar la influencia de las cargas que, a esta profundidad, es muy significativa ( ver figura 4.3.10 ); tanto así que para una profundidad de 528 m ( dos veces  $R$ , en la cual teóricamente los esfuerzos se reducen a un 10 % ) los esfuerzos toman un valor entre 20 y el 40 %.

Para el cálculo de asentamientos de este ejemplo, la aplicación del método desarrollado fue restringido por la falta de datos de compresibilidad del suelo en los estratos más profundos; sin embargo, puede considerarse que los asentamientos, en términos reales, podrían llegar a tener una magnitud semejante a la calculada para los primeros 20 m de profundidad del suelo; es decir, los asentamientos que se esperan, dadas las condiciones del suelo, son del orden de 12 a 20 m para los primeros 50 m de profundidad. Lo anterior sin considerar los asentamientos del suelo debidos a la explotación de los mantos acuíferos con fines de abastecimiento.

Estos resultados hacen ver la importancia que tiene el controlar la distribución de las cargas sobre el terreno de confinamiento, de tal forma que éste, mediante la preconsolidación, pueda absorber en forma satisfactoria ( y esto aún sujeto a estudio ) los esfuerzos generados por las cargas presentes, consideradas en el diseño. Lo anterior se puede lograr con la adecuada programación de las áreas de operación de frentes de trabajo situados estratégicamente en el relleno, para controlar la sobrecarga del terreno en tiempos muy cortos.



TABLA 4.3.10.



Gráficas de distribución de esfuerzos en los puntos A, B y C bajo la estructura indicada en la parte d de esta figura.

#### 4.4. DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE CAPTACION DE LIXIVIADOS Y BIOGAS.

De acuerdo con la generación de lixiviados y del biogas producido en el interior de las celdas de confinamiento, se diseñarán los elementos del sistema de captación, retención o desalojo de dichos parámetros; para esto, se aplicarán los modelos descritos en el capítulo anterior. Estos cálculos también pueden ser útiles para el diseño de algún sistema de tratamiento o, para el caso del biogas, algún sistema generador de energía.

**ESTIMACION DE LIXIVIADO.** El lixiviado potencial que puede generarse será calculado por el método del balance de agua; mediante la aplicación de las ecuaciones que determinan los parámetros involucrados en dicho balance, y los datos correspondientes, en su momento citados. Dichos parámetros se obtienen a continuación:

**Evapotranspiración.** Aplicando las ecuaciones (9) y (10) y sustituyendo los valores de las temperaturas medias tabuladas, junto con los resultados dados por dichas ecuaciones, presentamos la siguiente tabla:

TABLA 4.4.1.

MES	TEMPERATURA °C 6	INDICE I	EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL (mm)	FACTOR DE CORRECCION	EVAPOTRANSPIRACION AJUSTADA (mm).
ENERO	12.36	3.936	3.962	0.954	3.453
FEBRERO	13.36	4.428	4.489	0.902	4.058
MARZO	15.99	5.813	5.989	1.030	6.168
ABRIL	17.63	6.738	7.005	1.048	7.341
MAYO	18.85	7.457	7.799	1.118	8.719
JUNIO	18.19	7.065	7.366	1.104	8.132
JULIO	17.40	6.606	6.859	1.136	7.791
AGOSTO	17.37	6.589	6.840	1.104	7.551
SEPTIEMBRE	17.11	6.440	6.677	1.020	6.816
OCTUBRE	15.95	5.791	5.965	1.002	5.978
NOVIEMBRE	14.36	4.939	5.040	0.934	4.708
DICIEMBRE	13.38	4.438	4.500	0.946	4.257
VALOR ACUMULADO	-	-	72.48	-	74.964

Escurrimiento superficial e infiltración. Para calcular el escurrimiento superficial aplicamos la ecuación (11), considerando el coeficiente de escurrimiento de 0.13 y 0.17 para los meses de estiaje y de lluvias, respectivamente (ver tabla 4.4.2). Para el cálculo de infiltraciones se aplican los resultados de (10) y (11) en la relación (12). Para el cálculo de estos parámetros también se utilizan los datos de la precipitación media de la región; cuyos valores se tabulan, junto con los resultados obtenidos, en la tabla 4.4.3.

TABLA 4.4.2.

CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES DEL TERRENO	K <sub>e</sub> TEMPORADA DEL AÑO		TIPO DE CLIMA	K <sub>e</sub>	VEGETACION	K <sub>e</sub>
	SEQUÍA	LLUVIA				
SUELO ARENOSO PLANO (S = 2X)	0.05	0.10	SEMEDO	> 0.15	CULTIVADOS	0.01-0.3
SUELO ARENOSO MEDIO (2X < S < 7X)	0.10	0.15	SEMI-SEMEDO	0.13-0.25	NO CULTIVADOS	0.25-0.50
SUELO ARENOSO INCLINADO (S = 7X)	0.15	0.20	SEMI-ARIDO	0.05-0.15	AREA BOSCOSEA	0.05-0.20
SUELO ARCILLOSO PLANO (S = 2X)	0.13	0.17	ARIDO-EXTREMO (DESERTICO)	0.00-0.05		
SUELO ARCILLOSO MEDIO (2X < S < 7X)	0.18	0.22				
SUELO ARCILLOSO INCLINADO (S = 7X)	0.23	0.35				

S = PENDIENTE DEL TERRENO.

TABLA 4.4.3.

MES.	PRECIPITACION MEDIA (mm)	COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO	ESCURRIMIENTO (mm)	INFILTRACION (mm)	
				SUPERF.	POZ.
ENERO	7.64	0.13	0.993	6.647	3.194
FEBRERO	8.12	0.13	1.055	7.065	3.007
MARZO	11.46	0.13	1.489	9.971	3.803
ABRIL	28.65	0.13	3.724	24.926	17.585
MAYO	39.34	0.13	5.114	34.226	25.507
JUNIO	96.60	0.17	16.768	81.832	73.700
JULIO	112.75	0.17	19.167	93.583	85.792
AGOSTO	86.43	0.17	14.693	71.737	64.186
SEPTIEMBRE	78.34	0.17	13.317	65.023	58.207
OCTUBRE	35.62	0.13	4.630	30.990	25.012
NOVIEMBRE	9.44	0.13	1.227	8.213	3.505
DICIEMBRE	5.25	0.13	0.682	4.568	0.311
VALOR ACUMULADO	521.64	-	82.859	438.781	363.809

<sup>7</sup> ibidem.

Capacidad de campo. La capacidad de campo se determinó con los datos experimentales obtenidos por cálculo, conforme al procedimiento descrito en el capítulo anterior y sustituyendo en la relación (16) los siguientes datos:

- Humedad de los desechos sólidos : 45 %
- Densidad de los desechos sólidos municipales : 700 kg/m<sup>3</sup>.
- Volumen para saturar el lisímetro : 38.25 lts.
- Volumen de agua extraída del lisímetro : 17.35 lts.
- Volumen ocupado por los desechos sólidos : 72.5 lts.
- Densidad del agua : 1000 kg/m<sup>3</sup>.

los cuales generan el siguiente resultado:

$$C_c = \frac{0.45 (700 \text{ kg/m}^3)(0.0725 \text{ m}^3) + (0.0382 \text{ m}^3 - 0.017 \text{ m}^3)(1000 \text{ kg/m}^3)}{(0.0725 \text{ m}^3)(700 \text{ kg/m}^3)(0.55)}$$

$$C_c = 1.58 \text{ kg de agua por kg de basura seca.}$$

Este resultado significa que 1 kg de basura seca podrá retener 1.56 kg de agua antes de lixiviarla.

Humedad metabólica. Considerando los datos de la tabla 3.1.9 (composición química de los desechos sólidos municipales en el D.F.), se aplican las ecuaciones (13) y (14), iniciando con el siguiente ajuste al 100% de la composición del CHON:

- Porcentaje de carbono : 43/12 = 3.58
- Porcentaje de hidrógeno : 6/1 = 6.0
- Porcentaje de oxígeno : 49/16 = 3.06
- Porcentaje de nitrógeno : 2/14 = 0.14

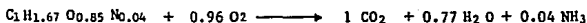
Ajustando los valores para obtener la relación C<sub>1</sub>H<sub>x</sub>O<sub>y</sub>N<sub>z</sub>, tenemos:

$$C : \frac{3.58}{3.58} = 1 \quad H : \frac{6}{3.58} = 1.67 \quad O : \frac{3.06}{3.58} = 0.85 \quad N : \frac{0.14}{3.58} = 0.04$$

Entonces, con estos resultados la relación (\*) se expresa como:



sustituyendo estos índices en la relación (13), ésta resulta:



de aquí tenemos que:

$$C_{H1.67}O_{0.85}N_{0.04} = 1X12 + 1.67X1 + 0.85X16 + 0.04X14 = 27.83$$

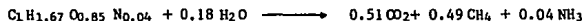
$$y \quad 0.77 H_2O = 0.77 (2X1 + 16) = 13.86$$

La cantidad de agua producida en la fase aeróbica, de acuerdo con la relación (15), es:

$$\frac{13.86}{27.83} = 0.49$$

lo que significa que de cada gramo de desechos orgánicos estabilizados se produce 0.49 gr de agua.

Por otro lado, el agua que se consume en el proceso anaeróbico, según la relación estequiométrica (14), resulta de lo siguiente:



$$de \text{ aquí: } 0.18 H_2O = 0.18 (1X2 + 16) = 3.24$$

y de (15):

$$\frac{3.24}{27.83} = 0.12$$

lo que indica que se consumen 0.12 gr de agua por cada gramo de desechos orgánicos estabilizados.

La cantidad de desechos orgánicos en base seca que contiene un kilogramo de desechos se puede estimar con la relación (24), considerando los siguientes datos:

Fracción orgánica de los desechos:	65 %
Densidad de los desechos :	700 kg/m <sup>3</sup>
Porcentaje de humedad de los desechos :	45 %
Porcentaje de cenizas de la materia orgánica :	14 %

Entonces, sustituyendo estos datos en ( 24 ), tenemos el siguiente resultado:

$$M_o = (0.76) [ 0.65(700 \text{ kg/m}^3)(1 \text{ m}^3) - (700 \text{ kg/m}^3)(0.45)(0.8) ]$$

$$= 154.28 = 155 \text{ kg por m}^3 \text{ de desechos.}$$

#### APLICACION DEL METODO DE BALANCE DE AGUA.

Como material de cubierta se propone una capa de limo arenoso de 15 cm de espesor. Considerando que el agua disponible para este tipo de material es de 150 mm., el almacenamiento de la misma será de:

$$(150 \text{ mm/m}) (0.15 \text{ m}) = 22.5 \text{ mm}$$

La cantidad de agua que pasa a través del material de cubierta se observa en la siguiente tabla:

TABLA 4.4.4.

PARAMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
EVAPOTRANSPIRACION AJUSTADA	3.453	4.058	6.168	7.341	8.719	8.132	7.791	7.551	6.816	5.978	4.708	4.257
INFILTRACION SUPERFICIAL	6.647	7.065	9.971	24.926	34.226	81.832	93.583	71.737	65.023	30.990	8.213	4.568
ALMACENAMIENTO	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5
CAMBIO DE ALMACENAMIENTO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DEFICIT DE AGUA	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
EVAPOTRANSPIRACION REAL	3.453	4.058	6.168	7.341	8.719	8.132	7.791	7.551	6.816	5.978	4.708	4.257
PERCOLACION	3.194	3.007	3.803	17.585	25.507	73.70	85.79	64.186	58.207	35.012	3.505	0.311

Aplicación del método de balance de agua. Cantidad de agua que logra infiltrarse a través de la capa de cubierta final ( todos los valores están en mm/m<sup>2</sup> ).

Con la cantidad de agua que logra infiltrarse, según la tabla 4.4.4, se puede establecer el balance de agua dentro de la celda de confinamiento. Para esto se considera un porcentaje de humedad de los desechos del 45% y una densidad de los mismos de 700 kg/m<sup>3</sup>. Así tenemos que 1 m<sup>3</sup> de desechos contiene:

$$(0.45)(700) = 0.315 \text{ m}^3 \text{ de agua.}$$

Tomando en cuenta un volumen unitario (1 m<sup>3</sup>), tenemos que en un metro cúbico se tienen 315 mm de agua. Así, para una columna de 1 m<sup>2</sup>, de 2.5 m de altura se tienen:

$$(2.5 \text{ m})(315 \text{ mm/m}^3) = 787.5 \text{ mm/m}^2$$

La capacidad de campo de los desechos, según el resultado de (16), fue de 1.56 kg de agua/kg de desechos en base seca; es decir, un kilogramo de desechos requiere de 1.56 kg de agua para agotar su capacidad de retención de agua. Entonces, considerando una fracción de materia orgánica en los desechos del 55%, 395 kg de desechos requerirán de 600.6 kg de agua; lo que equivale, para la misma altura propuesta y la misma área unitaria, a:

$$(2.5 \text{ m})(600.6 \text{ kg}) / (1 \text{ kg/lt}) = 1501.5 \text{ mm/m}^2$$

La humedad que se pierde en el proceso de estabilización de los desechos, de acuerdo con los resultados del cálculo de la humedad metabólica, resultó de 0.12 g. de agua; entonces, 155 kg (cantidad de materia orgánica en base seca) requiere, considerando la misma columna de 2.5 m de altura y área unitaria, de:

$$(155)(0.12)(2.5) = 46.5 \text{ mm de agua/m}^2$$

De acuerdo con lo anterior, podemos realizar el balance de agua dentro de la celda de confinamiento propuesta. En la tabla 4.4.5 se encuentran los resultados de este balance.

En las tablas 4.4.5 puede verse que la infiltración acumulada al año es de 363.809 mm. En el primer año, ésta es tomada totalmente por la capacidad de campo de los desechos y no es sino hasta el tercer año (cuando se sobrepasa la capacidad de campo) en que se presenta la generación de lixiviados, que alcanza un valor de 329.8 mm. A partir del cuarto año, la producción de lixiviados alcanzará en forma continua los 363.8 mm. Tomando en cuenta el mes en que se presenta la máxima generación (que registra un valor de 87.79 mm) y el área ocupada por la celda propuesta (60X88m), resulta que el volumen de lixiviado potencial a producirse es de:

$$(0.08579 \text{ m})(5280 \text{ m}^2) = 452.97 \text{ m}^3$$

El gasto en este mes, considerando un flujo constante no interrumpido, es de:

$$\frac{453 \text{ m}^3}{(31)(24)(3600)} = 1.7 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} = 0.17 \text{ lt/s}$$

Considerando una velocidad constante de 0.1 m/s (en base a las pendientes del proyecto y a la velocidad teórica de percolación) y aplicando el resultado anterior, se calcula las dimensiones de los ductos para la canalización de los lixiviados de la forma que sigue:

$$Q = VA \longrightarrow A = Q/V \longrightarrow \pi D^2/4 = Q/V^*$$

$$D = \sqrt{4Q/\pi V}$$

$$D = \sqrt{4 \times 1.7 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} / 3.1416 \times 0.1 \text{ m/s}}$$

$$D = 0.046 \text{ m} = 5.0 \text{ cm}$$

Tomando en cuenta la gran posibilidad de que los lixiviados arrastren partículas gruesas, de hecho la consistencia de éstos es espesa, se proponen ductos de PVC de 4" y 6" de diámetro para el sistema de captación propuesto (ver figura 4.4.6), colocados en la forma indicada en la figura 4.4.6 y 4.4.7.

\* Q, V, A y D corresponden, respectivamente, a los parámetros de gasto, velocidad, área y diámetro.



TABLA 4.4.5.

PARAMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
INFILTRACION	3.194	3.007	3.803	17.58	25.50	73.70	85.79	64.18	58.20	25.01	3.50	0.311
C. DE CAMPO	757.31	754.30	750.50	732.42	707.42	633.72	547.93	483.75	425.50	400.54	397.04	396.73
HUMEDAD DE LOS DESECHOS	787.5	787.5	787.5	787.5	787.5	787.5	787.5	787.5	787.5	787.5	787.5	787.5
HUMEDAD DE ESTABILIZACION.	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5
PRODUCCION DE LIXIVIADO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

PARAMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
INFILTRACION	3.194	3.007	3.803	17.58	25.50	73.70	85.79	64.18	58.20	25.01	3.50	0.311
C. DE CAMPO	393.54	390.53	386.53	369.15	343.60	269.95	184.16	119.98	61.78	36.77	33.27	32.96
HUMEDAD DE LOS DESECHOS	787.5	787.5	787.5	787.5	787.5	787.5	787.5	787.5	787.5	787.5	787.5	787.5
HUMEDAD DE ESTABILIZACION.	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5
PRODUCCION DE LIXIVIADO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

PARAMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
INFILTRACION	3.194	3.007	3.803	17.58	25.50	73.70	85.79	64.18	58.20	25.01	3.50	0.311
C. DE CAMPO	29.77	26.77	22.97	3.39	-	-	-	-	-	-	-	-
HUMEDAD DE LOS DESECHOS	787.5	787.5	787.5	787.5	787.5	787.5	787.5	787.5	787.5	787.5	787.5	787.5
HUMEDAD DE ESTABILIZACION.	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5
PRODUCCION DE LIXIVIADO	0.0	0.0	0.0	0.0	20.10	73.70	85.79	64.18	58.20	25.01	3.50	0.311

Producción de lixiviado determinado por el método del balance de agua.

FIGURA 4.4.6.

