

113



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO**
FACULTAD DE INGENIERIA

**"GENERACION, CONTROL Y TRATAMIENTO DE
BIOGAS Y LIXIVIADOS DE UN RELLENO
SANITARIO"**

**TESIS
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
PRESENTA:**

FERNANDO RAMIRO SALA

**DIRECTOR DE TESIS:
ING. MIGUEL ANGEL GONZALEZ LOPEZ**



MEXICO, D. F.

294760

2001

Completa



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

Señor **FERNANDO RAMIRO SALA,**
Presente .

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **Ing. Miguel Angel González López,** que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL.**

“GENERACIÓN, CONTROL Y TRATAMIENTO DE BIOGAS Y LIXIVIADOS DE UN RELLENO SANITARIO”

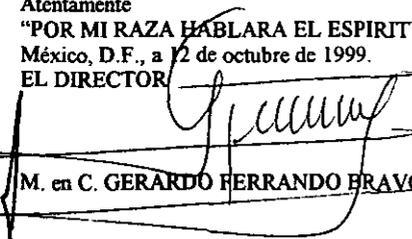
Introducción.

- I. Aspectos generales del diseño de un relleno sanitario.**
- II. Generación, composición y clasificación de los residuos sólidos en México.**
- III. Modelo de generación, control y tratamiento de biogas.**
- IV. Modelo de generación, control y tratamiento de lixiviados.**
- V. Impacto ambiental generado por los lixiviados y biogas de un relleno sanitario y medidas de mitigación.**

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

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

Atentamente
“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”
México, D.F., a 12 de octubre de 1999.
EL DIRECTOR


M. en C. GERARDO FERRANDO BRAVO

*A mis padres:
Lic. Laura Sala de Ramiro
e Ing. Emiliano Ramiro Lalana
y
a mi hermano:
Ing. Emilio Ramiro Sala*

*Por todo su apoyo incondicional durante mis estudios,
por su inmenso cariño y por todo lo que han hecho para
que pudiera terminar ésta tesis.*

Índice

Agradecimientos

Introducción

Capítulo 1. Aspectos Generales del Diseño de un Relleno Sanitario

Antecedentes.	1
I.1 Estudio demográfico	1
I.1.1 Datos censales	1
I.1.2 Proyecciones de Población con base en los datos censales	1
I.1.3 Dinámica del crecimiento demográfico	3
I.2 Estudio Topográfico	4
I.2.1 Desarrollo de los trabajos topográficos	4
I.2.2 Especificaciones y tolerancias	5
I.3 Estudio de generación de residuos sólidos	6
I.3.1 Determinación en fuentes domiciliarias	6
I.3.2 Metodología aplicada	6
I.3.3 Resultados	7
I.3.4 Análisis de resultados del estudio de generación en fuentes domiciliarias	7
I.3.5 Estudio de generación en fuentes no domiciliarias	8
I.3.6 Resumen de resultados en fuentes no domiciliarias	9
I.4 Estudio de Geofísica	10
I.4.1 Método empleado	10
I.4.2 Principios teóricos	10
I.4.3 Arreglo electródico empleado	12
I.4.4 Equipo utilizado	13
I.5 Estudio de Geohidrología	13
I.5.1 Etapas de los estudios geohidrológicos	13
I.5.1.1 Evidencias y uso del agua subterránea	13
I.5.1.2 Identificación del tipo de acuífero	14
I.5.1.3 Determinación de parámetros hidráulicos de las unidades geohidrológicas, características físico-químicas del agua subterránea y características elementales de los estratos del subsuelo	14
I.5.1.4 Análisis del sistema de flujo	14
I.5.1.5 Evaluación del potencial de contaminación	14
I.5.2 Aprovechamientos actuales de agua subterránea	16
I.5.3 Funcionamiento de infiltración del lixiviado	16
I.6 Estudio de Mecánica de Suelos	16
I.6.1 Fisiografía de la zona en estudio	16
I.6.2 Sismología y geología estructural	17
I.6.3 Perfil del terreno	18
I.6.4 Pozos a ciclo abierto	19
I.6.5 Sondeos para pruebas de infiltración (SPI)	19

I.6.6 Pruebas de permeabilidad	19
I.6.7. Perforación de Pozos	20
1.6.7.1 Área restringida de emplazamiento del pozo	20
1.6.7.2 Desinfección del pozo	21
1.6.7.3 Dispositivos de medición y monitoreo	21
1.6.7.3.1 Medidor de volúmenes	21
1.6.7.3.2 Toma lateral	21
1.6.7.3.3 Medición de niveles	21
I.6.8 Bancos de material	21

Capítulo 2. Generación de los Residuos Sólidos en México

Antecedentes.	22
II.I Descripción de la localidad	22
II.1.1 Localización	22
II.1.2 Aspectos generales	25
II.1.3 Aspectos hidrológicos	25
II.1.4 Aspectos geológicos	26
II.1.5 Aspectos hidrogeológicos	26
II.1.6 Consideraciones de selección	27
II.1.7 Topografía de la localidad	27
II.1.8 Uso del suelo	27
II.1.9 Población	27
II.1.10 Vías de comunicación	27
II.1.11 Centros educativos	27
II.1.12 Centros de salud	28
II.1.13 Vivienda	29
II.1.14 Zonas de recreo	29
II.1.15 Actividades económicas	29
II.1.16 Servicios	30
II.1.17 Situación actual del sistema de recolección	30
II.1.18 Organismo operador	36
II.2 Generación de residuos sólidos	39
II.2.1 Generación y composición de los residuos	39
II.2.2 Generación de Residuos por Estado	42
II.2.3 Recomendaciones	50
II.3 Situación actual de la disposición final	51
II.3.1. Características del sitio	51
II.3.2. Características operativas	53
II.3.3. Problemática ambiental	53
II.4 Marco legal	54
II.4.1 La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos	54
II.4.2 Las Constituciones Estatales	55
II.4.3 Las Leyes Orgánicas Municipales	55
II.4.4 Los reglamentos municipales	55
II.4.5 Plan de desarrollo municipales	56

Capítulo 3. Modelo de Generación, Control y Tratamiento de Biogas

Antecedentes.	58
III.1 Composición y características del biogas	58
III.1.1 Constituyentes principales del biogas	58
III.1.2 Constituyentes de gases secundarios	60
III.2 Generación del biogas	61
III.2.1 Generación de los gases principales	61
III.2.2 Volumen de gas producido	64
III.2.2.1 Cálculo del volumen generado	65
III.2.3 Variación en la producción de gas con el tiempo	68
III.2.4 Fuente de gases secundarios	69
III.2.5 Movimiento de los gases principales en el relleno	73
III.2.5.1 Migración hacia arriba de biogas	73
III.2.5.2 Migración hacia abajo del biogas	74
III.2.6 Movimiento de gases secundarios	75
III.3 Control Pasivo del Biogas	77
III.3.1 Alivio de presión por quemadores/ventiladores en la cubierta del relleno	77
III.3.2 Zanjas interceptoras en el perímetro	78
III.3.3 Zanja perimetral de barrera o pared de estiércol y agua	79
III.3.4 Uso de barreras absorbentes dentro de rellenos para gases secundarios	79
III.4 Control Activo de biogas con facilidades perimetrales	80
III.4.1 Pozos perimetrales de extracción de gas y control de olor	80
III.4.2 Zanjas perimetrales de extracción de gas	82
III.4.3 Inyección de aire en pozos perimetrales (Sistema de cortina de aire)	82
III.5 Control activo de biogas con pozos de extracción de gas horizontales y verticales	82
III.5.1 Pozos de extracción de gas vertical	82
III.5.2 Pozos de extracción de gas horizontales	84
III.5.3 Manejo de la condensación en los sistemas de recuperación	84
III.6 Manejo de biogas	84
III.6.1 Quema de biogas	85
III.6.2 Sistemas de recuperación de energía del biogas	85
III.6.3 Purificación y recuperación de gas	87
III.6.4 Dispersión del biogas	88
III.6.4.1 Modelo Gaussiano de dispersión	88

Capítulo 4. Modelo de Generación, Control y Tratamiento de Lixiviados

Antecedentes.	90
IV. Lixiviado	90

IV.1 Composición del lixiviado	90
IV.1.1 Variaciones en la composición del lixiviado	92
IV.1.2 Compuestos secundarios	93
IV.2 Balance de agua y generación de lixiviado en rellenos	93
IV.2.1 Descripción de los componentes del balance de agua para una celda del relleno	93
IV.2.2 Agua entrando por arriba	94
IV.2.3 Agua entrando en el desecho sólido	94
IV.2.4 Agua entrando en el material de la cubierta	95
IV.2.5 Agua saliendo por debajo	95
IV.2.6 Agua consumida en la formación de biogas	95
IV.2.7 Agua perdida como vapor de agua	96
IV.2.8 Capacidad del terreno del relleno	96
IV.2.9 Preparación del balance de agua en el relleno	97
IV.3 La ley de Darcy	97
IV.4 Estimación de la filtración vertical del lixiviado	97
IV.5 Destino de los constituyentes en el lixiviado en migración subterránea	99
IV.6 Control del lixiviado en rellenos	99
IV.7 Sistemas de colección de Lixiviados	102
IV.8 Control del agua superficial	104
IV.9 Determinación de la percolación a través de las capas cobertoras intermedias y finales	106
IV.10 Caso de generación de lixiviado en un relleno sanitario ubicado en Irapuato, Guanajuato	106
IV.11 Análisis para obtener la generación de lixiviados	108
Capítulo V. Impacto Ambiental Generado por los Lixiviados y el Biogas de un Relleno Sanitario y Medidas de Mitigación	
Antecedentes.	116
V.1 Rasgos físicos	116
V.1.1 Localización Geográfica	116
V.1.2 Climatología	117
V.1.3 Calidad del aire	117
V.1.4 Geomorfología y geología	117
V.1.5 Estratigrafía	117
V.1.6 Tipos de suelo	120
V.1.7 Susceptibilidad de la zona a sismicidad	120
V.1.8 Hidrología	120

V.2 Rasgos biológicos	120
V.2.1 Vegetación	120
V.2.2 Fauna	120
V.2.3 Ecosistema y Paisaje	121
V.2.4 Aspectos estéticos, turísticos y de interés histórico o patrimonial del la zona en Estudio	121
V.3 Rasgos socioeconómicos	121
V.3.1 Población económicamente activa	121
V.3.2 Grupos étnicos	121
V.3.3 Servicios	122
V.3.4 Uso actual del suelo	123
V.3.5 Sectores productivos	123
V.4 Vinculación con las Normas y Regulaciones sobre Uso del Suelo	123
V.4.1 Generalidades	123
V.4.2 Política de desarrollo urbano	126
V.4.3 Desarrollo urbano	126
V.5 Normatividad para la elección del sitio de disposición final	126
V.6 Identificación de Impactos Ambientales	128
V.6.1 Metodología	128
V.6.1.1 Identificación de impactos	128
V.6.2 Evaluación de impactos	130
V.6.2.1 Ruido	131
V.6.2.2 Descripción de la matriz de evaluación	132
V.6.3 Medidas de Prevención y Mitigación de los Impactos Ambientales Identificados	135
Conclusiones	136
Bibliografía	138

Introducción

La problemática de los residuos sólidos en México es muy grande, ya que la superficie de tiraderos a cielo abierto es más del doble que la superficie ocupada por los rellenos sanitarios, por lo que la contaminación generada es muy grave. Otro problema es la falta de vehículos recolectores de basura, ya que el volumen generado es demasiado para la capacidad que tienen estos camiones. En el Capítulo II se puede ver que hay estados de la república con menos de 40 camiones, lo cual indica que se debe resolver este problema si se quiere recolectar la basura generada.

Esta tesis se desarrolla en cinco capítulos. Todos estos capítulos fueron elegidos con cuidado para explicar de manera clara, la generación de lixiviados y biogases en el relleno sanitario, así como su control y tratamiento.

A continuación se describen de manera general cada capítulo de este trabajo.

El primer capítulo trata acerca de los aspectos generales que se deben tomar para el diseño de un relleno sanitario. Se considerarán los estudios que ayuden a determinar el diseño correcto del relleno sanitario, estos estudios son: estudio demográfico, estudio topográfico, estudio de generación de residuos sólidos, estudio de geofísica, estudio de geohidrología y estudio de mecánica de suelos. Realizando estos estudios se puede saber si el lixiviado afectara los acuíferos naturales cercanos al lugar, qué tipo de basura es la que más hay en la localidad, y si el tipo de suelo es propicio para que el relleno sanitario no tenga problemas en cuanto a desmoronamientos o excesiva infiltración.

El segundo capítulo trata sobre la generación de residuos sólidos en México. Aquí se tratan los temas relacionados a la situación actual del sistema de recolección, el sistema actual para la disposición final de residuos; se ofrece una serie de recomendaciones a seguir para mejorar los problemas existentes en éstos aspectos; y en materia legal, se tratan temas relacionados con las disposiciones oficiales para el manejo de los residuos sólidos. Se ofrece información en donde se puede observar la generación de residuos por cada estado de la República Mexicana.

En el tercer capítulo se explica la composición y las características del biogas, de cómo se genera en el relleno; también se toca el tema de las diferentes formas que se pueden aplicar para controlar las emisiones del biogas y los sistemas usados para éste propósito; cómo se debe administrar el biogas y por último se explica el modelo para calcular el volumen generado de biogas en un relleno sanitario.

En el cuarto capítulo, se explica cómo está compuesto el lixiviado, el balance de agua que se debe hacer para los lixiviados, así como la generación de éstos; se habla sobre la estimación de la filtración vertical del lixiviado, el control de los lixiviados en los rellenos, los sistemas usados para la recolección y por último el modelo propuesto usado para determinar la generación de lixiviados a través de las capas del relleno sanitario.

El impacto ambiental generado por los lixiviados y el biogas en un relleno sanitario, es tratado en el quinto y último capítulo. Aquí, los temas que se tratan son los siguientes: los rasgos físicos, climatología, calidad del aire, geomorfología y geología, estratigrafía, tipos de suelo, sismicidad en la zona, etc., los rasgos biológicos que son, la flora y la fauna del lugar, el paisaje, los ecosistemas, etc., los rasgos socioeconómicos como, grupos étnicos, población económicamente activa, servicios en la zona, etc., se trata el tema de las diversas normas y regulaciones para el uso de suelo, la normatividad para la elección del sitio para la disposición final y se identifican una serie de impactos ambientales generales a considerar.

Capítulo 1
Aspectos Generales del Diseño
de un Relleno Sanitario

Antecedentes.

En este Capítulo se tratarán los temas que a continuación se enlistan:

- Estudio demográfico
- Estudio topográfico
- Estudio de generación de residuos sólidos
- Estudio de Geofísica
- Estudio de Geohidrología
- Estudio de Mecánica de Suelos

I.1 Estudio demográfico

I.1.1 Datos censales

Para la realización de cualquier obra de importancia de ingeniería, es necesario contar con la información de la cantidad de habitantes en la zona en estudio, y estos datos son proporcionados por los datos censales. Actualmente el organismo que hace este estudio es el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Los datos más recientes pertenecen al XII Censo General de Población y Vivienda, 2000. Como se sabe, cada diez años son recabados nuevamente los datos sobre la cantidad de habitantes del país, por zona y su nivel de ingresos.

I.1.2 Proyecciones de Población con base en los datos censales

Para el diseño del relleno sanitario, debe efectuarse una estimación de la población futura de la localidad a servir; esta "población de proyecto" corresponde a la que se tendrá en el último día del período de diseño fijado para el proyecto.

La mejor manera para estimar las tendencias de la población futura de una localidad por medio del desarrollo que ha registrado en décadas anteriores, y la fuente de información más importante sobre el mismo en México son los censos levantados por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática cada diez años. Los datos de los censos de población pueden adaptarse a diversos modelos matemáticos de crecimiento demográfico entre los cuales se tienen los modelos aritmético, geométrico, de incrementos diferenciales, etc.

Modelo Aritmético

El modelo aritmético tiene como característica un incremento de población constante para incrementos de tiempo iguales y, en consecuencia, la velocidad de crecimiento, o sea la relación del incremento de habitantes y el período de tiempo es una constante; expresado como ecuación se tiene:

$$P = P_2 + K_a (T - t_2)$$

donde:

T es el año al cual se desea calcular la población P;

K_a es una constante que significa el incremento de población en el decenio, o sea;

$$k_a = \frac{P_2 - P_1}{t_2 - t_1}$$

P_1 y P_2 son las poblaciones del penúltimo y último censos, respectivamente, y t_1 y t_2 los años correspondientes.

Modelo geométrico

El modelo geométrico de crecimiento de la población se caracteriza por tener una velocidad de crecimiento directamente proporcional al valor de la población en cada instante de tiempo, o sea:

$$\text{Ln } P = \text{Ln } P_2 + k_g (T - t_2)$$

$$K_g = (\text{Ln } P_2 - \text{Ln } P_1) / (t_2 - t_1)$$

donde k_g es la velocidad de crecimiento poblacional:

Las variables empleadas tienen el mismo significado que en el modelo aritmético.

Método de incrementos diferenciales

Este método consiste en considerar que la segunda diferencia entre los datos de población es constante, lo cual equivale a ajustar los datos a los de una parábola de segundo grado. Se deben considerar los datos del primer censo a partir del cual se tengan intervalos de tiempo de medición constantes.