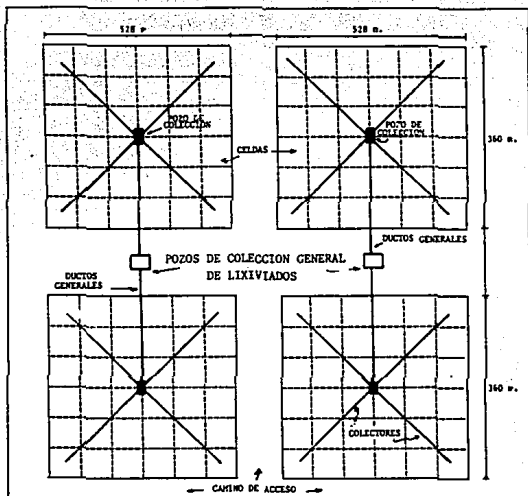
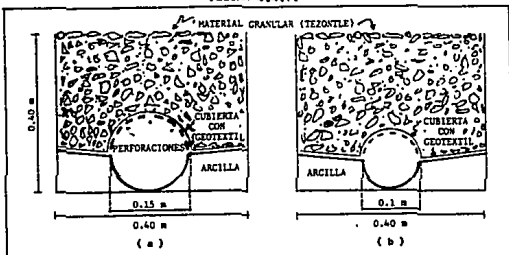
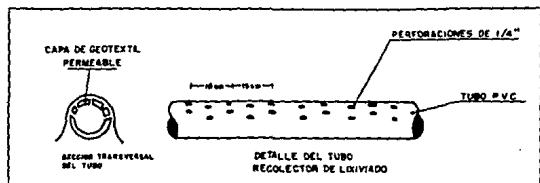


FIGURA 4.4.7.



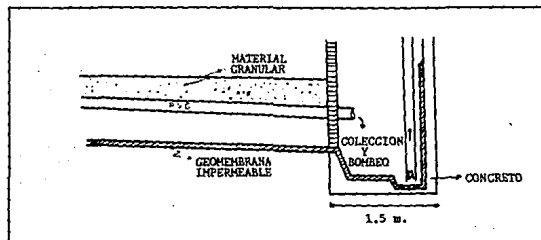
En las siguientes figuras se muestra un detalle de los ductos propuestos y del pozo general para la colección de lixiviados.

FIGURA 4.4.8.



Detalles del tubo captador de lixiviados (para ambos diámetros propuestos)

FIGURA 4.4.9.



Detalles de los cárcamos de bombeo o pozos de colección general de lixiviados.

## ESTIMACION DE LA PRODUCCION DE BIOGAS.

Retomando los resultados de las relaciones estequiométricas (13) y (14) calculamos la producción de los principales gases generados en la descomposición de los desechos orgánicos. Así, en la fase anaeróbica [relación (14)], para el metano tenemos:

$$0.48 \text{ CH}_4 = 0.48 (12 + 4 \times 1) = 7.68$$

aplicando la relación (18), resulta:

$$\frac{7.68}{27.83} = 0.27$$

sustituyendo este resultado en la ecuación (21) así como el de (24); y considerando la densidad del metano igual a  $716.8 \text{ kg/m}^3$ , se tiene:

$$\frac{0.27 (155 \text{ kg})}{716.8 \text{ kg/m}^3} = 0.058 \text{ m}^3 \text{ por kilogramo de desecho orgánico.}$$

La cantidad de desechos a disponer en las celdas de confinamiento del relleno sanitario, de acuerdo con un porcentaje de recolección del 80 %, es de:

$$(13,112.7 \text{ ton/día})(0.80) = 10,490.16 \text{ ton/día.}$$

La cantidad de materia orgánica de estos desechos, de acuerdo con lo que reporta oficialmente el Departamento del Distrito Federal, es del 55 % de la generación recolectada. Entonces, con esto se tiene:

$$(10,490.58 \text{ ton/día})(0.55) = 5,769.58 = 5,770 \text{ ton/día.}$$

Entonces, la cantidad de metano que se produce es:

$$(0.058 \text{ m}^3/\text{ton})(5770 \text{ ton}) = 334.56 \text{ m}^3$$

Para el bióxido de carbono, de la relación (13) se tiene:

$$\text{CO}_2 = 1(12 + 16 \times 2) = 44$$

sustituyendo lo anterior en (19) obtenemos:

$$\frac{44}{27.83} = 1.58$$

Además, en la fase anaeróbica, se tiene:

$$\text{CO}_2 = 0.51(12 + 16 \times 2) = 22.44$$

de la misma forma, con (18) resulta:

$$\frac{22.44}{27.83} = 0.80$$

Considerando el valor máximo de producción de las dos fases, tenemos que la cantidad de  $\text{CO}_2$  como resultado de la ecuación (22) es, tomando en cuenta una densidad para el bióxido de carbono de  $1976.5 \text{ kg/m}^3$ , de:

$$\frac{0.80 (155.0 \text{ kg})}{1,976.5 \text{ kg/m}^3} = 0.063 \text{ m}^3 \text{ por kg de desechos}$$

Así, la cantidad de bióxido de carbono resulta ser:

$$(0.063 \text{ ton/m}^3)(5.77 \text{ ton}) = 363.51 \text{ m}^3$$

Análogamente para el amoníaco, de la ecuación (14) se obtiene:

$$\frac{0.68}{27.83} = 0.024$$

Considerando una densidad para el amoníaco con un valor de  $770.8 \text{ kg/m}^3$ , - podemos calcular la producción de éste, la cual resulta ser:

$$\frac{0.024 (155.0 \text{ kg})}{770.8 \text{ kg/m}^3} = 0.0048 \text{ m}^3 \text{ por kg de desechos}$$

Estos son los tres tipos de gases con una producción más significativa; - es por esto que nada más se toman en cuenta estos valores de generación para - el cálculo de biogas; ya que los otros constituyentes representan sólo una tra - za (una cantidad muy pequeña) del biogas generado en el proceso de degrada - ción de los desechos, variando la producción de metano, bióxido de carbono y - amoníaco bajo ciertas circunstancias especiales, de las cuales ya se estable - cieron en la sección correspondiente. los detalles.

De este modo, tenemos que la cantidad de amoníaco producida es:

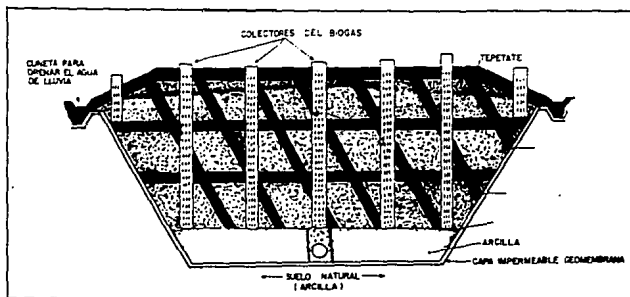
$$(0.0048 \text{ m}^3/\text{ton})(5770 \text{ ton}) = 27.84 \text{ m}^3$$

La cantidad total de biogas será entonces la suma de las cantidades de metano, bióxido de carbono y amoníaco, lo que da una cantidad de:

$$33.56 + 363.63 + 27.84 = 726.05 \text{ m}^3 \text{ de biogas}$$

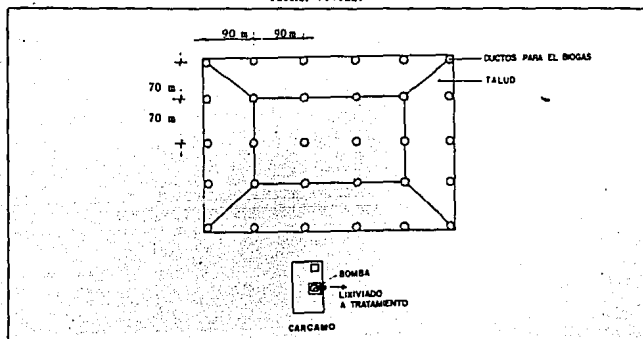
Para la ventilación de los gases que se generan en el proceso de descomposición de la fracción orgánica de los desechos, se proponen ductos de ventilación de 0.6 m de diámetro, colocados como se muestra en las figuras 4.4.10 y - 4.4.11. Lo anterior por la consideración de los resultados anteriores y de las normas ecológicas anteriormente citadas.

FIGURA 4.4.10



Vista general de los sistemas de captación de biogas, lixiviados y el sistema de retención de los mismos. Detalles exagerados y fuera de escala.

FIGURA 4.4.11.



Planta de uno de los módulos de confinamiento que muestra la disposición de los tubos de ventilación para biogas y el pozo o cárcamo de bombeo (colector general de lixiviados, ver fig. 4.4.6)

## CAPITULO V. CONSTRUCCION Y OPERACION.

La construcción y operación de un relleno sanitario son dos actividades - que se desarrollan simultáneamente cuando se conforman las celdas de confinamiento de los desechos. Debido a esto, existe un poco de confusión cuando se hace mención a los métodos de construcción o métodos de operación ( vistos en la sección 1.2 ) como actividad general en un relleno sanitario. Así a veces se piensa que la operación consiste en construir las celdas que se forman con desechos y el material de cubierta, pero es algo más. Dentro de la operación - entran aspectos como la elección, utilización y mantenimiento de equipo; control de los accesos al relleno sanitario para el registro de la cantidad de de sechos a disponer autorizados; monitoreo de lixiviados y biogas generados en - el interior de las celdas; el mantenimiento general de las instalaciones que - forman el relleno ( que podrían incluir plantas de tratamiento e infraestructu ra de recicló ); etc. Ahora, para que se pueda poner en marcha la operación -- del sitio de confinamiento de desechos deben realizarse obras previas y comple mentarias como lo son; la preparación o tratamiento del suelo soporte de las - celdas de confinamiento, los cortes y terraplenes ( considerando el método de operación ), instalación de los colectores de lixiviados y del biogas, colocación de las bermas de soporte y el establecimiento de los caminos de acceso, - etc; tales acciones corresponden a la construcción del relleno sanitario.

En este capítulo se manejarán algunos conceptos teóricos y algunas suge-- rencias encontradas en la bibliografía específica del tema y dadas también por la experiencia operativa obtenida de los rellenos existentes. Se incluye en el capítulo el procedimiento constructivo de los elementos diseñados en el capítu lo anterior.



### 5.1. CONSTRUCCION.

Como se mencionó anteriormente, en la etapa constructiva se incluyen todas las actividades encaminadas a establecer la infraestructura necesaria para que un relleno sanitario pueda operar adecuadamente y éste no represente altos riesgos de contaminación al ambiente, ni molestias a la población que lo delimita. En esta sección se desarrolla el procedimiento constructivo de los elementos principales de un relleno, los cuales fueron diseñados en el capítulo anterior.

#### PREPARACION DEL SITIO DE CONFINAMIENTO.

Cuando las características físicas del suelo son desfavorables, se necesita corregir o estabilizar los aspectos del suelo no deseables, tales como grietas, taludes muy inclinados, baja capacidad de carga, gran permeabilidad, etc. Dichos factores determinan las acciones previas a desarrollar la operación o construcción de las celdas de confinamiento de los desechos; lo que también dependerá de la topografía natural del sitio. Dentro de estas obras de preparación se incluyen: la construcción de caminos de acceso interno, cortes y/o terraplenes, instalación de los ductos que captarán y conducirán el lixiviado y el biogas hacia las instalaciones de tratamiento o de control; construcción de canales para el desalajo de aguas pluviales, impermeabilización de la base de las celdas, etc.

Para efectos de operación y economía, se prepararán áreas para el confinamiento de desechos que puedan acumularse durante un año como mínimo; en el que también se realizarán los programas de operación.

#### METODO CONSTRUCTIVO U OPERATIVO DE LAS CELDAS DE CONFINAMIENTO.

Los criterios para la elección del método constructivo fueron revisados en la sección 1.2, y como pudimos apreciar en el estudio de las características del sitio propuesto (ver sección 4.1), la Zona de Bordo Poniente es una planicie de suelo arcilloso, no apto para que en él se puedan realizar excavaciones, dada la cercanía del nivel de aguas freáticas con la superficie del suelo. Así, se propone el método de área para llevar a cabo la construcción de las celdas de confinamiento diario.

El procedimiento constructivo de estas celdas puede resumirse en los siguientes pasos:

- Distribución o esparcimiento de los desechos en capas para su compactación.

Inmediatamente después de que los desechos han sido descargados, éstos se esparcen en capas de entre 30 y 50 cm. de espesor mínimo y máximo respectivamente.

- Compactación.

Para alcanzar la mayor densidad posible de los desechos y optimizar el espacio en las celdas, se recomienda que el equipo especializado en la compactación de los desechos realice de 3 a 5 repeticiones, de acuerdo a la cantidad de trabajo desarrollado por el equipo utilizado para este fin ( ver tabla 5.2.1. ). El paso anterior y este último se repiten sucesivamente hasta alcanzar la altura de proyecto ( ver figura 4.2.3. ).

- Colocación y compactación del material de cubierta.

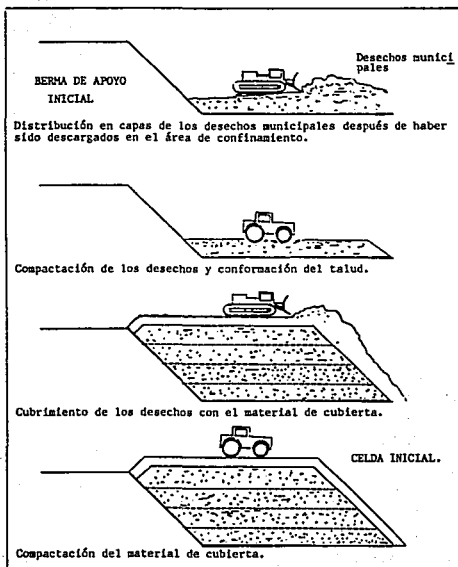
De acuerdo con las características de impermeabilidad que se requiere para las celdas de confinamiento, es conveniente que el material de cubierta final le corresponda un índice plástico mayor que 15 ( $I_p > 15$ ), ya que esto lo hace más resistente a los ataques de la erosión y más estable para disminuir el grado de infiltración. Aunado a esto, se recomienda que el material de cubierta sea compactado al 95% con el contenido de humedad óptima más el 22%, según la prueba Proctor de la S.A.R.H. con una energía de 7.5 kg-cm/cm<sup>2</sup>. El material propuesto se distribuye y compacta al espesor indicado en el diseño de la celda ( ver fig. 4.2.3 ).

En la figura 5.1.1. se muestra esquemáticamente los pasos anteriores para llevar a cabo la construcción de una celda diaria de confinamiento de desechos.

#### IMPERMEABILIZACION DE LAS CELDAS DE CONFINAMIENTO.

De acuerdo con las características permeables se puede sugerir el sistema impermeable más conveniente, que puede ser, desde una simple compactación o mejoramiento con arcillas del material subyacente a las celdas, hasta un revestimiento del mismo con geomembranas ( capas de polivinilo, PVC, caucho, material bi-

FIGURA 5.1.1.



Proceso constructivo de una celda de confinamiento llevado a cabo por el método de área.

tuminoso, etc. ).

En Bordo Poniente, a pesar de que el suelo que lo forma se pudiera considerar básicamente impermeable ( suelo constituido principalmente por arcillas con una permeabilidad del orden del  $1 \times 10^{-6}$  cm/s ), existe el peligro latente - de que se formen agrietamientos del subsuelo o existan fallas tectónicas del mismo por donde sea factible el flujo del lixiviado; y éstos lleguen a las corrientes de aguas subterráneas; y peor aún, a los depósitos de agua utilizados como fuente de abastecimiento de este vital líquido.

Existen muchos productos, técnicas o sistemas para impermeabilizar estructuras para el almacenamiento de agua, plantas de tratamiento, lagos artificiales y, para lo que representa nuestro interés, rellenos sanitarios.

Para el caso particular de la zona de Bordo Poniente, los problemas específicos a resolver incluyen, la gran consolidación y la extrema saturación de agua del suelo característico de esta zona. Así, se proponen algunos productos impermeabilizantes y el mejoramiento del terreno para estabilizar las cargas producidas al suelo y se tengan asentamientos homogéneos.

Para efectos de comparación se resume a continuación una descripción general, así como tablas de especificaciones técnicas y físicas de tres productos representativos: BENTOMAT ( sistema Bentonita-Geotextil ), XR-5 ( sistema Poliéster-Resina de PVC ) y GEOMEMBRANA H.D.P.E. ( Polietileno de alta densidad ).

BENTOMAT. Es un revestimiento laminado flexible compuesto de Bentonita sódica natural y Geotextil de alta resistencia; esta combinación de materiales se realiza con equipo de punzonado moderno, utilizando geotextiles de polipropileno ( no degradable ) y bentonitas de sodio de alta expansión y gran resistencia a contaminantes.

Este material es fabricado en rollos de 2.65 m. de ancho por 30.48 m. de longitud. No se requiere equipo especial para realizar las uniones, los traslapes pueden ir " engrapados " o simplemente traslapados, cuando el material es perforado, el material sella automáticamente al hidratarse.

#### CARACTERISTICAS GENERALES.

- Sella por sí solo si sufre perforaciones ( 2.54 cm. máximo ).
  - Flexible. No se agrieta durante la instalación.
  - Disposición de varias técnicas para la elaboración de juntas.
  - Fabricación en forma laminar ( rollos ).
  - Los geotextiles de polipropileno empleados son resistentes a contaminantes.
  - Se activa con agua o fluidos de lixiviación.
- Ver tabla 5.1.2.

#### XR-5.

El XR-5 es una geomembrana de 1 mm de espesor formado por un sistema de cuatro capas; dos de poliéster y dos capas de resina y PVC. Material flexible de gran resistencia a sustancias químicas, razón por la cual es comúnmente usado en la impermeabilización de depósitos de residuos industriales. Su instalación requiere de equipo especial para la unión de juntas. El XR-5 es suministrado en lienzos de gran tamaño que puede reducir el número de juntas.