En el método original, el promedio de la segunda diferencia permanece constante y se suma progresivamente al promedio de la primera diferencia.

Una variante de este método mas ajustada a la realidad consiste en no obtener promedio de la primera diferencia, y el promedio de la segunda diferencia sumarlo al resultado de la última primera diferencia calculada.

Método de extensión gráfica

Este método consiste en graficar los datos de población en papel milimétrico. Se forma un par de ejes coordinados: el de las ordenadas para los datos de población y el de las abscisas para las fechas a que corresponden dichos datos.

Una vez que se tienen los puntos localizados, se unen por medio de una línea que será la curva representativa de la población. Esta curva se prolonga siguiendo la tendencia anterior, hasta el tiempo futuro deseado, encontrando así la población en el eje de las ordenadas.

En virtud de que la población de proyecto es uno de los datos básicos para el diseño de los elementos del sistema de manejo de residuos sólidos, se recabó información de otras fuentes a partir de las cuales se pudieran inferir datos poblacionales. Esto con el fin de corroborar los datos censales oficiales, ya que de resultar inferiores a las cifras que es probable que se tengan en realidad, no deberán adoptarse en el presente Proyecto Ejecutivo, ya que conducirían al subdiseño de los elementos del sistema, resultando insuficiente para las necesidades de la población en un lapso menor al periodo de diseño.

Manejo final de la información

Hay varias formas de determinar cual de todos los resultados será más útil. Por ejemplo, se puede obtener el promedio de todos los métodos mencionados, o eliminar el resultado más alto y el más bajo y promediar, o tomar el resultado más bajo o el más alto. Todo depende del grado de incertidumbre para tomar el dato adecuado.

1.1.3 Dinámica del crecimiento demográfico

México ha tenido índices de crecimiento poblacional de los más altos del mundo: 3.1% anual en los años cincuenta; 3.8% en los sesenta y sólo 2.9% en los setenta. La población de México, comparada con la cifra de 1970 creció en las últimas dos décadas (1970 a 1990) a una tasa media anual de 2.6%. En 1921, la población disminuye con respecto a la registrada en 1910, año en que se inició la revolución. La mayor parte de esta disminución no obedece, como podría creerse, en los años de lucha armada, sino a la enorme mortalidad causada por la epidemia de gripe conocida como "influenza española" y a la emigración motivada por el movimiento armado.

Si no se cuenta con datos que nos indiquen una tendencia poblacional, el valor que actualmente se adopta es de una tasa del 2.6%

I.2 Estudio Topográfico

Los levantamientos topográficos pueden efectuarse en poblaciones de reducida extensión superficial ejecutando las mediciones con procedimientos taquimétricos para que el costo no sea elevado. Con los datos recabados directamente por el técnico a quien se le encomienda esta labor, se construirá un plano con la información suficiente para proyectar la obra.

Cuando la localidad que se encuentra en proceso de estudio, tenga cierta importancia, que se presenten razones de carácter urgente, los cuales ameriten que el trabajo topográfico se deba realizar con mayor rapidez, es conveniente establecer o fijar controles terrestres y entonces proceder a efectuar un levantamiento aerofotográfico para elaborar un mosaico rectificado. Si requiere mayor detalle, se aumentarán los puntos de control para realizar una restitución detallada y dibujar un plano fotogramétrico a la escala conveniente. Hasta aquí el proyectista contará con tres elementos importantísimos:

1. Información estadística verídica y datos reales de la localidad, incluyéndose la situación económica de los vecinos de la localidad.
2. Un plano topográfico configurado, un mosaico aerofotográfico, un mosaico rectificado, o un plano fotogramétrico. Con estos elementos, el proyectista se orientará para diseñar la obra de una manera más precisa, puesto que se apreciarán los núcleos de las construcciones existentes, las calles, las avenidas, las carreteras, las vías férreas, los arroyos, la vegetación, los terrenos de cultivo, los lomeríos y en general un conocimiento bastante real de la población.
3. Se contará con un plano absolutamente seguro en su planimetría, para determinar en él las distancias con precisión, y con el relieve expuesto, la configuración topográfica. También se tendrán datos de altitudes en los cruces, suficientemente exactos para proyectar obras de agua potable y alcantarillado.

I.2.1 Desarrollo de los trabajos topográficos

Se inicia realizando el reconocimiento físico de la zona de estudio con el fin de determinar el método de estudio, personal y equipo requerido, así como el apoyo logístico.

Se localizan los vértices de apoyo de la poligonal envolvente, considerando los límites de la zona de estudio.

Se establecen los vértices de apoyo para conformar la poligonal envolvente, ahogando una mojonera en cada vértice con dimensiones de 20 cm de diámetro y 40 cm de profundidad marcando el vértice con una varilla de 3/8" y 40 cm de largo.

1.2.2 Especificaciones y tolerancias

Los trabajos de topografía se llevan a cabo mediante los controles horizontal y vertical.

Control Horizontal

Para llevar a cabo este control, se levanta una poligonal envolvente midiendo los ángulos mediante el método de ángulos dobles y las distancias con teodolito electrónico, estableciendo el cálculo analítico con una precisión de 1/8000.

La orientación astronómica se realiza con el método de alturas absolutas del sol, tomando como base la línea comprendida entre dos vértices, calculando un rumbo entre estos dos vértices, y la orientación de las otras líneas de la poligonal envolvente a partir de este rumbo.

Para realizar la configuración del predio se levantan dos poligonales, con sus rumbos en su línea inicial respectivamente; ambas poligonales parten de un vértice de la poligonal envolvente hacia el centro del predio, con la dirección ya mencionada.

En cada una de estas dos poligonales se determinan secciones a cada 20 metros, identificándolas mediante trompos de madera, a los cuales se les determina su elevación mediante una nivelación diferencial con nivel fijo.

Control vertical

Los trabajos de altimetría son desarrollados en dos etapas mediante métodos diferentes cada uno. El primero se lleva a cabo mediante el método de secciones transversales, utilizando como referencia las poligonales envolvente y de apoyo con un equipo consistente de un tránsito de 20" de aproximación para dar la orientación necesaria y niveles fijo y automático para obtener la elevación de las secciones.

El segundo método es el de radiaciones, que se considera como más adecuado cuando las condiciones topográficas del predio son muy accidentadas y se presentan desniveles muy grandes y cortes prácticamente verticales, con diferencias de elevación desde cinco hasta doce metros.

I.3 Estudio de generación de residuos sólidos

I.3.1 Determinación en fuentes domiciliarias

El diseño de los elementos funcionales de un sistema de manejo de residuos sólidos está en función de los resultados obtenidos a través de un muestreo estadístico aleatorio realizado en campo, con duración de ocho días para cada uno de los estratos socioeconómicos de la población. Es por ello que el muestreo es una actividad fundamental para cuantificar y caracterizar los subproductos, obteniendo así un índice de variabilidad y conocimiento de los hábitos de consumo de la población.

El estudio de residuos sólidos incluye las siguientes actividades en campo:

- Identificación de la ubicación y distribución de los estratos socioeconómicos: alto, medio y bajo en la ciudad. Una forma para la determinación de los estratos socioeconómicos es identificarlos a partir de las características de las viviendas, partiendo del material usado en su construcción.
- Selección aleatoria e identificación de las casas a ser muestreadas en cada estrato.
- Localización y arrendamiento de un lugar adecuado para realizar los análisis físicos de los residuos sólidos.
- Visita y entrevista con los habitantes de las casas para solicitarles su colaboración. En caso de aceptar colaborar, se les entrega la primera bolsa para muestra de residuos sólidos.
- Recolección de muestras y entrega de nuevas bolsas en cada casa seleccionada durante los días del muestreo.
- Diariamente, pesaje de muestras, selección de subproductos y obtención de densidad.

I.3.2 Metodología aplicada

En la Norma Oficial Mexicana que se refiere a “Determinación de la Generación”, se especifica un método para determinar la generación de residuos sólidos municipales a partir de un muestreo estadístico aleatorio. Se puede seleccionar un factor de riesgo de 0.10 el cual corresponde a un tamaño de muestra de 80 casas; dicho factor de riesgo se establece de acuerdo a los siguientes factores: conocimiento de la localidad; calidad técnica del personal participante; factibilidad para realizar el muestreo; y características de la localidad a muestrear.

La norma establece que se deberán recoger las bolsas con residuos de las casas de cada estrato durante ocho días, considerando el primer día como una “operación de

limpieza", para asegurar que el residuo generado después de ella, corresponda a un día. De esta manera se contaría con siete datos obtenidos de cada casa-habitación, durante el período de muestreo.