#### CARACTERISTICAS GENERALES.

- Flexibilidad.
- Fácil manejo.
- Facilmente soldadas por su termoplasticidad.
- Mínimamente degradable en condiciones adversas.
- Alta resistencia a la perforación.

Ver tabla 5.1.3.

#### GEOMEMBRANA DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD.

Son membranas de polietileno de alta densidad sin cargas con negro de humo y formulado con antioxidantes y estabilizadores que permiten operar satisfactoriamente expuesto al medio ambiente. Este material resiste a un sin número de agentes químicos incluyendo ácidos, álcalis, sales, alcoholes, aminas, aceites minerales e hidrocarburos. Se fabrica en espesores de 1 y 2 mm., en rollos de 2.4 m. de ancho por 90 m de largo.

TABLA 5.1.2.

PROPIEDAD	METODO DE PRUEBA	VALOR
<b>GENERAL (PROPIEDADES MINIMAS)</b>		
DENSIDAD	ASTM D 1505	0.94
ELONGACION A RUPTURA	ASTM D 638 TIPO IV	700 %
ABSORCION DE AGUA	ASTM D 570	0.1 %
<b>MECANICA (PROPIEDADES MINIMAS)</b>		
RESISTENCIA A LA TENSION (A LA RUPTURA)	ASTM D 638 TIPO IV	400 PSI
MODULO DE ELASTICIDAD	ASTM D 882	110,000 PSI
RESISTENCIA A LA PERFORACION	F 7MS 101 B METODO 2021	440 PSI / <i>1/8" espesor</i>
RESISTENCIA AL OZONO 7 d/m (100 ppm, 104 °F)	ASTM D 1149	SIN FRACTURACION VISIBLE AL MICROSCOPIO 7X
<b>TERMICAS (PROPIEDADES MINIMAS)</b>		
FRAGILIZACION	ASTM D 746 PROC. B	-112 °F
COEFICIENTE DE EXPANSION TERMICA	ASTM D 696	$1.2 \times 10^{-4}$ cm/lna °C
TRANSMISION DE VAPOR (POR DJA)	ASTM E 96	0.0 1(g/m <sup>2</sup> )
ESCR CONDICION C (100 °C)	ASTM D 1683	1500 hrs.
<b>ELECTRICAS</b>		
RESISTENCIA DIELECTRICA	ASTM D 149	450 Volts/mil

Características generales del sistema Bentomat.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Geoproductos Mexicanos, S.A. de C.V. Catálogo de especificaciones del sistema Void-Clay (Bentomat).

TABLA 5.1.3.

SUSTANCIA	EFEECTO	SUSTANCIA	EFEECTO
Acido acético (5%)	B	Keroceno	A
Acido acético (50%)	C	Cloruro de magnesio	T
Fosfato de amonio	T	Hidróxido de magnesio	T
Sulfato de amonio	T	Metanol	A
Glicol etileno	A	Alcohol metil	A
Aceite animal	A	Metil - etil cetona	X
Agua regia	X	Naphta	A
ASTM aceite a (100% de iso-octano)	A	Acido nítrico (5%)	B
ASTM aceite 2 (240 °C)	A	Acido nítrico (50%)	C
ASTM aceite e	A	Percloroetileno	C
Benceno	X	Fenol	X
Solución cloruro de calcio	T	Formaldehído de fenol	B
Hidróxido de calcio	T	Acido fosfórico (50%)	A
Solución de cloro (20%)	A	Acido fosfórico (100%)	C
Cloro	A	Cloruro de potasio	T
Hidróxido de amonio	A	Sulfato de potasio	T
Petróleo crudo	A	Agua salada	B
Diesel	A	Agua de mar	A
Etano	A	Solución de acetato de sodio	T
Gasolina	B	Solución de bisulfato de sodio	T
Glicerina	A	Hidróxido de sodio (60%)	A
Fluido hidráulico	A	Fosfato de sodio	T
Hidrocargón tipo 2	C	Acido sulfúrico (50%)	A
Alcohol isopropil	T	Tolueno	C
Jet A	A	Formaldehído	A
JF-4 Jet fuel	A	Urea	A
Cloruro de zinc	T	Aceite vegetal	A
		Xileno	X

Resistencia química para el XR-5. Nomenclatura: Sin efectos (A), ataque moderado (B), ataque severo (C), sin datos como para ser aceptable (T) y sin datos como para no ser aceptable (X)<sup>2</sup>.

<sup>2</sup>RENNSA, S.A. de C.V. Catálogo de especificaciones del XR-5, 1992.

**CARACTERISTICAS GENERALES:**

- Alta resistencia a la tensión.
- Resistencia al intemperismo.
- Resistencia química a la mayoría de los agentes corrosivos e hidrocarburos.
- Resistencia al ataque de microorganismos y roedores.
- Soldadura de juntas a base de equipo térmico.
- Satisface las normas sanitarias.

Ver tabla 5.1.4.

La resistencia y en general, las características físicas de los productos descritos anteriormente, sólo pueden dar un parámetro (muy válido por su puesto) como criterio básico para la elección del material más conveniente para los objetivos buscados. En este sentido, se necesita considerar otros aspectos, tales como la disponibilidad de los materiales, los requerimientos de instalación y sobre todo, el costo de la adquisición e instalación.

Para poder realizar un análisis comparativo de los materiales propuestos para la impermeabilización de las celdas, bajo los aspectos que se comentan arriba; se tabulan los costos, los requerimientos de instalación (preparación del terreno, equipo y materiales), y la disponibilidad de cada uno de los productos. Las cotizaciones fueron realizadas por cada una de las empresas que distribuyen los productos (ver referencias 1, 2 y 3), las cuales propusieron también las obras de estabilización o preparación del terreno. Así pues, la información resumida de todos estos aspectos están presentada en la tabla 5.1.5.



TABLA 5.1.4.  
ESPECIFICACIONES GENERALES.

Poliétileno de alta densidad y alto peso molecular .....	(HDPE)
Densidad .....	0.94 gr/cm <sup>3</sup>
Resistencia a la tensión (ruptura) .....	48000 PSI
Elongación .....	800 %
Contenido de negro de humo .....	2 a 2.5 %
Módulo de elasticidad .....	110000 PSI
Fragilización (por baja temperatura) .....	- 112 °F
Absorción de agua .....	0.1 % en peso
Resistencia al agua .....	800 %
Límite de elasticidad .....	2000 PSI
Ruptura .....	1100 a 1200 %
Resistencia térmica .....	50 %
Resistencia a la perforación .....	4.25 lb/ALON e/p

## RESISTENCIA QUÍMICA.

SUSTANCIA	EFEECTO	SUSTANCIA	EFEECTO
Acetona	E	Anilina	A
Aceites minerales	E	Benceno	E
Aceites vegetales	E	Benzaldehído	E
Acetato de amilo	E	Bicarbonato de sodio	E
Acetato de etilo	E	Bisulfato de potasio	E
Acido acético (10 %)	E	Borato de sodio	X
Acido acético glacial	E	Bromobenceno	X
Acido bórico (10 %)	E	Butiraldehído	E
Acido cítrico (10 %)	E	Ciclohexano	E
Acido clorídrico (10 %)	E	Combustibles	E
Acido clorídrico conc.	E	Combustibles ASTM	E
Acido cloro acético (10 %)	E	Cloruro de aluminio	E
Acido cloro sulfónico (10 %)	X	Cloruro de amonio	E
Acido crómico (10 %)	E	Cloruro de bario	E
Acido crómico conc.	E	Cloruro de bencilo	E
Acido esteárico (100 %)	E	Cloruro de calcio	E
Acido fórmico	E	Cloruro férrico	E
Acido fluorídrico conc.	E	Cloruro de magnesio	E
Acido fosfórico conc.	E	Cloruro de potasio	E
Acido láctico (10 %)	E	Cloruro de sodio	E
Acido nítrico (10 %)	E	Cloruro de zinc	E
Acido oléico (100 %)	E	Detergentes	X
Acido oxálico	E	Decloruro de etilo	X
Acido pírico (10 %)	E	Dicromato de potasio	E
Acido sulfúrico (10 %)	E	Disulfuro de carbono	E
Acido sulfúrico concentrado	A	Eter dibencílico	A
Acido tánico (10 %)	E	Eter etílico	A
Acido tartárico (10 %)	E	Etil benceno	A
Agua cruda	E	Etil glicol	E
Agua destilada	E	Fenol (10 %)	E
Agua tratada	E	Fenol (100 %)	E
Agua de mar	E	Fosfato de amonio	E
Alcohol bencílico	E	Fosfato de tricresilo	E
Alcohol etílico	E	Fosfato de dioctilo	E
Alcohol isopropílico	E	Furfural	E
Alcohol metílico	E	Gelatina	E
Glicerol	E	Naftaleno	E
Glucosa	E	Nitrato de amonio	E
Grasas animales	E	Nitrato de calcio	E
Grasas vegetales	E	Nitrato de zinc	E
Hexanol	E	Nitrato férrico	E
Heptano	A	Nitrobenenceno	E
Hexano	A	Percloroetileno	X
Hidróxido de amonio (10 %)	E	Perranganato de potasio	E
Hidróxido de amonio conc.	E	Sulfato cúbico	E
Hidróxido de bario (10 %)	E	Sulfato de aluminio	E
Hidróxido de calcio (10 %)	E	Sulfato de magnesio	E
Hidróxido de potasio (10 %)	E	Sulfato de níquel	E
Hidróxido de sodio (10 %)	E	Sulfato ferroso	E
Hidróxido de sodio (100 %)	E	Sulfato de bario	E
Hipoclorito de calcio	E	Tetracloruro de carbono	A
Iodo ( tintura )	E	Tolueno	A
Metil-etil-cetona	E	Tristano amida	E
Metil-isobutil-cetona	E	Xileno	A

Características generales de la geomembrana de polietileno de alta densidad y los efectos causados por algunas sustancias especiales. Referencias: ataque moderado (A), no recomendado (X) y excelente resistencia (E)<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Siconex, S.A. de C.V. Catálogo de especificaciones de Pollymer Pe., 1992.

TABLA 5.1.5.

PRODUCTO	DISPONIBILIDAD EN EL MERCADO	REQUERIMIENTOS DE INSTALACION	ESPECIFICACIONES DE PREPARACION DEL TERRENO Y PROTECCION DE LA CAPA IMPERMEABILIZANTE.	COSTOS	OBSERVACIONES
BENTOMAT	<ul style="list-style-type: none"> <li>Producto de importación.</li> <li>Disponibilidad máxima de 15 días después del pedido.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tractor para acarreo de rollos.</li> <li>Personal suficiente.</li> <li>Supervisión en juntas o uniones.</li> <li>Supervisión en anclajes.</li> <li>Talud 1:3</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estabilización del terreno con Geomalla protegida, capa de arena de basalto (tamizado de 0.3) y de espesor.</li> <li>Protección del producto con una capa de grava (3/4") de 30 cm de espesor.</li> <li>Drenas para llovizna.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Preparación del terreno: \$1 41.00 por m<sup>2</sup></li> <li>Material Bentomat: \$1 30.00 por m<sup>2</sup></li> <li>Total: \$5 95.00/m<sup>2</sup></li> </ul>	No se especifica por parte del proveedor el costo por concepto de preparación del terreno, el costo que se indica es estimado en base a los requerimientos establecidos para la preparación del sitio.
EX-5	<ul style="list-style-type: none"> <li>Producto de importación.</li> <li>No se especifica el tiempo máximo de entrega, pero se requiere suministrar el pedido un mes antes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Equipo pesado para instalación (grúas).</li> <li>Personal suficiente.</li> <li>Cuidado extremo en la instalación del producto para evitar perforaciones.</li> <li>Supervisión en juntas.</li> <li>Se requiere de equipo para sellar juntas.</li> <li>Pruebas de falla y sello en juntas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mejoramiento del terreno con tubos (tapetes) y arena de basalto en capas de 100 y 20 en respectivamente.</li> <li>Colocación de una capa de desechos municipales de 30 cm de espesor para protección del 15-1.</li> <li>Drenas y círculos para llovizna.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Preparación del terreno: \$5 70.71 por m<sup>2</sup></li> <li>Material EX-5: \$5 54.87 por m<sup>2</sup></li> <li>Total: \$5 129.58/m<sup>2</sup></li> </ul>	Costos presentados por el proveedor, en el total se incluyen todos los conceptos de la obra de instalación del material propuesto.
GEOMEMBRANA SINTETICA (2mm)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Producto de importación.</li> <li>Varias empresas distribuidoras en el país.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Extremo cuidado en la instalación para evitar perforaciones u otros daños mecánicos.</li> <li>Talud 1:3</li> <li>Equipo para soldar juntas.</li> <li>Pruebas de fallas y sello en juntas.</li> <li>Tractores para acarreo de rollos.</li> <li>Supervisión en anclajes y juntas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Limpieza del terreno levantando 10 cm del terreno natural.</li> <li>Mejoramiento del terreno con arena y grava (70-30% respectivamente) con una capa de 30 cm de espesor.</li> <li>Estabilización del terreno con una Geotextil.</li> <li>Capa de tubos de 20 cm de espesor para protección de la Geomembrana.</li> <li>Drenas para llovizna.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Preparación del terreno: \$5 70.00 por m<sup>2</sup></li> <li>Material Geomembrana sintética de 2 mm: \$1 21.77 por m<sup>2</sup></li> <li>Total: \$5 95.77/m<sup>2</sup></li> </ul>	El costo por preparación del sitio es estimado considerando los requerimientos de instalación indicados.

Tabla comparativa de los los productos propuestos para la impermeabilización de las celdas.

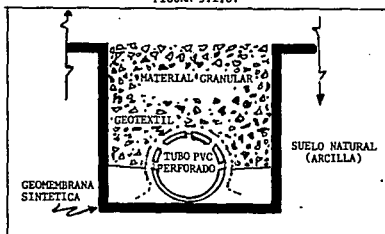
Con la tabla anterior, nos podemos dar cuenta que el producto Bentomat y la geomembrana de Polietileno de alta densidad resultan más económicos; sin embargo, para el producto Bentomat existe mayor problema en la disponibilidad del material en las cuestiones de adquisición y transporte. Con base en la disponibilidad o facilidad de adquisición de estos materiales, se propone la geomembrana de polietileno de alta densidad.

#### INSTALACION DEL SISTEMA COLECTOR DE LIXIVIADOS.

El sistema colector estará formado, de acuerdo con el diseño del mismo, por tubos de PVC, perforados hasta la mitad de su superficie cilíndrica a lo largo de éstos; los diámetros están indicados en el diseño correspondiente (ver fig. 4.4.8). Las perforaciones de los tubos se cubren con geotextil, el cual funciona como filtro, evitando el bloqueo de éstos con material sólido, que

también es arrastrado por este flujo. Los tubos colectores son colocados en una zanja, por la que pasa la geomembrana cubriendo la base y las paredes de la misma. Posteriormente, se rellena con arcilla hasta la mitad del tubo; la zanja y el resto, por material granular (grava debidamente graduada), tal como se muestra en la figura 5.1.6.

FIGURA 5.1.6.

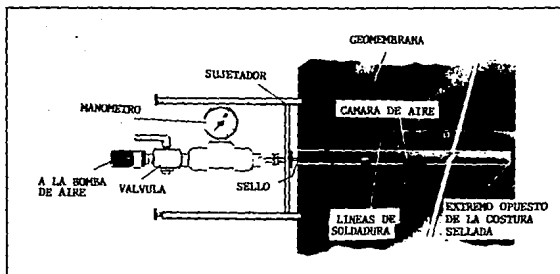


#### INSTALACION DE LA GEOMEMBRANA SINTÉTICA.

La geomembrana es colocada con ayuda de un traxcavo, el cual puede desenrollar el rollo de material a medida que se requiera, utilizando una barra metálica que lo atraviesa por el centro (eje de rotación) y un cable que sostiene a esta barra por sus extremos libres. Los traslapes de unión deben tener como mínimo 10 cm. Esta unión es realizada mediante un proceso conocido como termofusión controlada, en el que se crean "hilos" o líneas de fusión (como un cordón de soldadura) sobre los traslapes, los cuales tienen una separación uno del otro de 3 a 5 cm; creando una especie de "ducto" por la cual se inyecta aire para verificar que la unión esté bien realizada. Esto se comprueba con un manómetro, observando que no haya pérdida de presión a lo largo de dicha bolsa, debida a la fuga del aire que es inyectado.

Como prueba de resistencia de las uniones, se pueden realizar ensayos de tensión sobre éstas mediante un dinamómetro. Un detalle de los traslapes de unión, del cual comentamos, se presenta en la siguiente figura:

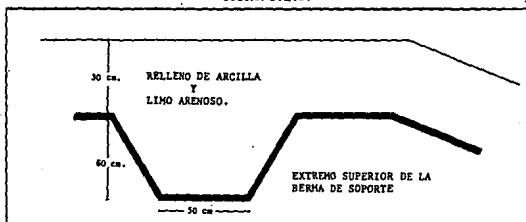
FIGURA 5.1.7.



Detalle de prueba de sellado de una junta o traslape.

Anclado de la geomembrana. Para asegurar la estabilidad de la geomembrana, ésta se ancla por sus extremos mediante la construcción de una zanja, sobre las bermas perimetrales, en la cual se confina la geomembrana con el mismo material que resulta de la excavación de la zanja (ver figura 5.1.8). El peso del material y la forma geométrica de zanja darán el soporte necesario para evitar los deslizamientos de la geomembrana ocasionados por el tránsito de los vehículos y el equipo de operación, principalmente.

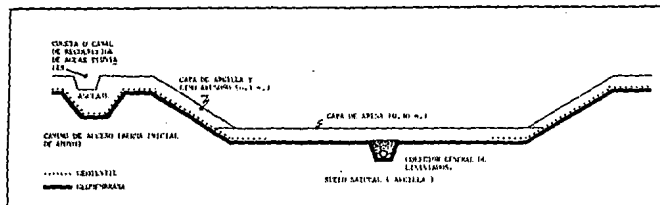
FIGURA 5.1.8.



Protección de la geomembrana. Después de haber anclado la geomembrana y de haber verificado el sellado de cada unión, se protege ésta contra las perforaciones u otros daños ocasionados por el equipo de operación de la celda. Para esto se propone la colocación de una capa de arena fina de 30 cm de espesor, compactada con un equipo sobre neumáticos para que éste no dañe la geomembrana durante su operación. Esta capa formará la base de las celdas y estará debidamente compactada y nivelada de acuerdo con los niveles de proyecto. En la zona de los taludes, la capa propuesta está formada por arcilla y limo arenoso en una proporción de 1:1; del mismo espesor al de la capa de arena; Al igual que para la zona de acceso de maquinaria y de vehículos de transferencia. Este material propuesto para los taludes de las bermas de apoyo evitará el arrastre o deslizamiento de esta cubierta, pues sus propiedades cohesivas lo impiden. Además, para aumentar la fricción entre la cubierta de material de protección y la geomembrana, se propone un geotextil para colocarse sobre la berma desde el pie de talud hasta la parte superior de la misma, anclado junto con la geomembrana.

En la figura 5.1.9 se puede observar una vista transversal de un módulo de confinamiento listo para ser ocupado por los desechos a disponer, en el que se aprecian las obras de preparación del terreno.

FIGURA 5.1.9.



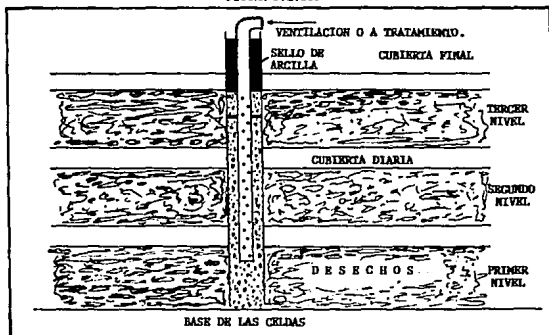
Sección transversal de un módulo de confinamiento de desechos.

### SISTEMA DE VENTILACION DEL BIOGAS.

El sistema consiste en la colocación de ductos situados a 90 y 70 m de -- distancia de separación entre un ducto y otro. Debido a la dificultad de instalación de estos ductos durante la operación o construcción de las celdas, éstos se instalan una vez que se ha alcanzado el nivel final del sistema de celdas.- Para llevar a cabo lo anterior, se realizan perforaciones ( pozos ) de 0.6 m de diámetro, en donde se coloca material granular grueso ( como espuma de basalto ) que sirve de recubrimiento protector para los ductos de extrupac o PVC, los cuales se colocan en el centro de este pozo. Estos ductos son de 20 cm de diámetro, tienen perforaciones de 2.5 cm y deberán alcanzar una altura de 2 m por encima del nivel final de las celdas, una vez que el relleno sea rehabilitado para algún fin específico o, de otro modo, se decida su clausura.

En la parte superior, a nivel del terreno final, se protegen con tubos de latón ( tambos ) insertados a 1m bajo el nivel superficial y se colocará, en el interior de éstos, arcilla rodeando al tubo como sello; en el extremo final de los tubos se colocará por último, un codo de 90° para evitar que haya entrada de agua pluvial hacia el interior de las celdas ( ver figura 5.1.10 )

FIGURA 5.1.10.



Sección transversal de un pozo de ventilación de biogas.

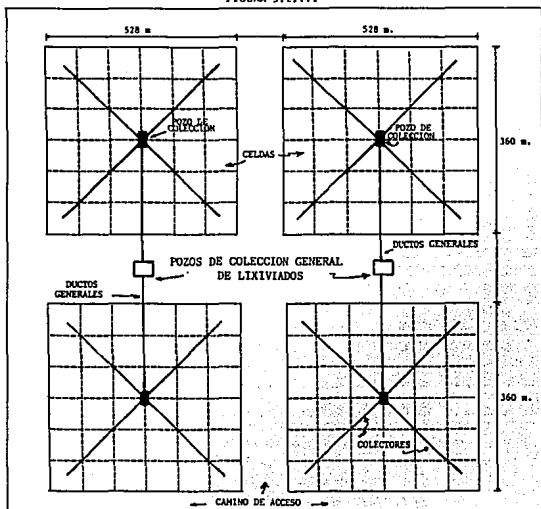
### CONSTRUCCION DE CAMINOS DE ACCESO INTERNO.

Estos caminos se construirán de tal manera que éstos "lotifiquen" el área necesaria para construir las celdas de confinamiento durante un año de operación, la cual es dividida por estos caminos en cuatro secciones de trabajo (ver figura 5.1.11). Los caminos se desplantan a 1.5 m del nivel natural del suelo.

Si se cuenta con la suficiente cantidad de cascajo, éste puede ocuparse para el terraplén que soportará la sub-base y la base del camino. De lo contrario, se puede utilizar para este propósito la espuma de basalto (tezontle).

La sub-base y base deben estar formadas por un material de características impermeables adecuadas; como podría ser la toba y la arcilla en proporciones de 3:1, respectivamente; compactadas a un 95% de la prueba Proctor. Por último, se recubrirá la superficie de los caminos con una emulsión asfáltica.

FIGURA 5.1.11.



## 5.2. OPERACION.

A esta actividad corresponden todas las acciones encaminadas a el confinamiento de los desechos, ya sea en forma directa o indirecta. Tales acciones --- comienzan en el acceso principal del relleno, con el pesaje y registro de los desechos y concluyen, para una jornada de trabajo, con la colocación de la capa de cubierta sobre los mismos.

Una de las actividades más importantes dentro de la operación es, el monitoreo de biogas y lixiviados dentro de la zona confinamiento de desechos, así como del área que la circunda y la programación de las obras de mantenimiento de la infraestructura propia del relleno durante toda su vida útil y posclausura del mismo. De esta manera, está claro que en esta fase de operación de un rrelleno sanitario no todo resulta lo que es programado ( como idealmente se requiere ), ya que en esta etapa surgen varios imprevistos, mismos que deben estar contemplados en forma general dentro de los programas de operación y de emergencias.

Otro aspecto importante y necesario para llevar una operación económica y adecuada, es el equipo que, así como los demás requerimientos, deben estar contemplados en el diseño mismo del relleno y que en ambos ( en la operación y en el diseño ) dependen principalmente de un sólo parámetro: la cantidad de desechos a disponer. De acuerdo a esto último se elegirá la cantidad y la variedad de material de cubierta necesario para cubrir diariamente los desechos, entre otras cosas.

### ELECCION DEL EQUIPO.

Como ya se mencionó anteriormente, de acuerdo a la cantidad de desechos a disponer y a el método de operación o construcción de celdas definido por -- las condiciones generales del sitio, se escogerá una variedad de equipo para -- esparcir, compactar, excavar, empujar y entre otras cosas, transportar los desechos y el material de cubierta, durante las fases de construcción y de operación del relleno sanitario. En el mercado ya hay equipo especializado para la operación de estas obras. Máquinas con accesorios especiales para triturar y -- compactar basura, muy productivas, aunque también muy costosas; su adquisición es justificada en grandes rellenos.



En general, como criterios para la elección del equipo (tipo y cantidad), se pueden enlistar principalmente los siguientes:

- Volumen diario de desechos a disponer.
- Volumen y tipo de material de cubierta.
- Condiciones topográficas y meteorológicas de la zona.
- Distancia máxima de manejo de desechos y material de cubierta.
- Disponibilidad y eficiencia del equipo.
- Versatilidad de la maquinaria (capacidad para realizar dos o más funciones).
- Estabilidad del equipo.
- Fácil mantenimiento y disponibilidad de refacciones.

En la operación de un relleno sanitario, los rendimientos que especifican los fabricantes de la maquinaria utilizada para las actividades que se llevan a cabo no suelen coincidir con el rendimiento obtenido en la práctica; ya que la mayoría del equipo puede estar operando regularmente en diferentes condiciones de trabajo. A medida que han sido utilizados ciertos equipos en la operación de estas obras, se han adaptado e inclusive se ha diseñado equipo especial para -- que desarrolle en forma eficiente las actividades típicas de un relleno; capaces para el manejo de desechos (principal material manejado). Por otro lado, es posible planear un flotilla de equipo formado de diferentes máquinas que realicen en forma eficiente cierta actividad. Alternando o combinando, en toda la jornada de operación, con dos o tres tipos de maquinaria, se pueden obtener buenos resultados.

Para poder elegir el equipo más adecuado a las necesidades dadas por el sitio destinado para el confinamiento de desechos, se describen las máquinas -- que comúnmente son utilizadas para este propósito.

#### TRACTORES SOBRE ORUGAS.

Este equipo está formado por un tractor y hoja topadora. Las hojas topadoras son placas de acero excelentemente fuertes, especiales para resistir fuerzas de empuje y torsión y son capaces de jalar o empujar grandes masas de material; aunque a veces pueden adaptarse para otros fines, cambiando o incluyendo algunos accesorios. Las hojas o cuchillas que pueden formar parte de este trac

tor son llamadas hojas "U" o Universal, hojas "S" o recta y hojas "A" o de giro.

La hoja "U" facilita el empuje de grandes cargas debido a la gran dimensión de esta hoja empujadora frontal y al ángulo recto que forma ésta con el eje longitudinal del tractor. Por estas características, esta hoja es la más recomendable para usarse en un relleno sanitario.

Las hojas "S" son más pequeñas que la "U", por lo que son más fáciles de maniobrar. En rellenos sanitarios empujan menores volúmenes, pero son más eficientes para la conformación de taludes, nivelar y cubrir los desechos.

La hoja "A" puede emplearse en posición recta o girar formando un ángulo hasta de 65° respecto al eje longitudinal del tractor. Es utilizada para el corte inicial en caminos, abertura de zanjas, empuje lateral y otras labores similares.

Cuando el tractor de orugas es constituido por hojas "U" o "S" es llamado "Bulldozer" o "Empujador". El ancho de la oruga constituye una verdadera zapata de apoyo, y entre más ancha sea ésta, más estabilidad tendrá la máquina.

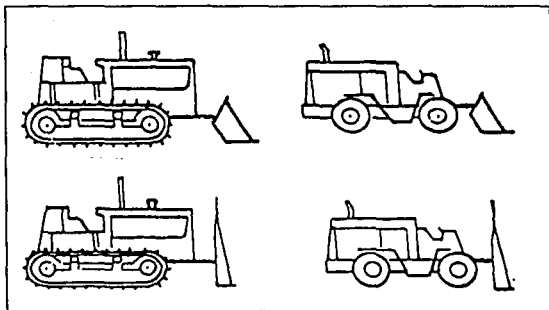
Los accesorios que pueden constituir este equipo son desgarrador, cilindro de inclinación de hoja, protector contra vuelco, gancho delantero para remolque, ventilador reversible, sistema de luces, extinguidor, etc. (ver fig. 5.2.).

#### CARGADOR FRONTAL.

Son tractores montados sobre orugas o neumáticos en los que en la parte delantera llevan un cucharón accionado por mandos hidráulicos. Este cucharón es un recipiente de acero tratado al calor con refuerzo, por medio de dispositivos se montan entre la plancha de la torre del cucharón. Los cargadores son útiles para excavar y manejar material suelto, elevándolo del suelo y descargándolo sobre camiones u otros medios de transporte o, de otro modo, llevarlos de un sitio a otro (a cortas distancias si es sobre orugas). También sirve para abrir zanjas; en rellenos sanitarios para triturar, esparcir y compactar los desechos. Para esto último se recomienda que el equipo sea sobre orugas pues los neumáticos son susceptibles a las ponchaduras.

Los accesorios que pueden utilizar estos cargadores son: desgarrador, rag

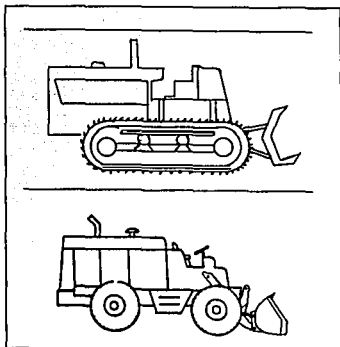
FIGURA 5.2.1.



Bulldozers de orugas y de neumáticos con cucharón.

trillo para desmontar, rastrillo para abrazaderas, contrapesos, protector para radiador, etc., (ver figura 5.2.2).

FIGURA 5.2.2.



Cargadores frontales sobre orugas y sobre neumáticos.

## COMPACTADORES.

Este equipo es muy variado; la conveniencia del tipo a emplearse depende del material a compactar; en este caso, las características de los desechos y del material de cubierta (principales materiales a compactar) son contrastantemente diferentes, y el equipo que en uno presenta excelentes resultados, en el otro puede ser inadecuado. Esta situación prevalece en equipos como los que se describen a continuación.

Rodillo pata de cabra. Está constituido por un cilindro giratorio montado en el interior de un chasis. En la superficie periférica de éste, se encuentran unas salientes radiales de longitud que va de 10 a 25 cm. Debido a la forma característica de estas salientes se le llaman "Patatas de cabra", las cuales penetran en el suelo de dentro hacia afuera "amasando" la superficie que se compacta. Este equipo es utilizado especialmente para materiales con suficientes cantidades de finos, tales como los limos y las arcillas.

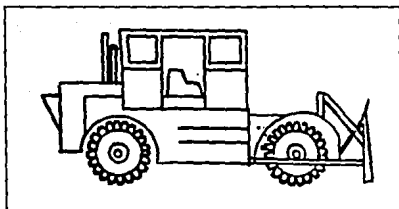
Compactador de neumáticos. Están integrados por trenes de dos o más neumáticos que van montados en un chasis. La eficiencia de este compactador depende del área y la presión de contacto (la cuales igual a la presión de inflado de los neumáticos), del número de pasadas y del espesor de la capa del material a compactar. Es recomendable que éste último no sea mayor de 20 cm; la variación de espesor está en función del peso del equipo compactador, incrementando 1 cm por tonelada de peso hasta un espesor máximo de 50 cm.

Compactador especial para rellenos sanitarios. Este es un equipo especialmente diseñado para operar en esta obras. Está formado por una hoja topadora y remolque que con rodillo delantero. El equipo se desplaza sobre tambores cilíndricos dentados, resistentes a la abrasión, los cuales pueden desmenuzar y compactar los desechos; mientras que la hoja topadora permite extender los mismos en capas uniformes (ver figura 5.2.3).

## MOTOCONFORMADORAS.

Son máquinas de múltiples aplicaciones; destinadas a mover, nivelar y afinar superficies. Son especiales para la construcción y el mantenimiento de caminos. La característica principal de esta máquina reside en los dispositivos-

FIGURA 5.2.3.

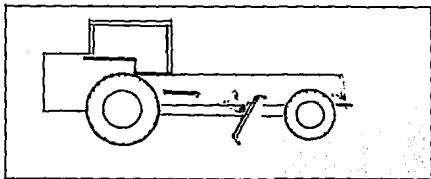


que le permite girar la cuchilla que la forma y moverse en todos los sentidos, lo que le da a este equipo las siguientes ventajas:

- Puede regular la altura de la cuchilla con relación al plano del suelo.
- En el plano horizontal puede quedar fija, formando un ángulo cualquiera respecto al eje horizontal de la máquina.
- Puede inclinarse con relación a un ángulo horizontal.

La rastra que forma este equipo se usa para escarificar el terreno; está compuesta aproximadamente de 8 a 10 dientes de acero unidos por un soporte, el cual sube o baja; lo que le permite aflojar la capa superficial del terreno y posteriormente, con la cuchilla, levantarla y acamellonarla. La cuchilla, fabricada de acero, va montada sobre un plano que puede hacerla girar en sentido vertical y horizontal. (ver figura 5.2.4).

FIGURA 5.2.4.



## RETROEXCAVADORA.

Su función principal es realizar la excavación de zanjas y la carga de material. En ella se destaca la facilidad y rapidez para intercambiar sus múltiples cucharones.

En la tabla 5.2.5 se presenta una evaluación del equipo comúnmente utilizado para las actividades básicas en la construcción y operación de un relleno sanitario. Considerando dicha tabla y los resultados observados en la práctica operativa de estos equipos, puede establecerse que el tractor sobre orugas es el más versátil en la operación de estas obras; ya que se le emplea para excavar, acomodar y compactar desechos y en la colocación y compactación del material de cubierta, entre otros trabajos complementarios.

Tomando en cuenta que en la práctica un tractor de 140 H.P. puede manejar hasta 400 ton/turno, se puede seleccionar el modelo y la cantidad correspondiente para ajustarlo a las necesidades de operación requeridas. Este equipo puede ser completado con retroexcavadoras y motoconformadoras para las actividades fuera del manejo de desechos, tales como lo son el mantenimiento y/o construcción de caminos, las obras de canalización del drenaje pluvial y, en general, el mantenimiento del relleno.

TABLA 5.2.5.