Para la selección de las casas incluidas en el muestreo, se procede a definir una ruta de recolección que cubra en forma homogénea el estrato socioeconómico en cuestión, con sus colonias correspondientes y, a continuación, se determinan en forma aleatoria las casas que serán visitadas.

Se encuesta a los residentes de las casas con el fin de recabar información acerca del número de habitantes de cada casa muestreada, las características de sus depósitos de almacenamiento interno de la basura y la apreciación de los residentes en relación al servicio de limpieza; además se les hace entrega de una bolsa de plástico de 50 x 70 cm de calibre 200, para que en ella depositen los residuos de un día.

I.3.3 Resultados

Los resultados obtenidos en cada uno de los estratos socioeconómicos muestreados se presentan en forma tabular. Se obtienen los valores promedio de generación, para cada casa habitación, se llega a valores globales; estos valores se consideran como los parámetros de diseño para el relleno sanitario propuesto.

Adicionalmente se obtiene el peso volumétrico de los residuos y la calificación y cuantificación de subproductos siguiendo los métodos establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas.

El análisis de selección y cuantificación de subproductos, así como la determinación del peso volumétrico "In situ", se lleva a cabo respetando lo establecido por la Norma Oficial Mexicana referente a "Método de cuarteo".

Para la realización del cuarteo se toma una cantidad de basura equiparable a las 250 bolsas de basura domiciliaria recomendadas en la norma; con la basura se forma un montón sobre un área plana horizontal de cemento. El montón de residuos sólidos se traspala con bieldos hasta homogeneizarlo y a continuación se divide en cuatro partes aproximadamente iguales; se eliminan partes opuestas y se repite la operación hasta dejar una parte aproximada a 50 kg con los cuales se procede a efectuar la selección de subproductos de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana, "Selección y cuantificación de subproductos" antes citada.

I.3.4 Análisis de resultados del estudio de generación en fuentes domiciliarias

En general la generación per-cápita mayor corresponde al estrato socioeconómico alto (x_1 kg/hab/día), le sigue el estrato socioeconómico medio (x_2 kg/hab/día), y como

último el estrato socioeconómico bajo (x_3 kg/hab/día), aunque la composición varía considerablemente. Si la desviación estándar promedio de la generación es muy baja, significa que la media de generación diaria es representativa de la población muestreada. Se toman en cuenta los valores de los estratos mencionados, la media aritmética de la generación resulta ser como sigue:

$$\bar{X} = \left(\frac{x_1 + x_2 + x_3}{3} \right)$$

Ahora bien, la obtención de este dato puede dar un panorama general en cuanto a la generación per-cápita de residuos sólidos y por estrato que producen los habitantes de la ciudad. Sin embargo, en el promedio aritmético se está considerando que la población se distribuye equitativamente, en cuanto estratos socioeconómicos se refiere. En este sentido se debe realizar un análisis de generación para toda la población, en función del porcentaje de la misma perteneciente a los estratos bajo, medio y alto, de manera que se obtenga una media ponderada. Para la obtención de los porcentajes de población correspondientes al estrato bajo, medio y alto, se consideran los resultados del Censo General de Población y Vivienda 2000 en cuanto a los rangos de ingresos.

Por otra parte y de igual manera, del análisis del peso volumétrico en los diferentes días de muestreo, se obtiene la media ponderada:

$$\bar{X} = \frac{\bar{X}_1 P_{E1} + \bar{X}_2 P_{E2} + \bar{X}_3 P_{E3}}{\sum P_{Ei}}$$

donde:

\bar{X}_i = Generación media de cada estrato
 P_{Ei} = Población de cada estrato

I.3.5 Estudio de generación en fuentes no domiciliarias

Las fuentes de generación de residuos sólidos no domésticos incluyen mercados, centros comerciales, hospitales, escuelas e industrias ente las más importantes. En este apartado se presentan los resultados del estudio de generación en fuentes no domiciliarias.

a) Mercados

Como parte del estudio de generación de mercados se efectúa el análisis de selección y cuantificación de subproductos así como la determinación del peso volumétrico "In situ". Para efectuar esas actividades primeramente se efectúa el cuarteo de los residuos sólidos mediante una adaptación de la Norma Oficial Mexicana "Método de cuarteo".

Para la realización del cuarteo se toma una cantidad de basura equiparable a las 250 bolsas de basura domiciliaria recomendadas en la norma; con la basura se forma un montón sobre un área plana horizontal de cemento pulido en la zona de descarga del mercado. El montón de residuos sólidos se traspalea con bieldos hasta homogeneizarlo y a continuación se divide en 4 partes aproximadamente iguales; se eliminan partes opuestas y se repite la operación hasta dejar una cantidad aproximada de 50 kg con los cuales se procede a efectuar la selección de subproductos de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana, "Selección y cuantificación de subproductos".

b) Centros comerciales

La frecuencia de recolección debe ser "cada tercer día". La cantidad generada se determina con base en el número de recipientes empleados.

La determinación del peso volumétrico "in situ" se hace de acuerdo a lo establecido por la Norma Oficial Mexicana "Peso volumétrico "in situ"".

c) Hospitales

La Dirección General de Servicios Públicos Municipales debe recolectar diariamente los residuos no peligrosos en clínicas y hospitales como paradas normales de la ruta de los camiones correspondientes a la zona.

d) Escuelas

La frecuencia de recolección en las escuelas es de "cada tercer día" siendo una parada normal de la ruta del vehículo recolector de la Dirección General de Servicios Públicos Municipales correspondiente a la zona.

e) Industrias

Para determinar la generación industrial, el H. Ayuntamiento de la ciudad solicita las principales industrias, por carta, información relativa a la generación de residuos sólidos, tanto en cantidad como en calidad.

I.3.6 Resumen de resultados en fuentes no domiciliarias

Algunas ocasiones se puede estimar que la generación de residuos sólidos correspondiente a las industrias y hospitales es la diferencia ente los residuos sólidos

transportados al día y la generación domiciliaria, de mercados, escuelas y centros comerciales.

I.4 Estudio de Geofísica

I.4.1 Método empleado

En la prospección y estudio del agua subterránea, una de las técnicas geofísicas más utilizadas es la resistividad en su modalidad de Sondeo Eléctrico Vertical.

I.4.2 Principios teóricos

Evjen estableció que la profundidad de exploración corresponde a la profundidad a la cual un plano de contorno y contacto delgado y de extensión infinita, contribuye a una señal máxima medible en la superficie del terreno. Para el estudio de la resistividad del subsuelo, se considera a éste como un medio homogéneo e isotrópico. Para definir la ecuación del potencial en un punto se parte de las siguientes ecuaciones:

$$E = \rho j$$

donde E es el gradiente de potencial, j la densidad de corriente y ρ la resistividad del medio.

Condición de divergencia

$$\Delta j = 0 \quad (1.1)$$

Esta condición establece que la cantidad de corriente que es inyectada a un volumen de material y que fluye a través de él, es igual al que sale.

Por otra parte, el vector densidad de corriente en cada lugar donde se encuentra una fuente de corriente puntual, tendrá un valor de cero.

Para obtener la ecuación de Laplace, se combinan las dos ecuaciones anteriores por lo que resulta:

$$\Delta j = \frac{1}{\rho} \Delta E = \frac{1}{\rho} L^2 U = 0 \quad (1.2)$$

De donde se desprende que "U" es la función potencial escalar de tal manera que "E" es el gradiente de "U".

En coordenadas polares resulta:

$$\frac{\delta}{\delta r} \left(r^2 \frac{\delta U}{\delta r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\delta}{\delta \theta} \left(\sin \theta \frac{\delta U}{\delta \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\delta^2 U}{\delta \psi^2} = 0 \quad (1.3)$$

Considerando una sola fuente de corriente, siendo el flujo de esta corriente simétrico con respecto a θ y ψ , se concluye que la derivada de θ y ψ son iguales a cero, esto es:

$$\frac{\delta}{\delta r} \left(r^2 \frac{\delta U}{\delta r} \right) = 0 \quad (1.4)$$

Integrando la ecuación anterior, ésta se reduce a:

$$r^2 = \frac{\delta U}{\delta r} = C \quad (1.5)$$

siendo

$$= -\frac{r^2}{C} + D$$

a una distancia grande de la fuente puntual de corriente, el potencial será cero y la constante de integración también será cero.

Al evaluar los términos de la corriente "I", la constante de integración "C" dependerá de "I" y quedará expresada como la integral de la densidad de corriente sobre la superficie. Esto es:

$$I = \int_s j ds = \int_s \frac{E}{\rho} ds = \int_s \frac{\rho}{\rho r^2} ds = -\frac{2\pi C}{\rho} \quad (1.6)$$

Al sustituir (6) en (5) para evaluar C queda:

$$= \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (1.7)$$

Donde para "n" fuentes de corriente distribuidas en un medio uniforme, el potencial en un punto de observación "M", será expresado como:

$$U_m = \frac{\rho}{2\pi} \left[\frac{I_1}{Q_1} + \frac{I_2}{Q_2} + \dots + \frac{I_n}{Q_n} \right] \quad (1.8)$$

donde "I_n" es la corriente en el electrodo enésimo y "Q_n" es la distancia del electrodo "enésimo" al lugar donde se encuentra el punto de medición "M".