EQUIPO	DESECHOS SÓLIDOS		MATERIAL DE CUBIERTA ( LIMOS )			
	COLOCACION	COMPACTACION	EXCAVACION	COLOCACION	COMPACTACION	TRANSPORTE
Tractor sobre orugas con topadora	E	B	E	E	B	NA
Tractor sobre orugas con cargador frontal	B	B	E	B	B	B
Tractor sobre neumáticos con topadora	E	B	L	B	B	NA
Tractor sobre neumático con cargador frontal	B	B	L	B	B	E
Tractor con ruedas compactadoras de acero y topadora	E	E	B	B	E	NA
Retroexcavadora sobre orugas	NA	NA	E	L	NA	L

Tabla comparativa del equipo comúnmente utilizado en la operación de un relleno sanitario. Nomenclatura: Excelente (E), Bueno (B), no aplicable (NA) y limitado (L).<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Memoria técnica del proyecto de Norma Ecológica para el manejo de residuos sólidos municipales, SEDUE, 1988.

## EQUIPO AUXILIAR.

El equipo auxiliar se ha denominado así por la menor necesidad de adquisición, mas no por la menor magnitud de importancia. Dentro de este equipo se considera a los camiones tanque o pipas, dotados de mangueras y aspersores, utilizados para el control del polvo y el proporcionamiento de humedad en los procesos de compactación; para el riego de caminos, para el mantenimiento y lavado de maquinaria y el suministro de agua potable.

Los camiones volteo son utilizados para el transporte del material de cubierta hacia la zona de confinamiento. También es requerido como equipo auxiliar una bomba especial para el desalojo de lodo y agua pluvial, accionada por un motor no eléctrico; y compresoras de aire para limpieza interna de las máquinas y el abasto de aire al equipo movilizado por neumáticos.

Para nuestro ejemplo de aplicación, de acuerdo a las necesidades que se tienen que satisfacer (llevar a cabo el confinamiento de 7,998.747 ton/día de desechos que aproximadamente se calcula que entrarán al relleno sanitario), se propone la adquisición del siguiente equipo:

- Tractor de carriles, D-8 de 240 HP
- Compactador de rodillos
- Retroexcavadora
- Hidrolavadora
- Camión pipa (8 m<sup>3</sup> de capacidad)
- Bombas de gasolina de 1/4 HP
- Compresora y/o aspersora.

Se propone que el confinamiento de desechos se realice, de acuerdo a la magnitud de desechos mencionada arriba, en cuatro frentes de trabajo (ver diseño del módulo de confinamiento en fig. 5.1.11), los cuales recibirán aproximadamente 2,000 ton/día. De acuerdo con esto, se proponen 3 tractores D-8 de 240 HP (que han alcanzado, en la práctica 650 ton/jornada de rendimiento en el manejo de desechos municipales) por cada frente de trabajo; 4 compactadores, uno por cada frente; y para la operación conjunta del área de confinamiento, se proponen 2 pipas para el transporte de agua y una unidad por cada concepto del equipo restante señalado en el listado anterior.

## PLAN DE OPERACION.

Un plan simple, pero bien organizado, es la llave de una operación exitosa de un relleno sanitario. Un buen plan debe estar provisto de un manual de - operación diaria y anual, de tal forma que el área del relleno sea eficiente-- mente utilizada; debe contar con un programa de capacitación y entrenamiento - del personal operativo y, en general, el procedimiento descriptivo y fundamen-- tado que detalla la forma de llevar a cabo las principales actividades siguien-- tes:

- Excavación, transporte y almacenamiento del material de cubierta.
- Construcción de las celdas diarias de confinamiento de desechos.
- Activi'dades de control del relleno ( vigilancia, control de accesos, ho rarios de atención, señalamientos, etc. ).
- Mantenimiento del equipo y de las instalaciones generales del relleno.
- Programación de la capacitación para afrontar estados de emergencia y - otras contingencias.
- Monitoreos.

En los manuales que constituyen el plan de operación, se sistematizan las actividades y se designan funciones y responsabilidades; con el propósito de or ganizar y controlar el desempeño del equipo, de los recursos humanos y la adm inistración de los recursos en general. Los planes de operación deben ser flexi bles y deben considerarse en su diseño, los cambios, imprevistos y otros facto res que puedan alterar el desarrollo de la operación. Debe existir una conti nua revisión de estos planes y un registro detallado de los acontecimientos y variaciones que puedan acontecer durante el desarrollo de la operación, y que - sean aspectos significativos para tomarse en cuenta en los futuros ajustes o adecuaciones de estos planes.

Las características de los planes de operación varían de un relleno a --- otro, como se ha dicho, por las diferencias topográficas y las condiciones prop ias de sus respectivos terrenos; pero en todo plan de operación se busca esen cialmente lo siguiente:

- La mayor compactación posible en el confinamiento de los desechos.
- La ocupación óptima del área de confinamiento.



- La reducción en lo posible del área activa de operación ( frente de trabajo ).
- La existencia de caminos de acceso en buenas condiciones de tránsito -- dentro y fuera del relleno sanitario.
- Los límites del relleno deben ser marcados con un cercado y casetas de vigilancia manteniéndolas en buen estado de operación.
- Las señales de tránsito de los caminos deben ser adecuadas, claras y visibles.
- Que el manejo del agua pluvial sea adecuado ( cunetas y canales de drenaje ).
- Que el personal operativo del relleno cuente con capacitación constante, sobre el control del fuego y cualquier otra situación de emergencia, para poder actuar en caso de accidentes y así mismo que tomen las precauciones necesarias de seguridad para evitarlos.
- Que se opere en forma adecuada el equipo y se realice mantenimiento --- constante del mismo, así como de las instalaciones generales del relleno.
- Que se programen y se lleven a cabo las obras complementarias que sean requeridas.
- Que exista un monitoreo constante y programado de los efectos adversos que el relleno pueda ocasionar al ambiente.

Los datos de partida de la programación y de la metodología de todas estas actividades son los que resultan del conjunto de factores que determinan el método constructivo u operativo del relleno y los resultados de los estudios de exploración e identificación de las características del sitio, mismos que son considerados para la elección del terreno adecuado para el confinamiento de los desechos. Así mismo, las recomendaciones y observaciones que salen de la práctica de otros rellenos, las especificaciones de construcción normalizadas y las recomendaciones de proveedores y fabricantes de equipo y material.

#### MATERIAL DE CUBIERTA.

El material de cubierta puede obtenerse, si las características de éste son adecuadas y si las condiciones del terreno lo permiten, del mismo sitio de disposición; de lo contrario, debe transportarse del lugar más cercano al re--

lleno sanitario y colocado en un área adyacente al sitio de confinamiento de desechos en operación. La función del material de cubierta es impedir la entrada y salida de fauna nociva, reducir los olores desagradables, controlar la entrada de agua al interior de las celdas, desviar la atracción de los desechos por las aves, canes y roedores que buscan alimento, y dar al sitio de confinamiento una apariencia agradable que no degenerate la imagen del ambiente.

Muchos tipos de suelo son empleados para material de cubierta. Algunos de ellos debidamente compactados y eficientemente graduados, pueden ser usados para controlar la infiltración del agua, ya que éstos pueden alcanzar muy bajas permeabilidades. La experiencia operativa registrada en algunos manuales recomienda un espesor de 15 cm de una capa de limo arenoso, para alcanzar los objetivos indicados. Por otro lado, puede presentarse la ocasión de requerir de un material de cubierta con características permeables con el propósito de que exista una buena ventilación de los gases que se generan en el interior de una celda. Bajo esta necesidad, un material de cubierta adecuado será aquél que no retenga mucha agua. Sin embargo, se considera que es más conveniente el uso del material de cubierta para el control de la infiltración de agua, que el uso de éste con el fin de ventilar. Para esto último es recomendable instalar ductos de ventilación.

Considerando los criterios respecto a las ventajas que algunos materiales poseen para usarse como material de cubierta, en la tabla 5.2.6 se presenta una evaluación de algunos materiales que pudieran proponerse como material de cubierta.

Para programar la adquisición del material de cubierta se recomienda calcular el volumen requerido de éste para cada año de operación, a lo largo de la vida útil del relleno sanitario. En este caso, considerando la cantidad recomendada en el soporte teórico, se calcula una cantidad de material para cubierta correspondiente al 15% de la cantidad de desechos a confinar. Así, tomando los valores de la tabla 4.1.4, se determina la cantidad anual de material de cubierta; estos valores se tabulan en la tabla 5.2.7.

CUADRO 5.2.6.

F U N C I O N	T I P O D E S U L O					
	GRAVA LIMPIA	GRAVA ARCILLA ALUVION	ARENA LIMPIA	ARENA ARCILLA ALUVION	ALUVION	ARCILLA
PREVENCIÓN DE MADRIGUERAS O TUNELES DE ROEDORES	B	F-B	B	NF	NF	NF
EVITA LA PROLIFERACION DE MOSCAS	E	NF	E	B	B	NF
REDUCE EL GRADO DE HUMEDAD	NF	F-B	NF	B-E	B-E	E
REDUCE LA VENTILACION DE GAS A TRAVES DE LA CUBIERTA	NF	F-B	NF	B-E	B-E	E
PROVEE AGRADABLE APARIENCIA Y CONTROL DEL VUELO DE PAPEL	E	E	E	E	E	E
SOPORTA VEGETACION	NF	B	NF	E	B-E	B
VENTILA LA DESCOMPOSICION DE GAS ( ES PERMEABLE )	E	NF	B	NF	NF	NF

Cuadro comparativo de los materiales que frecuentemente son utilizados como material de cubierta de los desechos sólidos municipales. Nomenclatura: Bueno (B), favorable (F), excelente (E) y no favorable (NF).<sup>5</sup>

CUADRO 5.2.7.

AÑO	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
VOLUMEN ACUMULADO	6796391.56	9736674.75	14823164.3	2006431.0	25664693.7	31023076.2	36732164.5	42651125.0	48727090.3	54963353.3	61431267.4	68600000.0
PORCENTAJE DE ESPACIO OCUPADO	7.54	13.31	23.31	31.51	40.03	48.78	57.78	67.06	76.41	86.45	96.58	100.0

Volumen de material de cubierta requerido para cada año de operación del sitio de confinamiento de desechos, de acuerdo con el volumen proyectado de desechos municipales. Para el cálculo se considera el 15% de éstos.

<sup>5</sup>Brunner R. y D. Keller. Sanitary Landfill Design and Operation, E.P.A, USA, 1972.

### CONSTRUCCION DE LAS CELDAS.

La construcción u operación de las celdas de confinamiento de desechos se reduce en los siguientes pasos: Descarga de los desechos en el área de confinamiento dirigida por el responsable del frente de trabajo; esparcir y compactar los desechos formando un talud en la dirección de avance con una relación recomendada de 3:1; y por último, cubrir los desechos con el material de cubierta y compactar éste último de acuerdo a las especificaciones establecidas.

### CONTROL DEL RELLENO SANITARIO.

Este control comienza desde el acceso principal del relleno con el pesaje y registro de los vehículos que entran, anotándose los datos particulares del vehículo, su procedencia, cantidad y tipo de desechos u otro material, fecha y hora de entrada, etc. Posteriormente se restringe la velocidad o circulación de los vehículos dentro de un área determinada del relleno. Para todo esto es necesario de la participación del personal de vigilancia, de la supervisión in terna de cada uno de los sectores del relleno y de la infraestructura correspondiente ( cercas, casetas de vigilancia, sistema de pesaje, señalamientos, -- etc. ).

### MANTENIMIENTO DE EQUIPO E INSTALACIONES.

El mantenimiento del equipo así como el de las instalaciones generales que constituyen el relleno sanitario es indispensable para el adecuado funcionamiento de éste; así como para mantener o reducir los gastos por operación.

En general, se pueden identificar dos tipos de mantenimiento: el preventivo y el correctivo. En el caso del equipo, el mantenimiento preventivo debe programarse de acuerdo a las especificaciones del fabricante, a las condiciones de trabajo a las que se somete el equipo, y a los reportes o historial operativo del mismo. Por otro lado, el mantenimiento correctivo debe ser previsto considerando el consumo y frecuencia de los defectos, desgastes y daño de piezas para poder tener el control de las adquisiciones de refacciones y lograr implantar los servicios mecánicos y eléctricos en general. El mantenimiento correctivo oportuno del equipo dependerá esencialmente de la disponibilidad de piezas, materiales y refacciones en el almacén del relleno o, en otro caso, de-

la factibilidad de un contacto cercano con los fabricantes o proveedores.

Para complementar las especificaciones de mantenimiento dadas por los fabricantes del equipo, se recomienda el mantenimiento del equipo en los periodos de tiempo ( en horas de operación ) principalmente en los siguientes aspectos:

- Cambios de aceite y filtros en general de los motores cada 100 horas de operación o en menor tiempo si las condiciones de trabajo son muy severas ( en cuanto a esfuerzo, horarios de trabajo, altas temperaturas del clima y abundancia de polvo ).
- Afinación general cada 100 horas, en bombas de inyección, toberas, inyectores, líneas de combustible y transferencia.
- Purga y lavado de radiador cada 70 horas; reemplazo de bandas cada 500 hrs.; sopleteo del radiador cada 8 hrs. La limpieza general de los radiadores puede efectuarse diariamente al término de la jornada con aire comprimido o chorros de agua. La obstrucción de las colmenas del radiador puede minimizarse con el uso del ventilador reversible.
- El sistema rodante de las máquinas debe limpiarse diariamente raspándose los desechos y el lodo aglutinado en las orugas, rodets y carcasas. Los neumáticos deben limpiarse y mantener la presión de inflado indicada en las especificaciones del equipo.
- Revisión y servicio del sistema eléctrico del equipo cada 100 hrs.
- Cambio de filtros y aceite de los sistemas hidráulicos y de transmisión cada 400 hrs.
- Revisión y tensión de las cadenas de rodamiento de acuerdo a la supervisión diaria; revisión de roles, bujes y pernos cada 600 hrs.

Ahora, con respecto al mantenimiento general de las instalaciones del relleno sanitario, cabe decir que éste juega un papel muy importante en la adecuada operación del relleno y en la imagen salubre del mismo. Las actividades de mantenimiento en este caso comprenden: la limpieza general de oficinas, servicios públicos, mantenimiento de caminos, sistema de pesaje, la red de drenaje; limpieza o dragado de los canales de drenaje de aguas pluviales; el control del polvo por medio de riego frecuente y dosificado de agua, sobre todo en las

áreas de trabajo y caminos internos de terracería. Para controlar el arrastre de papeles y materiales ligeros debidos al viento, se puede colocar una cortina de árboles como barrera natural, que también puede servir para bloquear el ruido ocasionado por el equipo operativo y los olores desagradables cuando éstos no son completamente sellados por el material de cubierta. El mantenimiento de las instalaciones de captación y ventilación del lixiviado y biogas respectivamente, debe programarse y coordinarse con los monitoreos correspondientes.

#### MONITOREO.

El monitoreo programado y frecuente debe realizarse durante la operación y el poscierre del relleno sanitario. Estos monitoreos tienen principalmente los siguientes objetivos:

- Reconocimiento del cambio en las cualidades iniciales de las aguas subterráneas que puedan dar indicio de contaminación de las mismas.
- Precisar los parámetros de control de lixiviados y biogas.
- Llevar un seguimiento y registros de las condiciones en el que se desarrolla la operación, la existencia y magnitud de posibles impactos al ambiente.

#### MONITOREO DE LIXIVIADO.

Los muestreos para determinar el grado de contaminación que puedan ocasionar las fugas eventuales o accidentales de lixiviados, se deben ubicar de acuerdo a la dirección de las aguas freáticas, a los reconocimientos geohidrológicos generales y a los desniveles del terreno. Los muestreos se basan principalmente en dos aspectos: el incremento en la humedad del sitio y la variación de las propiedades químicas del agua subterránea. Para verificar la calidad de estas aguas muestreadas se pueden comparar los resultados del análisis de las muestras con concentraciones estandarizadas de los parámetros considerados, dados a conocer por los organismos correspondientes al manejo y tratamiento de agua (por ejemplo la Secretaría de Recursos Hidráulicos), las Normas Ecológicas Ambientales o, en otro caso, los organismos internacionales reconocidos, como lo es la E.P.A.\* Un ejemplo de estos parámetros estandarizados lo podemos observar en la tabla 5.2.8.

\* Environmental Protection Agency.

TABLA 5.2.8. .

SUSTANCIAS PRESENTES	L I M I T E S (*) (mg/l)		
	RECOMENDADO	ACEPTABLE	TOLERANCIA
ABS ( Sulfonato de alcohol-benceno )	0.5	1.0	---
Arsénico ( As )	---	---	0.05
Bario ( Ba )	---	---	1.0
Cadmio ( Cd )	---	---	0.01
Calcio ( Ca )	75	200	---
Extracto de carbono en cloroformo (CCE)	0.2	0.5(**)	---
Cloratos ( Cl )	200	600	---
Cromo hexavalente ( Cr <sup>+6</sup> )	---	---	0.05
Cobre	1.0	1.5	---
Cianatos	---	---	0.2
Fluoratos	000	1.0/1.5	---
pH ( concent, iones H <sup>+</sup> )	7.0/8.5	6.5/9.2	---
Hierro ( Fe )	0.3	1.5	---
Plomo ( Pb )	---	---	0.05
Magnesio ( Mg )	50	150	---
Sulfatos de Mg y Na	500	1,000	---
Manganeso ( Mn )	0.1	0.5	---
Nitratos ( NO <sub>3</sub> )	---	45	---
Compuestos fenólicos (en forma de fenol)	0.001	0.002	---
Selenio ( Se )	---	---	0.01
Sulfatos ( So <sub>4</sub> )	200	400	---
Zinc ( Zn )	5	15	---

Normas de calidad de agua potable. O.H.S.<sup>6</sup>

## NOTAS:

(\*) : Recomendados: Concentraciones satisfactorias para el consumo.

Aceptables: Concentraciones arriba de las cuales la potabilidad del agua se perjudicaría "notablemente"

Tolerancia: Concentraciones arriba de las cuales puede existir un riesgo real para la salud.

(\*\*): Concentraciones superiores a 0.2 mg/l exigen análisis adicional para determinar el agente causante.

<sup>6</sup> FUENTE: PORRAS MARTIN, J. & THAUVIN, J.P. Aguas subterráneas. Cuadernos del CIFCA. Madrid, 1978.

El número de parámetros que pueden ser analizados en un depósito de aguas subterráneas en la zona de un relleno sanitario puede ser grande, dependiendo de la institución que los designe. Sin embargo, el propósito de un programa de monitoreo es detectar indicios de contaminación y para esto es necesario, y -- más que suficiente, analizar lo siguiente:

- TEMPERATURA.

El incremento de la temperatura es señal de la actividad microbiana causante de la descomposición de los desechos y la consecuente generación de biogas.

- pH.

Es la medida de acidez o alcalinidad de un material. Es medido en escala de 0 ( extremadamente ácido ) al 14 ( extremadamente alcalino; el valor de 7 se considera neutro ). El pH de las aguas de un acuífero normalmente variará poco de un pozo a otro, a menos que una fuente de contaminación esté presente. Usualmente es determinado en campo, pero las pruebas pueden repetirse en laboratorio.

- COC.

Es la cantidad de oxígeno consumido ( mg/l ) durante la oxidación química del material orgánico y alguno que otro inorgánico.

Si el lixiviado está presente, el COC se incrementará por encima de los niveles normales. Este parámetro es determinado en laboratorio.

- CLORUROS Y SULFATOS.

Son usados como indicadores de lixiviado debido a que su presencia es característica de éste, sin que haya atenuación o reducción a medida -- que el lixiviado se mueve a través de los desechos, el suelo o las aguas subterráneas. Un incremento en el nivel de éstos puede indicar la contaminación con lixiviado. Esta determinación es llevada a cabo en laboratorio.

- NITROGENO.

Un incremento en nitratos o en amoníaco puede delatar el contacto con lixiviados. Los componentes nitrogenados son debidos a la descomposición orgánica y son usados como indicadores de contaminación. El nitró-



geno puede ser originado por fertilizantes químicos. Esta determinación es llevada a cabo en laboratorio.

#### - CONDUCTIVIDAD ESPECIFICA.

Es la medida de la capacidad de una sustancia para transmitir una corriente eléctrica. Una conductividad alta indica la presencia de material orgánico disuelto en agua. Esta determinación es realizada "in situ".

Las pruebas básicas de rutina de estos parámetros pueden ser completadas por determinaciones de los parámetros de las listas estandarizadas para estos muestreos, que incluyen además los siguientes parámetros: alcalinidad, sólidos suspendidos, orgánicos, volátiles, arsénico, mercurio, potasio, sodio, zinc y otros. En el cuadro 5.2.9 se encuentran resumidos los parámetros a determinar.

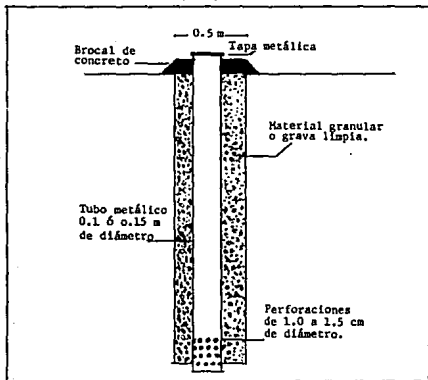
CUADRO 5.2.9.

1. MATERIA ORGANICA:	- Demanda bioquímica del oxígeno (DBO <sub>5</sub> )
	- Demanda química de oxígeno (DQO)
2. PARAMETROS FISICOS:	- Conductividad específica.
	- Turbiedad.
3. PARAMETROS QUIMICOS:	- Potencial hidrógeno pH.
	- Alcalinidad total como CaCO <sub>3</sub>
	- Cloruro (Cl)
	- Cloruro (Cl)
	- Dureza total como CaCO <sub>3</sub>
	- Fosfatos totales como P = PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
	- Nitrógeno orgánico como N-Org.
	- Nitrógeno amoniacal como N = NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
	- Sulfatos (SO <sub>4</sub> )
	• Metales:
	- Arsénico (As) <sup>+3,+5</sup>
	- Cadmio (Cd) <sup>+2</sup>
	- Calcio (Ca) <sup>+2</sup>
	- Cobalto (Co) <sup>+2</sup>
	- Cromo total (Cr) <sup>+3,+6</sup>
	- Hierro total (Fe) <sup>+2,+3</sup>
	- Magnesio (Mg) <sup>+2</sup>
	- Mercurio total (Hg) <sup>+2</sup>
	- Níquel (Ni) <sup>+2,+3</sup>
	- Potasio (K) <sup>+1</sup>
	- Plomo (Pb) <sup>+2,+4</sup>
	- Sodio (Na) <sup>+1</sup>
	- Zinc (Zn) <sup>+2</sup>
4. ORGANISMOS INDICADORES BACTERIOLOGICOS:	- Bacterias coliformes totales en 100/100 ml.
	- Bacterias coliformes totales en 100/100 ml.

Parámetros básicos de análisis para la determinación del grado de contaminación del agua y del suelo.

El monitoreo del lixiviado puede llevarse a cabo mediante lisímetros, piezómetros y pozos de monitoreo. Estos últimos son los más usados; pueden ser -- construidos con equipo rotatorio como el que se usa para exploración de suelos, colocando una tubería metálica de 0.10 m de diámetro. Entre la pared del tubo y del pozo se coloca grava limpia de un tamaño no menor a 0.19 mm. De estos pozos se extraen las muestras para su análisis en laboratorio. En la figura -- 5.2.10 se muestra un diseño típico de estos pozos.

FIGURA 5.2.10.

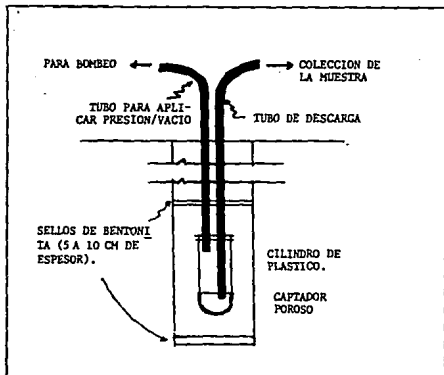


#### LISIMETROS.

Estos dispositivos de muestreo son los menos usados debido a las dificultades que presenta su instalación y manejo; son construidos o instalados bajo la zona de confinamiento. El tubo colector debe ser lo suficientemente largo y adecuado para que se colecte un volumen suficiente de la muestra para el respectivo estudio. La muestra puede ser bombeada hasta la superficie por un sistema de succión (ver figura 5.2.11).

La frecuencia del monitoreo, así como la ubicación en donde es realizado, deben ser planeados y programados de acuerdo a los siguientes factores:

FIGURA 5.2.11.



Lisímetro para el monitoreo de lixiviado.

- Generación de lixiviado.
- Características geohidrológicas del sitio (tamaño y dirección del flujo)
- Líneas probables de flujo de lixiviado.
- Edad del relleno.
- Desempeño de la capa impermeable (si la hay).
- Evidencias de contaminación en el sitio de confinamiento y en sus alrededores.

La evaluación de estos factores determinan la frecuencia del monitoreo; - es decir, si éste debe realizarse cada semana, cada mes, etc. Así mismo, esta evaluación influirá en la programación o en la modificación de los programas - de monitoreo.

#### MONITOREO DE BIOGAS.

Ya que el metano, con un porcentaje significativo en la generación total del biogas, es un gas altamente explosivo, es necesario conocer y controlar -

su producción y establecer su comportamiento a lo largo del tiempo de operación, y aún después, en la posclausura del relleno sanitario. En esta última etapa, la presencia de biogás generalmente puede detectarse observando el marchitamiento o el crecimiento raquítico de la vegetación que complementa la capa final de cubierta del sitio. Por otro lado, el registro de valores altos del pH (alta alcalinidad) en las muestras tomadas de las aguas subterráneas, pueden ser indicios de grandes concentraciones de gas.

Actualmente, el desarrollo tecnológico en el campo de la Ingeniería Ambiental ha puesto a disposición gran cantidad de equipos para diversos propósitos y con variadas características: Audio-alarmas, alarmas visuales, medidores de los porcentajes de gases presentes, medidores y detectores de las concentraciones críticas de explosión del metano, etc. Los equipos más utilizados son precisamente éstos últimos, obviamente por lo peligroso de estas circunstancias.

El límite mínimo de explosibilidad (LEL)\* es la más baja concentración de metano que ocasionará la explosión y en el que éste mantendrá la propagación de la flama una vez que se produzca la ignición por alguna fuente. Este límite inferior es aproximadamente el 5% de gas metano por volumen de aire; el rango de explosibilidad se encuentra entre el 5% y el 15% por volumen de aire. Es decir, las concentraciones de metano por arriba del 15% evitarán la explosión de este gas, mas no la ignición del mismo.

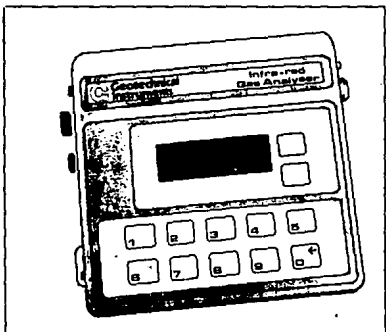
El equipo utilizado para las mediciones del LEL es diverso, entre los más prácticos se encuentra el analizador de gas a base de rayos infra-rojos (ver figura 5.2.12). En este dispositivo se proyecta un rayo infra-rojo a través de la muestra de gas por medio de una ventana de zafiro. Del otro lado de la cámara de análisis, este rayo es percibido por cuatro detectores: dos para metano, uno para dióxido de carbono y otro para checar la calibración del aparato.

Un microprocesador calcula la cantidad de luz infra-roja absorbida en diferentes longitudes de onda y determina los niveles de concentración de los gases presentes. Las lecturas de estas concentraciones son mostradas sobre la pantalla de cristal líquido del aparato como un porcentaje de la concentración

\* Lower Explosive Limit.

de los gases en volumen. Así, las más bajas concentraciones de metano son expresadas en términos del LEL.

FIGURA 5.2.12.



Las concentraciones de oxígeno en las muestras son medidas utilizando el principio de la Celda Galvánica. Las moléculas de oxígeno se difunden a través de una membrana de teflón dentro de la celda, en la cual está un electrodo de oro. Las moléculas son reducidas y entonces, una corriente fluye entre el electrodo de oro y un segundo electrodo de plomo. Las mediciones resultantes vienen expresadas como voltajes, los cuales son proporcionales a las concentraciones de oxígeno.

Otros aparatos también cuentan con un sistema de tomografía para gases. En estos aparatos la muestra es analizada observando una serie de curvas, las cuales son desplegadas por el aparato; éstas representan una medida cualitativa de los componentes constitutivos de la muestra.

Todos estos dispositivos deben ser periódicamente checados y calibrados, utilizando una concentración de gas conocida. Existen otros equipos que incluyen tubos calibrados para detectar la presencia de distintos gases. Estos tubos contienen productos químicos que se colorean de acuerdo a la exposición. -

La lentitud de la coloración de estos químicos es la que define la concentración del gas.

Al igual que con el monitoreo del lixiviado, la frecuencia del monitoreo del biogas se debe determinar mediante la evaluación del desarrollo operativo del relleno y con base a las circunstancias de concentración crítica del metano. Con esto, se puede llevar a cabo un programa de monitoreo bien estructurado que presente principalmente las siguientes características:

- Que sea sistemático y regular (basado en rangos de generación de biogas).
- Sustentado en las características del suelo y del material de cubierta, así como de la infraestructura de control (ductos de ventilación) y el tratamiento del biogas.
- Planeado de acuerdo a la proximidad y condiciones de las estructuras cerradas.
- Intensificado si las concentraciones de metano alcanzan un rango crítico.

### 5.3. COSTOS.

Los costos por el aprovisionamiento de la infraestructura adecuada para llevar a cabo la disposición final de los desechos, varían de acuerdo a las necesidades requeridas para tal efecto. A medida que las prácticas de disposición llegan a ser más complejas, los costos se incrementan; sobre todo cuando se incluyen dentro del sistema de disposición, el control y tratamiento de lixiviado y biogas.

En general, para realizar un presupuesto aproximado del establecimiento de un relleno sanitario como sistema de disposición, se deben de tomar en cuenta el costo de los elementos de cada una de las fases, las cuales incluyen lo siguiente:

#### a) ESTUDIOS PRELIMINARES DE EVALUACION.

- Caracterización del subsuelo del sitio propuesto.
- Estudios de impacto ambiental.
- Levantamientos topográficos.
- Investigación geohidrológica.
- Servicios profesionales.
- Asesoría legal.

#### b) CONSTRUCCION.

- Limpieza del terreno.
- Excavación y/o rellenos.
- Impermeabilización del sitio.
- Instalación de sistema de captación de lixiviado y control de biogas.
- Control de agua superficial.
- Construcción de sistemas de monitoreo.
- Caminos de acceso.
- Infraestructura periférica y de control de acceso.

#### c) OPERACION.

- Equipo y personal.
- Material de cubierta ( adquisición ).
- Mantenimiento general.

- monitoreo.
- Adquisición de equipo de seguridad, papelería y mobiliario.

d) FASE CLAUSURA Y POSCLAUSURA.

- Acabado o detallado de la cubierta final.
- Monitoreo.
- Mantenimiento general.
- Manejo de lixiviado y biogas.
- Infraestructura complementaria para acondicionamiento o rehabilitación del sitio.

De acuerdo con lo anterior, los gastos a realizarse en cada una de las fases de un relleno sanitario están muy bien diferenciados. Para las dos primeras fases (fases de estudios preliminares y de construcción), los gastos son específicos y sin variaciones significativas; éstos pueden determinarse con mucha aproximación por medio de las cotizaciones de los materiales y equipo requerido o por los conceptos de unidad de obra y estudios. En cambio, en las fases de operación y posclausura es más difícil pre-establecer los gastos debido a que en éstas están involucrados muchos factores y diversas circunstancias bajo las cuales se realizan. Por ejemplo, en la práctica, la operación del relleno puede resultar más costosa de lo calculado, si ésta no se lleva a cabo adecuadamente (en el enfoque teórico que se está manejando). Análogamente, en la posclausura, pueden incrementarse los costos en los conceptos de mantenimiento y monitoreo si es que la rehabilitación del sitio es deficiente.

La experiencia operativa en rellenos sanitarios de Estados Unidos\* ha mostrado que los principales factores que puedan disminuir significativamente el costo de operación anual son principalmente, el grado de compactación máxima que se pueda aplicar en el confinamiento de los desechos y la eficiente organización o planeación de la operación de la maquinaria y el equipo para optimizar recursos.

Como en la mayoría de las obras públicas, hay dos aspectos a considerar dentro de la proyección financiera o el análisis de costos de un relleno sanitario: el gasto por inversión y el gasto por operación. Las características del sitio seleccionado para el confinamiento de desechos indudablemente tras-

\*Se hace referencia a este País porque de él son las fuentes de información respecto a la operación de estos sitios de confinamiento de desechos, que operan como rellenos sanitarios en el sentido estricto del concepto estudiado.



ciende en todos los aspectos de cada una de las fases de un relleno sanitario y se refleja, en forma muy marcada, en la construcción y operación del mismo.

En las siguientes tablas se presentan los costos de los requerimientos básicos para la preparación del sitio de disposición de desechos (tabla 5.3.1) y los costos por la construcción y operación de las celdas (tabla 5.3.2). Los valores que se muestran en dichas tablas, corresponden a los conceptos mínimos necesarios para preparar y operar el sitio durante el primer año de la vida útil del relleno sanitario del ejemplo que estamos desarrollando.

TABLA 5.3.1.

CONCEPTOS	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD REQUERIDA	IMPORTE
<b>* MATERIALES:</b>		( N\$ )		( N\$ )
LIMO ARENOSO	m <sup>3</sup>	12.00	11899.20	142,790.40
ARCILLA	m <sup>3</sup>	7.57	5860.80	44,366.25
ESPUMA DE BASALTO	m <sup>3</sup>	9.30	74592.00	693,705.60
GRAVA (3/4")	m <sup>3</sup>	12.30	1387.52	17,066.49
ARENA	m <sup>3</sup>	11.25	114048.00	1,283,040.00
TUBO PVC (15 cm Ø)	m	12.90	720.00	9288.00
TUBO PVC (10 cm Ø)	m	11.55	7952.00	91449.00
GEOMEMBRANA SINTETICA	m <sup>2</sup>	22.00	760328.00	16727216.00
GEOTEXTIL	m <sup>2</sup>	12.00	17760.00	213120.00
<b>* EQUIPO:</b>				
TRACTOR D-8	mes	6187.00	4	24748.00
RETROEXCAVADORA POCLAIN	mes	14000.00	4	56000.00
COMPACTADOR 10/30	mes	11200.00	4	44800.00

Los costos registrados en la tabla anterior son los que resultan de la -- preparación del sitio de confinamiento, al que le hemos llamado "módulo de con-- finamiento de desechos", éste con área suficiente para 14 meses de operación; en donde se incluye la construcción de caminos internos, bermas de apoyo ini-- cial, sistema de control de lixiviados (capa impermeabilizante y ductos de co-- lección) y canales para el drenaje de aguas pluviales. El costo de los materia-- les de banco incluye el transporte del mismo; y el costo del resto de los mate--

riales incluye los gastos de instalación. Los precios unitarios del equipo son resultado del arrendamiento de éste, en los que se incluye los costos de operación y mantenimiento.