Para calcular las resistividades, se obtienen las mediciones siguientes:

La corriente "I" que fluye entre los dos electrodos, A y B

La diferencia de potencial "U" entre dos electrodos de medición M y N.

En la aplicación de la ecuación (8) para un arreglo tetraelectrónico, la medida de la resistividad quedará expresada como:

$$\rho = \left(\frac{U_m U_n}{I} \right) \left(\frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \right) = k \frac{\Delta U}{I} \quad (1.9)$$

En la ecuación (9), "K" es denominado Factor Geométrico, pues representa el tipo de arreglo electrónico usado.

1.4.3 Arreglo electrónico empleado

Durante la campaña geoelectrica a realizar, es común utilizar el arreglo tetraelectrónico denominado Schlumberger.

Este corresponde a un dispositivo simétrico respecto al punto donde se realiza el sondeo denominado centro "O", debiéndose cumplir que las distancias entre A y B (electrodos de corriente) sean mayores o iguales a cinco veces la distancia entre los electrodos de potencial M y N.

El factor geométrico K queda evaluado como:

$$K = \pi \left(\frac{L^2}{MN} - \frac{MN}{4} \right) \therefore \rho_{QS} = \frac{\Delta U}{I} \pi \left(\frac{L^2}{MN} - \frac{MN}{4} \right) \quad (1.10)$$

donde:

ρ_{as} = resistividad aparente en el dispositivo Schlumberger.

ΔU = diferencia de potencial medida en M, N.

I = corriente inyectada a través de A y B.

L = distancia, medida entre los electrodos A y B.

MN = distancia entre los electrodos M y N.

I.4.4 Equipo utilizado

Para la realización de la prospección geoelectrica se utiliza un circuito de transmisión y otro de recepción, independientemente ambos; para tratar de evitar inducciones entre ellos.

La fuente de poder o circuito de transmisión a utilizar puede tener una corriente máxima de 1 ampere a 1000 volts, con ocho frecuencias que van de 1 a 5. El receptor debe ser capaz de medir diferencias de potencial hasta de 0.001 milivolts, con un error de 5%. Este aparato compensa automáticamente las corrientes parásitas y "ruido" eléctrico.

Los electrodos utilizados para el equipo de transmisión consisten en barras de acero de diferentes diámetros y largos, que se emplean de acuerdo a las características del terreno.

Los electrodos de recepción son tazas de porcelana, con solución de sulfato de cobre para evitar polarizaciones y en ocasiones dependiendo de la dureza del suelo, se emplean barras de acero con alma de cobre.

I.5 Estudio de Geohidrología

1.5.1 Etapas de los estudios geohidrológicos

Los estudios geohidrológicos deben considerar cinco etapas:

- Evidencias y uso del agua subterránea.
- Identificación del tipo de acuífero.
- Determinación de parámetros hidráulicos de las unidades hidrogeológicas, características físico-químicas del agua subterránea y características elementales de los estratos del subsuelo.
- Análisis del sistema de flujo.
- Evaluación del potencial de contaminación.

1.5.1.1 Evidencias y uso del agua subterránea

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

1.5.1.2 Identificación del tipo de acuífero

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

1.5.1.3 Determinación de parámetros hidráulicos de las unidades geohidrológicas, características físico-químicas del agua subterránea y características elementales de los estratos del subsuelo

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

Conocer la composición química del agua subterránea.

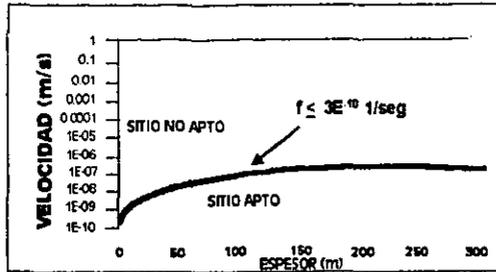
Determinar la conductividad hidráulica (K), la fracción de carbono orgánico (FCO) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de los diferentes estratos del subsuelo de la zona no saturada.

1.5.1.4 Análisis del sistema de flujo

Con base en la información geológica y de los puntos 1.5.1.1, 1.5.1.2 y 1.5.1.3 de la NOM-083-ECOL-1996 y otros elementos hidrogeológicos, tales como zonas de freatofitas, zonas de recarga y descarga, etc., se debe definir el sistema de flujo local y regional del área de estudio.

1.5.1.5 Evaluación del potencial de contaminación

Se debe integrar toda la información obtenida de los puntos 1.5.1.1, 1.5.1.2, 1.5.1.3 y 1.5.1.4 de la NOM-083-ECOL-1996, para determinar si el sitio es apto o si requiere obras de ingeniería. Para ello se debe considerar la gráfica siguiente.



$$f = \{K \cdot i\} / \{U \cdot d\}$$

Donde:

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

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

$$f = \frac{K \cdot i}{U \cdot d} \quad (1.11)$$

Donde:

- f = Factor de tránsito de la infiltración, (seg⁻¹)
- d = Espesor de la zona no saturada, (m)
- U = Porosidad promedio efectiva de los materiales de la zona no saturada, (adim.)
- I = Gradiente hidráulico, (adimensional)
- K = Conductividad hidráulica promedio de los materiales de la zona no saturada, (m/s)

La velocidad promedio (v) se calcula a partir de la conductividad hidráulica saturada (K) de los materiales del subsuelo en la zona no-saturada, dividida por la porosidad promedio efectiva (U), considerando un gradiente hidráulico unitario (i), de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$V = Ki/U \quad (1.12)$$

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

$$f \leq 3 \times 10^{-10} \text{ seg}^{-1}$$

I.5.2 Aprovechamientos actuales de agua subterránea

Con el objeto de conocer la posición y características del acuífero que subyace a la zona de estudio, se visitan los aprovechamientos existentes en los alrededores y se miden los niveles piezométricos para ajustar las curvas existentes o crearlas si es que no las hay.

I.5.3 Funcionamiento de infiltración del lixiviado

La construcción de un relleno sanitario implica la impermeabilización de su base, lo cual impide la infiltración de lixiviados hacia el subsuelo. Sin embargo, deben estudiarse

los efectos de posibles filtraciones accidentales o por mal funcionamiento se pudieran generar.

I.6 Estudio de Mecánica de Suelos

Los trabajos de mecánica de suelos se plantean con base en las características geológicas y a los resultados de la geofísica, a partir de los cuales se establece un marco geológico del subsuelo. Con base en ello se programa la perforación de pozos a cielo abierto para definir la permeabilidad de los materiales.

I.6.1 Fisiografía de la zona en estudio

México cuenta con una fisiografía variada, ya que se puede encontrar mesetas a lo largo del territorio, tanto en altiplanos como al nivel del mar. Se cuenta con dos sierras en México, la Occidental y la Oriental. También hay valles como donde se encuentra localizada la Capital del país. En cada uno de los anteriores puede encontrarse diferentes tipos de suelo constituyéndolos.

La geomorfología del país también incluye conos volcánicos y valles, así como cerros, donde se debe especificar el grado de erosión en el que están, ver figura 1.1.

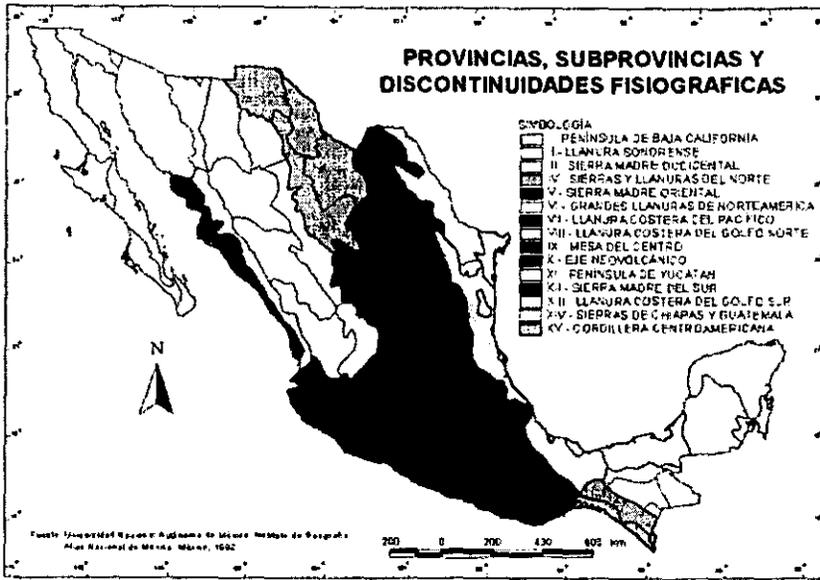


Figura 1.1 Discontinuidades fisiográficas en la República Mexicana

1.6.2 Sismología y geología estructural

Las zonas pueden ser sísmicas o asísmicas. Pudieran haber algunas fallas que afectan a las elevaciones topográficas.