TABLA 5.3.2.

C O N C E P T O	UNIDAD	P. U. (M\$)	CANTIDAD REQUERIDA	IMPORTE (M\$)
* MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN:	M3/MES	12.00	59,954.891	719,458.64
				719,458.64
* RENTA DE MAQUINARIA:				
- Bulldozer de orugas D-8	PZA/MES	18,300.00	12	219,600.00
- Compactadora	PZA/MES	11,938.00	4	47,752.00
- Retroexcavadora	PZA/MES	12,900.00	1	12,900.00
- Pipes	PZA/MES	5,152.80	2	10,305.60
- Bombas	PZA/MES	552.00	1	552.00
- Hidrolavadora	PZA/MES	8,740.00	1	8,740.00
- Compresoras	PZA/MES	455.00	1	455.00
- Aspersora	PZA/MES	110.56		110.56
Subtotal				300,615.76
* INGRESOS HUMANOS:				
- Jefe de operación	MES	2,300.00	1	2,300.00
- Encargado de frente de trabajo	MES	1,720.00	4	6,880.00
- Supervisores	MES	1,615.00	4	6,460.00
- Peones	MES	634.25	10	6,342.50
- Operadores	MES	1,816.75	19	34,318.25
- Chofer	MES	1,615.00	2	3,230.00
Subtotal				59,730.75
* EQUIPO DE SEGURIDAD**:				
- Uniformes	PZA/AÑO	70.00	90	6,300.00
- Mascarellas	PZA/AÑO	50.00	60	3,000.00
- Filtros	PZA/AÑO	5.00	3,000	1,500.00
- Guantes	PZA/AÑO	10.00	300	3,000.00
- Botas	PZA/AÑO	80.00	90	7,200.00
Subtotal				21,000.00
TOTAL (M\$/MES): 1'079,605.15		TOTAL (M\$/AÑO): 12'976,261.8		

Costos por la operación de un módulo de confinamiento de desechos. \*\*La adquisición del equipo y material de seguridad se realiza dos veces por año; debido a ésto; no se considera en el total mensual.

En los costos de operación, como puede observarse en la tabla anterior, - no se incluyen los conceptos correspondientes al mantenimiento y a el monitoreo del relleno, los cuales pueden elevar el costo de operación en un 20 % más. El costo total por operación, como ya se ha indicado, puede aumentar significativamente si no se lleva a cabo una correcta planeación y optimización de -- los recursos.

La tabla 5.3.3 presenta un resumen de costos por los conceptos de construcción y operación por cada módulo de confinamiento o, visto de otra manera, por cada año de operación. Tan sólo en el confinamiento de desechos se erogaron N\$ 34'035,164,60; convirtiendo este costo "anual" en un costo por día de operación y dividiendo éste último por la cantidad de desechos que son confinados (en la jornada de operación), obtenemos que el costo por el simple confinamiento de desechos en las celdas de nuestro ejemplo resulta ser de N\$ 11.66 por tonelada por día.

TABLA 5.3.3.

C O N C E P T O	IMPORTE ( N\$ )
• Preparación del sitio	19'347,986.36
• Material de cubierta	8'633,503.68
• Renta de maquinaria	300,415.76
• Recursos Humanos	59,730.75
• Equipo de seguridad	21,000.00
• Mantenimiento y monitoreo	5'672,527.43
<b>TOTAL</b>	<b>34'035,164.6</b>

Ahora, considerando el costo total de la tabla anterior y la población -- del Distrito Federal (aproximadamente de 10 millones de habitantes), resulta que cada habitante de esta ciudad paga, sólo por la disposición de los desechos, alrededor de N\$ 3.4 al día.

Estas cifras que hemos calculado sólo representan una idea de los gastos que se realizan para poder disponer de la gran cantidad de desechos generados; además, puede apreciarse también, el ahorro que resultaría por adoptar buenos hábitos de reciclaje y aprovechamiento de desechos; contribuyendo con esto, a la protección del ambiente.

## CAPITULO VI. DESTINO FINAL DEL RELLENO SANITARIO.

Como es de esperarse, el confinamiento de desechos sólidos en un relleno sanitario implica la ocupación de muchas hectáreas de terreno y la modificación de la topografía del mismo. Aunado a esto, están presentes también los efectos sobre el medio socio-económico de la población, el sistema ecológico y en general, del medio ambiente que circunda al sitio de confinamiento.

Definitivamente estos espacios deben ser rehabilitados y aprovechados una vez que éstos han sido saturados con los desechos y se ha ordenado la clausura o cierre del relleno sanitario. Para llevar a cabo estos propósitos se debe acondicionar e incorporar la infraestructura requida para que estos sitios sean integrados al entorno urbano habilitándose principalmente como parques de recreo, deportivos y áreas forestales.

El uso final de un relleno sanitario debe estar contemplado y definido en el diseño general del mismo. Así mismo deben estar incluidos para esta fase, los programas de control y monitoreo de lixiviado y biogas; así como los programas de mantenimiento que hagan funcional y seguro el desempeño del sitio rehabilitado.

En este capítulo comentaremos alguna generalidades de los criterios básicos para la proyección del destino final de los sitios, que han sido ocupados para el confinamiento de desechos, en la fase de posclausura de un relleno sanitario.

### 6.1. USO O DESTINO FINAL DEL RELLENO SANITARIO; GENERALIDADES.

El destino final del área de confinamiento de desechos de un relleno sanitario, que ha sido formalmente clausurado a la recepción de desechos, debe ser proyectado junto con el diseño general del relleno y así mismo considerado antes y durante el desarrollo de las fases de éste (construcción, operación y -- mantenimiento). Por razones claras, estas áreas que han sido ocupadas por desechos, no tienen la suficiente capacidad de carga y la adecuada estabilidad para soportar grandes estructuras. Aunado a esto, las características del manejo de lixiviado, y principalmente del biogas, trascienden significativamente en el resultado del análisis de factibilidad económica y técnica en los proyectos sobre el destino final de estos sitios de disposición de desechos.

Los usos compatibles con las características del área de confinamiento de un relleno sanitario, que pueden sugerirse son los siguientes:

- AREAS VERDES DE RECREO. Son convenientes e impactan políticamente cuando los sitios de confinamiento de desechos se encuentran cercanos a la zona urbana y en donde las áreas verdes no existen o son escasas. Como ejemplo de estas áreas se pueden citar los campos de golf, parques y jardines, áreas forestales, deportivos y jardines botánicos.
- AREAS AGRICOLAS. El área de un relleno puede ser convertida en zona de pastizales y, en circunstancias muy particulares, en sitios de cultivo. Para lo anterior se requiere de mejores características impermeables de la capa final de cubierta, así como mayor espesor de la misma e incluir a ésta una capa de suelo vegetal.
- AREAS DE SERVICIOS PUBLICOS. En este tipo de áreas se incluyen principalmente los estacionamientos, plazas de comercio semifijo y centros de acopio de desechos reciclables. Para lo anterior se recomiendan estructuras muy ligeras, de una sola planta y preferentemente del tipo desmontable.

Para la elección de cualquiera de los usos indicados se deben considerar factores tales como, la zonificación estatal del suelo (uso del suelo), la densidad de población y lo más importante, las características de la infraestructura requerida, que pueda ser establecida sobre estos sitios.

Analizando lo anterior, se vislumbran los pros y los contras que deben -- evaluarse para decidir el destino final del sitio de confinamiento. Así mismo, resulta útil proponerse, para llevar a cabo una acertada elección del uso futuro del sitio, los siguientes objetivos:

- Minimizar las necesidades de mantenimiento.
- Reducir la producción y emisión tanto de lixiviado como de biogas.
- Cumplir con las normas de salud, ambientales y ecológicas vigentes.
- Rehabilitar o incorporar al entorno urbano y ambiental los sitios afectados.

Cuando se ha logrado definir que destino final es más conveniente y adecuado a las características del sitio y de acuerdo a las necesidades de la población y del sitio mismo, deben ser previstos en la etapa final de operación del relleno sanitario las siguientes acciones:

- Identificación de la topografía final del sitio.
- Preparación o acondicionamiento de los sistemas de drenaje.
- Fuentes específicas de material de cubierta adicional u otros materiales con características requeridas.
- Planeación y distribución de las áreas disponibles para los fines proyectados.
- Establecer la ingeniería requerida cuando se necesite desplantar estructuras sobre el sitio rehabilitado.
- Programación de las obras de acondicionamiento o de rehabilitación del sitio, para alcanzar los objetivos del proyecto.

#### CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE AREAS VERDES Y AREAS DE RECREO.

Debido a que la rehabilitación de los rellenos sanitarios como áreas verdes o zonas de recreo implica menores costos de acondicionamiento y de operación, las tendencias de elección de este tipo de áreas como destino final se hacen más presentes; aún más, por las siguientes ventajas:

- \* Las especies vegetales tienen la propiedad de absorber ciertos gases nocivos. Por sus funciones naturales, éstas actúan como filtros de polvo y partículas sucias, limpiando el aire de impurezas.

- \* El consumo de agua y el aumento de la evapotranspiración debido a las plantas reduce la generación de lixiviado y biogas.
- \* La plantación de especies vegetales es una medida efectiva de controlar la erosión y la dispersión de partículas de polvo (tolvaneras).
- \* La vegetación modifica las condiciones del clima, amortiguan la lluvia, el viento y el granizo; éstas actúan como regulador del clima a través de la obstrucción parcial de la radiación solar.
- \* La vegetación atenúa o reduce el ruido debido a que éstas absorben, desvían, reflejan y refractan las ondas sonoras. Estos efectos varían de acuerdo a la distancia entre la fuente y los elementos que forman la barrera vegetal ante el receptor.
- \* Con una adecuada distribución de los espacios, la vegetación puede utilizarse para crear sistemas de circulación y para la delimitación de áreas.

De acuerdo a lo anterior, en la integración de las áreas verdes, lo más importante que esta tarea representa, es la plantación de vegetación adecuada a la calidad del suelo del sitio, considerando el efecto de las plantas y, más que nada, la función que éstas van a desempeñar. Con esto, está claro que para que las especies vegetales seleccionadas para rehabilitar el sitio puedan ofrecer las ventajas enlistadas anteriormente, éstas deben presentar principalmente las siguientes características:

- Ser nativas de la región.
- Constituidas por raíces superficiales.
- De rápido crecimiento.
- Resistentes a la contaminación.
- Con gran capacidad de absorción de agua.
- Robustas y con denso follaje.

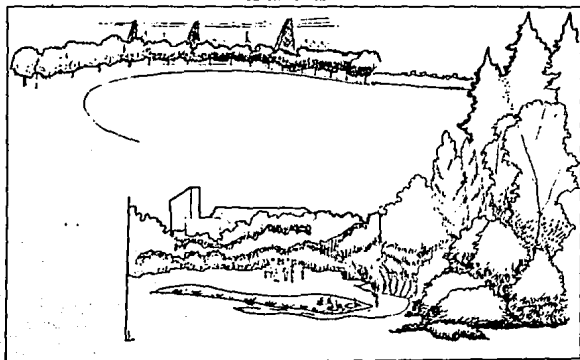
Por otro lado, el suelo que sustentará a la vegetación debe tener propiedades específicas de salinidad, materia orgánica, pH y, entre otras cosas, cantidades adecuadas de fósforo y potasio. El pH de un suelo apto para la vegetación debe estar en un rango entre 5 y 8; si el pH es superior a 8, los elementos necesarios para que una planta crezca pueden no ser solubles. Un pH menor a 5 puede ser tóxico para algunas especies. En general, el pH de un suelo de

be ser alrededor de 6.5. Un suelo ácido puede ser ajustado agregándole cal.

Hablando de nutrientes, los tres principales, necesarios para el crecimiento óptimo de las plantas son: Nitrógeno, fósforo y potasio (N,P,K); la cantidad de éstos debe ser agregada de acuerdo a los resultados de los análisis de los suelos y a la densidad y tipo de especies requeridas.

**CORTINA VEGETAL.** Independientemente de que el destino final del relleno sanitario sea proyectado como un área verde, la cortina vegetal es un elemento importante que se debe incluir en estos sitios (siempre y cuando las condiciones del terreno sean favorables) desde los primeros días de operación. La cortina o barrera vegetal es necesaria para filtrar la visión de un objeto, elemento o área indeseada; así como para bloquear o desviar las emisiones de polvo, ruido y olores desagradables. Esto se logra con una barrera densa de árboles y arbustos (ver figura 6.1.1.). Para poder tener una barrera vegetal constante todo el año y ornamentalmente estética, deben plantarse árboles perennes alternando con caducos. Algunas de las especies más comunes para este efecto pueden observarse en la tabla 6.1.2.

FIGURA 6.1.1.



Aspecto de la cortina vegetal. Como puede observarse en la parte inferior, mientras más densa sea ésta, mejor funcionará para los objetivos buscados.



TABLA 6.1.2.

ESTRATO	NOMBRE COMUN	NOMBRE CIENTIFICO	CRECIMIENTO PROMEDIO (m)
ARBOLES	* Alamo carolina	<u>Populus sp.</u>	6 - 7
	** Ciprés	<u>Cupressus sp.</u>	8
	* Fresno	<u>Fraxinus udhei</u>	10
	** Hule	<u>Ficus elastica</u>	5
	** Laurel de la India	<u>Ficus indica</u>	5
	** Liquidambar	<u>Liquidambar styraciflua</u>	6 - 7
	** Olmo	<u>Ulmus parvifolia</u>	6 - 8
	** Pino enano	<u>Pinus sp.</u>	5 - 6
	** Sauce llorón	<u>Salix babylonica</u>	6 - 12
	* Trueno	<u>Ligustrum japonicum</u>	14
	* Junípero	<u>Juniperus flaccida</u>	10
	** Yuca	<u>Yucca elephantipes</u>	5

Especies propuestas para formar la cortina vegetal. \*Especies perennes (con hojas todo el año) - \*\*especies caducas (sin hojas en cierta temporada del año).<sup>1</sup>

**PLANTACION DE PASTOS.** Debido a las condiciones mínimas de humedad que se deben conservar en los sitios rehabilitados, se sugiere la plantación de especies vegetales que no necesiten riego constante, tal como los pastos "Rye grass" y "Carret grass" que son resistentes a las épocas de estiaje. Otras especies -- que también son recomendadas, además por su resistencia a la salinidad, son -- los pastos salados Distichlis spicata, Eragrostis obtusiflora y Bouchloe dactyloides.

La plantación de pastos es necesaria debido a la imagen estética requerida para los sitios rehabilitados (que esta vegetación proporciona), principalmente por los efectos físicos causados al suelo donde es plantada; y por la mayor cobertura que se puede llegar a alcanzar, los pastizales son muy eficientes para controlar la erosión y las tolvaneras.

**ARBUSTOS ORNAMENTALES.** Los arbustos que tienen una altura entre 0.45 y 2.4 m, se utilizan para crear sistemas de circulación y para la distribución de espacios. Este tipo de plantas ofrecen un efecto estético y decorativo, aunque requieren de mayor cuidado. Por esto, es común que se les coloque en jardineras para tener mayor control de éstas. En las tablas 6.1.3 y 6.1.4 se encuentran algunas de las especies más recomendadas.

<sup>1</sup>Manual de planeación, diseño y manejo de las áreas verdes urbanas en el D.F., D.D.F., D.G.S.U.

TABLA 6.1.3.

ESTRATO	NOMBRE COMUN	NOMBRE CIENTIFICO	CRECIMIENTO PROMEDIO (m)
SETOS Y ARBUSTOS.	• Arrayan	<u>Buxus sempervirens</u>	0.8
	• Escobillón	<u>Callistemon</u> sp.	5.0
	• Piracanto	<u>Pyracantha coccinea</u>	1.4
	• Rosa laurel	<u>Nerium oleander</u>	2.0
	• Trueno seto	<u>Ligustrum japonicum</u>	1.4
	• Junipero	<u>Juniperus monticola</u>	1.7

Setos y arbustos utilizados para la división de espacios y la creación de sistemas de circulación<sup>2</sup>

TABLA 6.1.4.

ESTRATO	NOMBRE COMUN	NOMBRE CIENTIFICO	CRECIMIENTO PROMEDIO (m)
ORNAMENTALES	Agapardos blancos	-----	0.5
	Aguja	-----	0.4
	Azalea	<u>Azalea indica</u>	1.1
	Conchitas (o echeveria)	<u>Echeveria secunda</u>	0.3 - 0.9
	Dalias	<u>Dahlia coccinea</u>	0.4 - 1.5
	Equinocactus	<u>Echinocactus</u> sp.	0.3 - 0.4
	Geranio	<u>Geranium</u> sp.	0.3 - 0.9
	Hierba negra	-----	0.4
	Hagüey amarillo	<u>Agave</u> sp.	1.3
	Margarita blanca	<u>Chrysanthemum coronarium</u>	0.8
	Malvón	<u>Pelargonium zonale</u>	0.4 - 0.5
	Organo	<u>Pachycereus marginatus</u>	0.8 - 2.0
	Petunias blancas y rojas	<u>Petunia</u> sp.	0.4
	Planta jade	-----	0.4
	Planta panda	-----	0.3
	Plumas de las pampas	-----	0.8 - 1.3
	Sagittaria	<u>Sagittaria</u> sp.	0.5
	Salvia roja	<u>Salvia leucantha</u>	1.0
	Sedum	<u>Sedum</u> sp.	0.3
	Siempre viva	<u>Echeveria mucronata</u>	0.3 - 1.0
Tulia	<u>Thuja</u> sp.	1.5	
Verónica	<u>Veronica</u>	0.4	
Zacatón con hojas	-----	0.7	
Zabilla	<u>Aloe vera</u>	0.6	

Especies de ornamento para jardineras propuestas para la imagen estética y decorativa del sitio<sup>3</sup>, rehabilitado.

<sup>2</sup> ibidem.

<sup>3</sup> ibidem.

INFRAESTRUCTURA ADICIONAL. Si el área verde es acondicionada además como parque recreativo, se debe habilitar con palapas, juegos infantiles, aparatos de gimnasia y acondicionamiento físico, bancas de lectura, canchas deportivas y servicios públicos. Por supuesto, utilizando para lo antes mencionado estructuras ligeras. Por otro lado, si el área verde se utiliza como reserva ecológica, entonces, la infraestructura requerida es mínima.

Todo lo anterior estará en función de los alcances del proyecto, de acuerdo a las dimensiones y características del mismo, lo que también va a definir los costos de operación y mantenimiento.

Además de las ventajas de rehabilitar un relleno sanitario como área verde o parque recreativo, cabe señalar que una de las ventajas más consideradas por las autoridades o dependencias encargadas del manejo de desechos, es el impacto político que estos sitios adquieren, ya que representan una medida de control o de rehabilitación del ambiente y un desahogo a las necesidades de recreo de la población que circunda los sitios rehabilitados, en los que se toma muy en cuenta para su diseño el rango de influencia de éstos o la población beneficiada.

## CONCLUSIONES.

Desde el punto de vista de la Ingeniería Civil, un relleno sanitario debe reunir principalmente dos características significativamente importantes: - La estabilidad estructural del conjunto de celdas que lo forman, durante la etapa constructiva y las etapas posteriores a ésta, y un margen de protección ambiental satisfactorio en la construcción y operación del relleno. Es decir, -- por un lado se deben adecuar todos los elementos básicos ( técnicas, materiales y equipo ) para llevar a cabo una obra de confinamiento de desechos estructuralmente segura, que requiera de mínimo mantenimiento y que sea compatible con las necesidades de disposición de los desechos de determinada localidad o población; y por otro, se deben establecer las técnicas y los materiales adecuados, para evitar, mediante un eficiente sistema de impermeabilización, que la producción de contaminantes líquidos (lixiviados) presente en el interior de las celdas de confinamiento alcance, a corto o a largo plazo, las corrientes y depósitos de aguas subterráneas, que en la mayoría de los casos son fuente de abastecimiento de este líquido, los cuales representan con esto, focos potenciales de enfermedades. Con esto último se ve que el objetivo esencial de un relleno sanitario, es reducir los efectos negativos que implica el confinamiento de desechos tales como, el mal olor, la imagen desagradable, la proliferación de fauna nociva, los riesgos de incendio ocasionados por la generación de Metano dentro del relleno y, entre otras cosas, los asentamientos irregulares de población ( en su mayoría dedicada a la pepena ) dentro de las áreas de tiro de desechos.

Un relleno sanitario, tal como se ha conceptualizado, es una de las alternativas de disposición de desechos más apropiadas para las posibilidades de -- países como el nuestro; ya que debido al evidente peligro de contaminación del aire, agua y tierra que representa la disposición inadecuada de los desechos -- que diariamente genera la población de una localidad, surge la necesidad de -- disponer de estos desechos en forma segura y conveniente y, con la reciente -- aprobación de las Normas Técnicas Ecológicas que regulan los aspectos de proyección ( elección del sitio, diseño, construcción y operación ) de un relleno sanitario para la disposición de desechos sólidos municipales, aumenta la posibilidad de que este tipo de obras se realicen de la manera más segura y acorde

con los lineamientos establecidos en dicha norma. Sin embargo, se tienen que - invertir más recursos para poder cumplir con estos lineamientos, por lo que el costo de un relleno sanitario, con la magnitud de desechos que actualmente estamos generando, es alto. Así, aunque la disposición de desechos municipales - en estos sitios de confinamiento es una de las alternativas más accesibles, ésta no resulta económica; en suma, con las disposiciones ecológicas, los costos de construcción y de operación de un relleno pueden resultar desalentantes; -- aunque si se llevara a cabo un balance sobre el costo-beneficio de la disposición de desechos bajo este método, este balance resultaría favorable, ya que, - sin tomar en cuenta el beneficio ecológico y de salud del ambiente y de la población respectivamente, el ahorro de gastos por saneamiento, rehabilitación e indemnización son significativos. Por otro lado, para resolver los inconvenientes de alto costo, se puede integrar todo un sistema de disposición de desechos que incluya programas de reciclaje, tratamiento y composteo de los mismos; reforzado con intensas campañas de concientización, información y participación hacia la población local. El objetivo de estas acciones es reducir el volumen de desechos que llega a los rellenos sanitarios para su confinamiento. Como un - ejemplo de esta estrategia, podemos señalar la política de Japón en materia de desechos sólidos, el cual obtiene ventajas de una fracción (la mayor) de sus desechos mediante el reciclaje y composteo de los mismos; y utiliza el relleno - sanitario para disponer de la fracción restante. Lo anterior reduce significativamente el costo del manejo de desechos y aumenta el reaprovechamiento y ahorro de recursos.

Es necesario aclarar también, que en nuestro país actualmente los porcentajes de reciclaje, y por mucho más los del composteo, son insignificantes comparado con las cantidades de desechos que son confinados. Este problema es muy - serio y es debido, por un lado, a la falta de concientización de la población para cooperar separando los desechos desde las principales fuentes de generación (domicilios, comercios y áreas de trabajo), y por otro, a la poca disponibilidad de recursos por parte del Estado para constituir la infraestructura requerida para el reciclaje y el tratamiento de desechos. A pesar de lo anterior, con la idea en mente del reciclaje, se han estudiado numerosas alternativas para aumentar los porcentajes de esta actividad; algunas de éstas como la de dele-

gar la responsabilidad de recolectar y/o dar tratamiento de desechos a las compañías cuyos productos forman parte importante de las principales fuentes de generación de desechos; construir diversas plantas de selección de desechos; - implantar programas de reciclaje mediante centros de acopio o módulos de recepción de desechos potencialmente reciclables (aluminio, vidrio, papel, cartón y metales ferrosos), en los cuales a través de un incentivo a cambio, se reciben de la población de una determinada área de afluencia, desechos reciclables previamente separados por ésta. Junto con estas acciones se pueden ir incorporando programas más ambiciosos de reciclaje o reaprovechamiento de desechos, - que reduzcan la gran cantidad de espacio que actualmente se está ocupando para el confinamiento de desechos, lo que a su vez disminuirá los efectos nocivos - al ambiente y saneará la economía de la localidad.

En el ejemplo de aplicación de los conceptos y criterios para el diseño, - construcción y operación de un relleno sanitario (las celdas de confinamiento en la Zona de Bordo Poniente) se pudo apreciar en primer instancia que resultan las características naturales del suelo para poder seleccionar el sitio de confinamiento y, dado este paso, el establecimiento de la infraestructura necesaria para el adecuado funcionamiento de la obra y en donde se cumplan con los requisitos de las normas correspondientes. En el ejemplo desarrollado, los --- principales problemas a resolver son la gran compresibilidad del suelo y la cercanía con la superficie del nivel de aguas freáticas. Para el primer caso, se pueden mitigar los problemas del asentamiento irregular del terreno mediante una adecuada programación y distribución de las áreas de carga. El segundo problema es resuelto mediante un sistema de impermeabilización, localizado en la base de las celdas de confinamiento, utilizando una geomembrana de polietileno de alta densidad, de 2 mm de espesor.

Ahora, con respecto a la situación actual del relleno sanitario de Bordo-Poniente, es necesario señalar que éste inició operaciones en 1983 como tiradero de basura (de la misma manera que los rellenos de Santa Catarina y Prados de la Montaña, en diferentes fechas), época en la que no existía normatividad al respecto. Gradualmente se han venido elaborando normas para la disposición de desechos sólidos, que se han incorporado en lo posible a esta obra. Sin embargo, bajo las leyes vigentes, el sitio de Bordo Poniente no satisface algu--

nas de las condiciones de las normas actuales como son: la inestabilidad del suelo debida a su baja capacidad de carga y su gran deformabilidad; la cercanía con corrientes superficiales de agua (Río Churubusco y Prolongación Río de la Compañía), zonas habitacionales y escolares (Col. del Lago, Bosques de Aragón, Prados de Aragón, E.N.E.P. Aragón), así como con instalaciones de gran importancia social y económica de la Ciudad de México, como lo son el Parque recreativo Alameda Oriente, el Aeropuerto Internacional Benito Juárez y la Planta de Bombeo de aguas residuales y pluviales "Churubusco-Lago".

Bordo Poniente es el primer relleno sanitario del País, por esto, las estimaciones ambientales de la posclausura de este relleno son inciertas debido a la falta de experiencia previa, que aunado al posible abandono de las autoridades del Departamento del Distrito Federal una vez clausurado, podrían presentarse serios problemas ambientales que repercutiría en la población vecina, o en el menor de los efectos, en el gasto público por conservación y rehabilitación del ambiente del Lago de Texcoco, en el que existen especies vegetales y animales en peligro extinción.

Vale la pena comentar que el relleno de "Bordo Poniente", es el único -- del País que no es supervisado por la Secretaría de Desarrollo Social (dependencia encargada de la seguridad ambiental y ecológica), por lo que para que se lleven a cabo los lineamientos establecidos en materia ambiental y la sociedad tenga credibilidad sobre los resultados en la disposición de desechos en este relleno, se requiere que esa dependencia intervenga en las actividades -- que el Departamento del Distrito Federal realiza para el confinamiento de los desechos sólidos municipales.

Por otro lado, para tener un control adecuado de este relleno, es necesario y conveniente llevar a cabo no sólo estudios de carácter ambiental y geohidrológico de la zona, sino profundizar y actualizar los estudios del comportamiento del suelo de la misma, tener registro de los efectos físicos ocasionados por la carga y la degradación de los desechos mediante el uso de bancos de nivel fijos que permitan obtener información que pueda ser utilizada en las investigaciones que ayuden a mejorar, a cambiar o crear nuevos procedimientos de construcción y de operación, que, junto con intensos programas de monitoreo, -- reduzcan los riesgos de contaminación y los daños a la geomorfología del sitio.

## B I B L I O G R A F I A

- Asociación Mexicana para el Control de Residuos Sólidos Peligrosos, A.C. Congreso de residuos sólidos peligrosos, ¿ recursos o desperdicio ?, AMCRESPAC, 1991.
- Association of State and Territorial Solid Waste Management Officials. National Solid Waste Forum on Integrated Municipal Waste Management, USA, 1991.
- Baghchi Amalendo. Design, Construction and Monitoring of Landfill. John Wiley & Sons, 1990.
- Baud G. Tecnología de la Construcción. Traducción de Adrián Margarit; Edit Blume, España, 1977.
- Chow V. T. Manual de hidrología aplicada. McGraw Hill, 1984.
- Columbr. Aferro Experimental de Lixo Rio de Janeiro, 1978.
- Consejo Nacional de la Población. Proyecciones de la población de la Cd. de México y de las Entidades Federativas. C.N.P., 1990.
- Departamento del Distrito Federal. Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria; D.F., 1992.
- Departamento del Distrito Federal, Secretaría de la Defensa Nacional. Reunión del Control Ambiental; 1989.
- Dirección General de Estadística. X Censo de Población y Vivienda; S.P.P. 1986.
- Dirección Técnica de Desechos Sólidos. Proyecto Ejecutivo del Relleno Sanitario Prados de la Montaña. D.D.F., 1987.
- Dirección Técnica de Desechos Sólidos. Análisis de Impacto ambiental de Desechos Sólidos en el área de Bordo Poniente. D.D.F., 1988.
- Facultad de Ingeniería. Congreso de Residuos Sólidos Peligrosos. División de Educación Continua, UNAM, 1992.
- Foree E.G. and Gok E. Aerobic Biological Stabilization of Sanitary Landfill - Lecheate. Department of Civil Engineering, University of Kentucky, 1972.
- Foree E. and Young J. Design Guide for Sanitary Landfill. IOWA State University, 1973.
- Geoproductos Mexicanos. Catálogo de Especificaciones del Sistema Void-Clay. Geoproductos Mexicanos, S.A. de C.V., 1992.
- Howard S. Peavy, Rowe R. Donald. Environmental Engineering. McGraw Hill.
- Instituto Nacional de Geografía e Informática. Anuario Estadístico, Distrito Federal. INEGI, 1990.



- Instituto Nacional de Geografía e Informática. XI Censo General de Población y Vivienda. INEGI, 1990.
- Juárez Badillo y Rico Rodríguez. Mecánica de Suelos. Tomo I, Limusa, 1989.
- Juárez Badillo y Rico Rodríguez. Mecánica de Suelos. Tomo II, Limusa, 1989.
- Juárez Badillo y Rico Rodríguez. Mecánica de Suelos. Tomo III, Limusa, 1989.
- Mandujano A. Ma. Isabel. Biogas, Energía y Fertilizante a partir de desechos orgánicos. OLADE, Serie de publicaciones especiales, 1981.
- Martínez Ramos S., alvaréz Chávez M. C. Evaluación de la Producción de Lixiviados en el relleno sanitario Prados de la Montaña. Proyecto Terminal de Ingeniería Ambiental. UAM., 1992.
- Matfáz Santiago Rosendo. Estudio geotécnico en la E.N.E.P. Aragón. Tesis de Licenciatura, 1989.
- Merz R. and Stone R. Special studies of sanitary landfill. Department of Health, Education and Welfare. Washington, D.F., 1970.
- O'leary Philip R., Walsh W. Patrick. Managing Solid Waste. Scientific American, Volumen 259, No. 1, December 1988.
- Organización Mundial de la Salud. Situación Regional del Aseo Urbano, Programa Nacional de Salud Ambiental. Oficina Panamericana Sanitaria. Junio, 1991.
- Piskunov N. Cálculo diferencial e integral. Editorial MIR, 1982.
- Pollyner Pe. Catálogo de especificaciones de Geomembranas sintéticas.
- Porrás J. Martín. Aguas subterráneas. Cuadernos CIFCA, Madrid, 1978.
- Proyectos, Construcción y Estudios, S.A. de C.V. Proyecto de normas técnicas ecológicas para el manejo de residuos sólidos municipales en zonas marginales y métodos de análisis para el manejo de residuos sólidos peligrosos. SEDUE, 1988
- Proyectos, Desarrollo, Investigación y Tecnología Ambiental, S.A. de C.V. Proyecto de normas técnicas para la recolección, transporte, almacenamiento, manejo, tratamiento y disposición de desechos sólidos. Memoria Técnica, SEDUE, 1987.
- REMMSA, S.A. de C.V. Catálogo de especificaciones técnicas del XR-5.
- Secretaría de Desarrollo Social. Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. SEDESOL, 1993.

- Secretaría de Desarrollo Social. Norma Oficial Mexicana NOM-083-1994. SEDESOL, 1994.
- Secretaría de Desarrollo Social. Norma Oficial Mexicana NOM-084-1994. SEDESOL, 1994.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. Control de la contaminación por residuos sólidos municipales e industriales, SEDUE, 1988.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. Manual de procedimientos de muestreo de Desechos Sólidos, SEDUE, 1990.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. Manual para el manejo de desechos sólidos, SEDUE, 1990.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. Procedimiento para la elaboración y presentación de la manifestación de impacto ambiental.
- Sistema de Ingeniería Sanitaria, S. A. de C.V. Proyecto de normas técnicas ecológicas para el manejo de residuos sólidos municipales, SEDUE, 1988
- Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, A.C. VII Congreso Nacional de la Ingeniería Ambiental y la Salud, Oaxaca, Oax., 1990. 1992.
- Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, A.C. VIII Congreso Nacional. Acciones para un ambiente limpio, Cocoyoc, Morelos, 1992.
- Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria, A.C. VIII Manejo eficiente de residuos sólidos, Agosto, 1992.
- Stegmann R., Ehrig H. J. Leachate production and Quality-results of landfill processes and operation, 2a. International Symposium. SARDINA, 1989.
- Subdirección Ecológica. Curso sobre manejo y disposición final de los residuos sólidos municipales. Tomo I, SEDUE, 1984.
- Subdirección Ecológica. Curso sobre manejo y disposición final de los residuos sólidos municipales. Tomo II, SEDUE, 1984.
- Subsecretaría Ecológica. Manual de un relleno sanitario. SEDUE, 1984.
- SWANA. Course Manual for Manager of Landfill, Operation Training Course. Toronto, Ontario Canada, 1989.
- Tchobanoglous. Principles and Management Issues. Mc Graw Hill, 1977.

## HEMEROGRAFIA

- Centro Internacional de Formación en Ciencias Ambientales. Tres casos de impacto ambiental; CIFCA, Madrid, 1980.
- Dirección General de Servicios Urbanos. Acciones de la dirección General de - Servicios Urbanos; D.G.S.U, 1990.
- Dirección de Prevención y Control de la Contaminación. Evaluación de Impacto - Ambiental; DEGRUPE, 1987.
- Eliassen R. Decomposition of Landfill; American Journal of Public Health; v.32, no. 3, 1942.
- Instituto de Estudios de Administración local. Técnicas de Higiene Urbana; DDF, 1988.
- Instituto de Administración Pública. Manejo de los desechos sólidos, el caso - del Distrito Federal; INAP, enero-junio, 1988.
- O'leary Philip R., Walsh W. Patrick. Managing Solid Waste; Scientific American, Volume 259, no.1; December 1988.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. Gaceta Ecológica; SEDUE, jun-nov,- 1992.