Pueden haber aspectos estructurales sobresalientes como la presencia de un agrietamiento o falla producida por la explotación del agua subterránea, la cual, al bajar los niveles de saturación del acuífero, produce el desecamiento de los materiales granulares superiores y la compactación de los mismos, acompañado por agrietamientos del terreno.

Estos agrietamientos llegan a permitir el paso del agua de la superficie hacia el acuífero.

A continuación, en se presentan las zonas sísmicas principales en la República Mexicana. El área que pertenece a la zona A, que abarca la mayoría de los estados del norte del país, presenta menor sismicidad que la zona marcada con la letra D, la cuál abarca los estados de Chiapas, Oaxaca y Guerrero, principalmente.

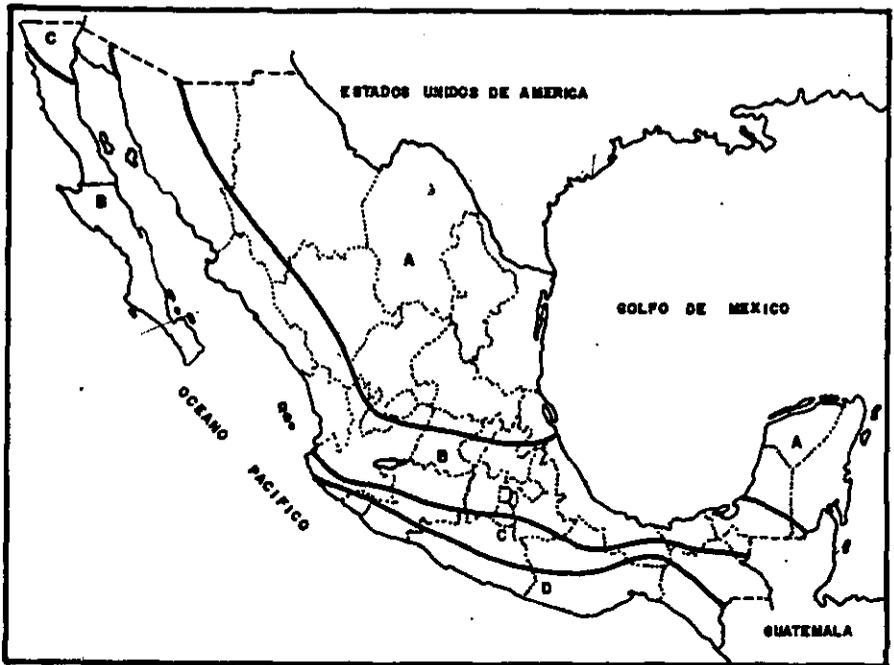


Figura 1.2 Regionalización sísmica de la República Mexicana

Para ubicar el relleno sanitario, se tiene que verificar en que zona sísmica se construirá para diseñar adecuadamente a éste.

1.6.3 Perfil del terreno

Perfil longitudinal

Es la intersección del terreno con el plano vertical definido a partir de un determinado eje longitudinal proyectado. Su representación se realiza sobre unos ejes cartesianos X e Y, que definen la distancia al origen D_0 y la altitud Z respectivamente.

La escala de estos ejes puede ser distinta, y se tiende a exagerar la representación aritmética mediante un aumento de la escala en el eje Y, llegando hasta diez veces el de X.

La densidad o secuencia de los puntos de un perfil es la separación que existe entre los puntos que lo representan. Es función de la escala y de las necesidades del objetivo final.

Perfil transversal

Es el resultado de la intersección de un plano vertical y normal al eje de la figura proyectada, con el terreno sobre el que se quiere situar. Ocupa una posición normal a la del perfil longitudinal

La longitud (o ancho) al menos tendrá que cubrir las necesidades del trabajo para lo que se proyecta. Se representa con dos ejes X e Y. En el de las X se ponen las distancias al eje en valores positivos y negativos. En el de las Y se marcan las cotas o altitudes. No suele haber diferencias en la escala para los dos ejes, pues se pueden utilizar para medir superficies sobre ellos.

I.6.4 Pozos a cielo abierto

El método más comúnmente utilizado para investigar las características del subsuelo consiste en perforar una cavidad en el terreno, de cuyo fondo se extraen muestras para examen visual y para efectuar ensayos de laboratorio. Pueden definirse con precisión razonable las características del subsuelo. También se utiliza ampliamente éste método en la investigación de áreas extensas, ya sea en forma exclusiva o como complemento de otros

I.6.5 Sondeos para pruebas de infiltración (SPI)

Las pruebas más usadas para las pruebas de infiltración, son las de permeabilidad "in situ". Entre estas tenemos a la prueba Matsuo-Nasberg, la cuál se usa para estudiar la permeabilidad de terrenos aluviales o rocosos muy fracturados en los cuales existe manto freático o situados por encima del nivel freático. La prueba Lugeon que consiste en inyectar agua a presión midiendo los gastos absorbidos crecientes y decrecientes manteniendo el caudal durante 10 minutos; una vez que se haya estabilizado el flujo.

Tiene por objetivo formarse una idea aproximada de la permeabilidad en grande, es decir, la debida a las fisuras de la roca.

La prueba Lefranc determina la permeabilidad local de suelos y rocas muy fracturadas localizadas por debajo del nivel freático.

I.6.6 Pruebas de permeabilidad

Los sedimentos lacustres corresponden a una alternancia de areniscas y lutitas tanto tobáceas como calcáreas, bien cementadas, compactas y algunas extremadamente duras, impermeables al flujo vertical.

Las pruebas de permeabilidad realizadas evalúan la permeabilidad horizontal en horizontes alterados. A partir de la representación granulométrica de las muestras de material obtenidas para los pozos a cielo abierto, se obtienen los diámetros efectivos D_{10} los que, utilizados en la expresión para el cálculo de la permeabilidad dada por Allen Hazen en función de C (que varía entre 50 y 150). Si hay altos valores de permeabilidad, se efectúan nuevos muestreos y la descripción del perfil; excavando y profundizando hasta roca sana.

1.6.7. Perforación de Pozos

La Norma Oficial Mexicana NOM-003-CNA-1996, "Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos", establece que para la perforación de un pozo se deben cumplir los requisitos que se presentan en los siguientes apartados.

1.6.7.1 Área restringida de emplazamiento del pozo

El área de protección entre el sitio seleccionado para construir un pozo y las fuentes potenciales de contaminación existentes que no pueden ser suprimidas, tendrá un radio mínimo de 30 m con respecto al pozo.

Las fuentes de contaminación son las siguientes (esta lista no es limitativa, sino que depende de lo que, para situaciones y condiciones particulares, la Comisión considere necesarias):

- Alcantarillado sanitario
- Campos de percolación
- Canales de aguas residuales
- Cloacas
- Depósitos de jales
- Fosas sépticas
- Gasolineras y depósitos de hidrocarburos
- Lechos de absorción
- Pozos abandonados no sellados
- Pozos de absorción
- Puntos de descarga de aguas residuales de uso industrial
- Rellenos sanitarios

1.6.7.2 Desinfección del pozo

La desinfección del pozo debe ser realizada durante la etapa de desarrollo del mismo, antes de que el equipo permanente haya sido instalado, el cual debe también ser desinfectado.

Para ello, deberá aplicarse el desinfectante necesario para que la concentración de cloro en el agua contenida en el pozo sea de 200 mg/L como mínimo. El agua en el pozo deberá tratarse con cloro, tabletas de hipoclorito de calcio, solución de hipoclorito de sodio o cualquier otro desinfectante de efecto similar, con la concentración apropiada y aprobada por la Secretaría de Salud.

Después de que el desinfectante haya sido aplicado, se agitará el agua del pozo para lograr una buena mezcla y se inducirá el contacto de la mezcla agua-desinfectante con las paredes del ademe, rejilla, filtro y formación del acuífero.

Posteriormente, se debe circular la mezcla dentro del ademe con la columna de bombeo, y luego extraerla mediante bombeo. Después de que el pozo haya sido desinfectado, debe ser bombeado hasta que no se detecten residuos del desinfectante utilizado.

1.6.7.3 Dispositivos de medición y monitoreo

1.6.7.3.1 Medidor de volúmenes

Con el objeto de disponer de un medio seguro para conocer los caudales de extracción del pozo, es indispensable la instalación de un dispositivo de medición compatible con los volúmenes proyectados de extracción. Para uso público urbano, el medidor debe cumplir con los requisitos estipulados en la Norma Oficial Mexicana de medidores de agua NOM-012-SCFI o usar dispositivos similares que cumplan con las normas vigentes.

1.6.7.3.2 Toma lateral

Se requiere instalar un dispositivo lateral en la tubería principal de descarga para el muestreo del agua.

1.6.7.3.3 Medición de niveles

También se requiere la instalación de un dispositivo que permita medir la profundidad del nivel del agua en el pozo.

1.6.8 Bancos de material

Para la identificación de bancos de material se visitan los alrededores del predio, pueden existir varias posibilidades de obtener material para la base y cubierta del relleno, como, (1) azolve de antiguas presa y zonas aledañas; (2) sedimentos lacustres tratados y (3) tierras de cultivo.

Capítulo 2
Generación de los Residuos
Sólidos en México

Antecedentes.

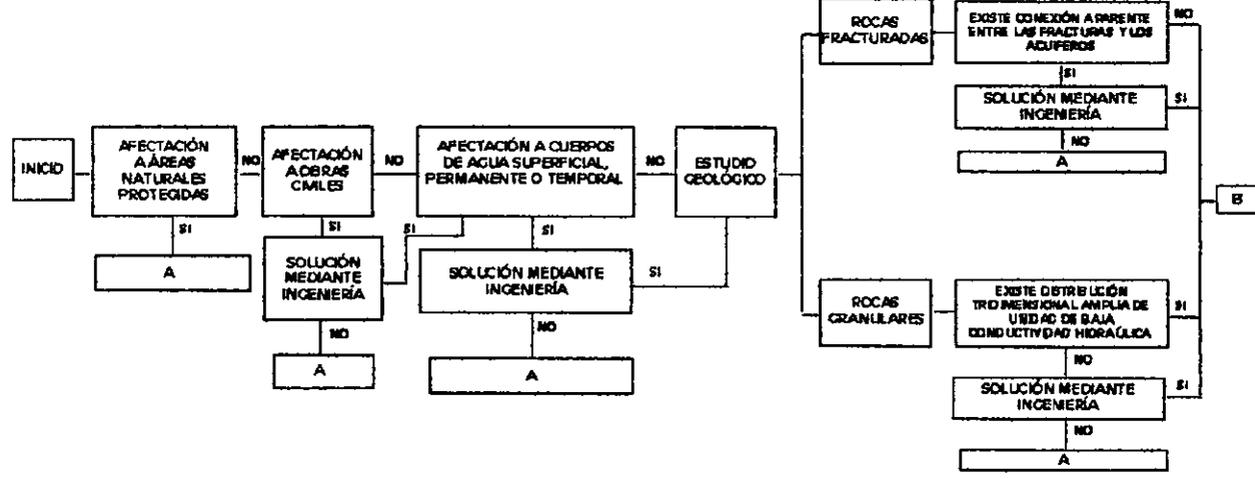
En este Capítulo se tratarán los temas que a continuación se enlistan:

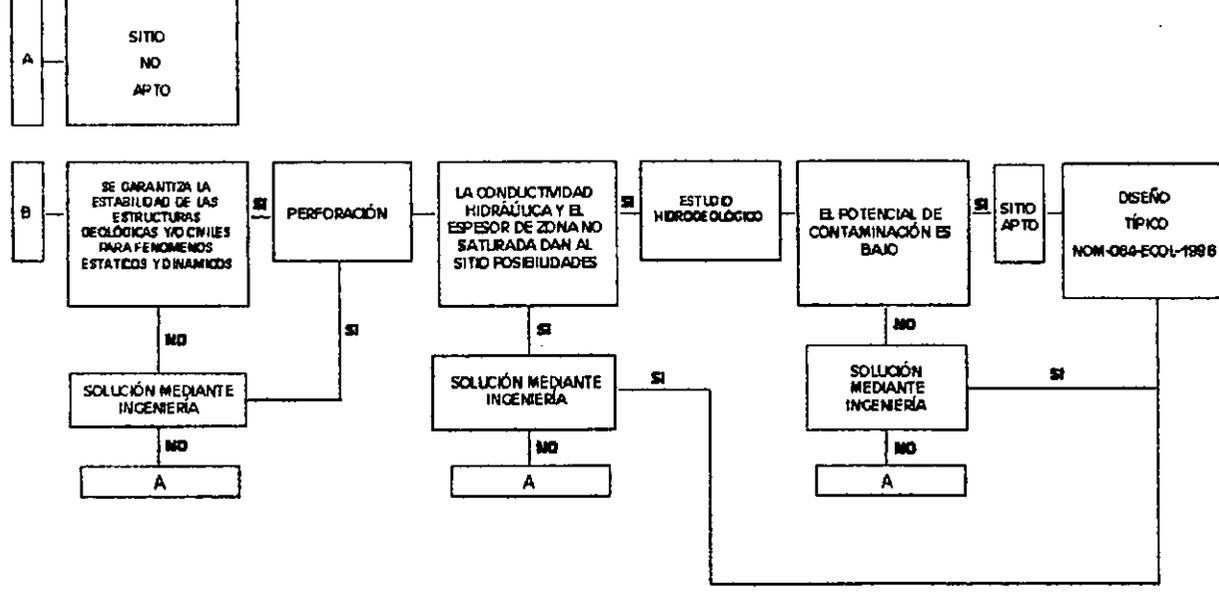
- Descripción de la localidad
- Situación actual del sistema de recolección
- Recomendaciones
- Sistema actual de la disposición final
- Marco legal

II.1 Descripción de la localidad

II.1.1 Localización

Con el fin de cumplir con las diferentes especificaciones de ubicación que debe satisfacer un sitio para la disposición final de residuos sólidos municipales y facilitar la toma de decisiones en las diferentes etapas de los estudios que se describen en el punto 4 de la Norma Oficial Mexicana, NOM-083-ECOL-1997, debe ser considerado el diagrama de flujo que se describe a continuación.





Se deben seguir adecuadamente los pasos y las recomendaciones tanto del diagrama de flujo anterior, como los de la Norma Oficial Mexicana, para la correcta ubicación del sitio para la disposición final de Residuos Sólidos Municipales (RSM).

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

II.1.2 Aspectos generales

II.1.2.1 Restricción por afectación a obras civiles o áreas naturales protegidas.

II.1.2.2 Las distancias mínimas a aeropuertos son:

- a) De 3000 m (tres mil metros) cuando maniobren aviones de motor a turbina.
- b) De 1500 m (mil quinientos metros) cuando maniobren aviones de motor a pistón.

II.1.2.3 Respetar el derecho de vía de autopistas, ferrocarriles, caminos principales y caminos secundarios.

II.1.2.4 No se deben ubicar sitios dentro de áreas naturales protegidas.

II.1.2.5 Se deben respetar los derechos de vía de obras públicas federales, tales como oleoductos, gasoductos, poliductos, torres de energía eléctrica, acueductos, etc.

II.1.2.6 Debe estar alejado a una distancia mínima de 1500 m (mil quinientos metros), a partir del límite de la traza urbana de la población por servir, así como de poblaciones rurales de hasta 2500 habitantes. En caso de no cumplirse con esta restricción, se debe demostrar que no existirá afectación alguna a dichos centros de población.

II.1.2.7 La localización de sitios de disposición final de residuos sólidos municipales, para aquellas localidades con una población de hasta 50,000 habitantes, o cuya recepción sea de 30 toneladas por día, de estos residuos; se debe hacer considerando exclusivamente las especificaciones establecidas en los puntos 2.3 y 2.4 de esta Norma Oficial Mexicana.

II.1.3 Aspectos hidrológicos

II.1.3.1 Se debe localizar fuera de zonas de inundación con períodos de retorno de 100 años. En caso de no cumplir lo anterior se debe demostrar que no exista la obstrucción del flujo en el área de inundación o posibilidad de deslaves o erosión que provoquen arrastre de los residuos sólidos.

II.1.3.2 El sitio de disposición final de residuos sólidos municipales no se debe ubicar en zonas de pantanos, marismas y similares.

II.1.3.3 La distancia de ubicación del sitio, con respecto a cuerpos de agua superficiales con caudal continuo, debe ser de 1000 m (mil metros) como mínimo y contar con una zona de amortiguamiento tal que pueda retener el caudal de la precipitación pluvial máxima presentada en los últimos 10 años en la cuenca, definida por los canales perimetrales de la zona.

II.1.4 Aspectos geológicos

II.1.4.1 Debe estar a una distancia mínima de 60 m (sesenta metros) de una falla activa que incluya desplazamiento en un período de tiempo de un millón de años.

II.1.4.2 Se debe localizar fuera de zonas donde los taludes sean inestables, es decir que puedan producir movimientos de suelo o roca, por procesos estáticos y dinámicos.

II.1.4.3 Se deben evitar zonas donde existan o se puedan generar asentamientos diferenciales que lleven a fallas o fracturas del terreno, que incrementen el riesgo de contaminación al acuífero.

II.1.5 Aspectos hidrogeológicos

II.1.5.1 En caso de que el sitio para la disposición final de los residuos sólidos municipales esté sobre materiales fracturados, se debe garantizar que no exista conexión con los acuíferos de forma natural y que el factor de tránsito de la infiltración (f) sea $\leq 3 \times 10^{-10} \text{ seg}^{-1}$.

II.1.5.2 En caso de que el sitio para la disposición final de los residuos sólidos municipales esté sobre materiales granulares, se debe garantizar que el factor de tránsito de la infiltración (f) sea $\leq 3 \times 10^{-10} \text{ seg}^{-1}$.

II.1.5.3 La distancia mínima del sitio a pozos para extracción de agua para uso doméstico, industrial, riego y ganadero tanto en operación como abandonados, debe estar a una distancia de la proyección horizontal por lo menos de 100 m (cien metros) de la mayor circunferencia del cono de abatimiento, siempre que la distancia resultante sea menor a 500 m (quinientos metros), esta última será la distancia a respetar.

II.1.6 Consideraciones de selección

II.1.6.1 En caso de que exista una probable contaminación a cuerpos de agua superficial y subterránea, se debe recurrir a soluciones mediante obras de ingeniería.

II.1.7 Topografía de la localidad

Dentro del municipio donde se ubique el relleno sanitario deben de señalarse las elevaciones más importantes, como un ejemplo, los cerros e indicar su altura con respecto al nivel del mar. También se deben indicar las pendientes más significativas de la localidad.

II.1.8 Uso del suelo

Se debe conocer el uso de suelo que se le da a la zona en estudio, por ejemplo, puede darse el caso que el área sea apta para la agricultura de riego o de temporal. También se puede dar el caso que sea apta para uso pecuario, como para el establecimiento de praderas cultivadas o para el pastoreo de ganado.

Se deben consultar las cartas de uso de suelo y el plan de desarrollo municipal.

II.1.9 Población

Este dato se puede obtener directamente de los censos poblacionales. También se debe indicar la tasa de crecimiento y qué porcentaje representa el municipio en donde se va a realizar la obra con respecto al total.

II.1.10 Vías de comunicación

Se deberán indicar las principales vías que comunican al municipio con otras ciudades del estado o con otras ciudades de la República. También se deberá indicar si existe ferrocarril en el estado, o si hay un puerto marítimo que faciliten la comunicación de la ciudad.

II.1.11 Centros educativos

Se deberán indicar las instituciones por nivel con las que cuenta el estado, se presenta un cuadro donde se puede observar como se deben dividir los niveles de educación.

A continuación se muestran formatos como ejemplo de la información que se requiere.

Instituciones por nivel

Nivel Escolar	Cantidad
Elemental Preescolar federal	
Elemental Preescolar particular	
Total elemental preescolar	
Elemental primaria federal	
Elemental primaria particular	
Total elemental primaria	

Secundarias	Cantidad
Federales	
Particulares	
Total	

Preparatorias	Cantidad
Federales	
Particulares	
Total	

Escuelas Normalistas	Cantidad
Federales	
Particulares	
Total	

Educación Superior	Cantidad
Federales	
Particulares	
Total	

II.1.12 Centros de salud

Se debe indicar la infraestructura con la que se cuenta para atender problemas de salud, como en el siguiente cuadro:

Infraestructura base para la salud

Institución	Hospital/Clinica
Secretaría de Salud	
IMSS	
ISSSTE	
Cruz Roja	
Particular	

II.1.13 Vivienda

La vivienda está relacionada con la tasa de crecimiento poblacional, ya que puede ocasionar un déficit o superávit en éste aspecto. Así se puede sacar una media de habitantes por vivienda. Se debe señalar los materiales usados principalmente para la construcción de viviendas, con el fin de poder establecer la división de los estratos socioeconómicos.

II.1.14 Zonas de recreo

Son las instalaciones e instituciones dedicadas a la cultura como: museos, teatros, parques recreativos, cines y centros nocturnos, por citar algunos. También la infraestructura deportiva para la práctica de cualquier deporte. La ubicación de las zonas de recreo deben estar lo suficientemente alejadas de los sitios de disposición final para no afectar la estética de estos sitios y evitar malos olores y enfermedades.

II.1.15 Actividades económicas

Pueden ser las siguientes:

- Agricultura
- Ganadería
- Industria
- Minería
- Turismo
- Comercio.

Por citar algunas, y se debe señalar la importancia que cada una de éstas actividades representa para el estado.

II.1.16 Servicios

La infraestructura de servicios la integran los hoteles y restaurantes que incluyen todas las categorías, como cocina internacional y nacional y aceptable servicio en la mayoría de los casos de transporte urbano.

II.1.17 Situación actual del sistema de recolección

Manejo de los Residuos Sólidos Municipales

Almacenamiento

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

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

Barrido

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

El barrido manual se realiza en las plazas principales y las zonas turísticas. El rendimiento del personal va de 0.6 a 2.0 km/turno de calle (1.0 a 3.0 km de cuneta),

dependiendo del apoyo del barrido mecánico, la orografía, el clima, el grado de dificultad del barrido y fundamentalmente de la cooperación de la comunidad. El costo del barrido varía de 12 a 18 \$/km, y esta sujeto a factores tales como el número de personal empleado y sus condiciones contractuales.

Recolección

La cobertura en población servida promedio a nivel nacional se estima en 78%. Para las zonas metropolitanas se ha calculado en 95%, mientras que para ciudades medias entre el 70 y 85%. En áreas urbanas pequeñas se ubica entre el 50 y 70%. Los métodos más utilizados son: el de campaneo, parada en esquina y el de acera.

La recolección por lo general se realiza en dos turnos y ocupa entre 2 y 5 trabajadores por camión incluyendo chofer y voluntarios (pepenadores), esto depende de factores como la generación por zona o sector, la concentración urbana, el grado de dificultad de la ruta así como las condiciones climáticas y topográficas de la localidad y sobre todo de las actividades de prepepena. En promedio cada jornalero (personal destinado a actividades exclusivas de recolección), recolecta entre 2 a 4 ton/turno. Los equipos más utilizados son los camiones compactadores con capacidad de 10 a 15 m³, con los cuales se recolectan de 6 a 8 toneladas por viaje. En municipios con marginalidad mayor es común encontrar que su flota de camiones son de tipo "volteo" hasta en un 50%, cuya capacidad oscila entre 6 y 8 m³ y recolectan de 1.2 a 1.6 toneladas por viaje.

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

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

Los costos de recolección en las ciudades medias varían de 120 a 230 pesos por tonelada dependiendo principalmente de la cobertura del servicio, las toneladas a recolectar, el estado físico de los camiones y el diseño de las rutas de recolección.

El cuadro 2.1 muestra información comparativa sobre la situación de recolección que guardan algunos municipios del país.

CUADRO 2.1
DIMENSIONAMIENTO DE LOS SERVICIOS DE RECOLECCIÓN DE VARIOS
MUNICIPIOS DEL PAÍS.

Municipio	Estado	Población Servida	Generación per cápita (Kg/hab/Día)	Gener. Día (Ton)	Cobertura (%)	No. de Rutas de recolección	No. de Camiones	No. Empl. Recol.	No. de emple./1000 hab.	No. de camiones/10,000 hab.
Los Cabos	Baja California Sur	63,900	1.252	80	90	10	9	18	0.254	1.268
Piedras Negras	Coahuila	135,000	0.593	80	100	15	8	48	0.356	0.593
Celaya	Guanajuato	273,750	1.096	300	75	32	20	76	0.208	0.548
Taxco de Atarcón	Guerrero	102,000	0.471	48	85	6	9	27	0.225	0.750
Naucalpan	México	855,000	1.404	1,200	95	120	120	480	0.533	1.333
Morelia	Michoacán	493,000	1.014	500	85	100	24	80	0.138	0.414
Tepic	Nayarit	293,000	1.024	300	100	27	21	126	0.430	0.717
Linares	Nuevo León	59,500	0.672	40	70	7	7	24	0.282	0.824
San Juan Bautista	Oaxaca	108,800	1.057	115	85	8	8	56	0.438	0.625
Puebla	Puebla	1,229,707	0.747	919	96	ND	75	450	0.352	0.587
Tequisquiapan	Querétaro	47,500	0.526	25	95	8	6	22	0.440	1.200
José María Morelos	Quintana Roo	18,000	0.278	5	60	2	2	ND	ND	0.667
San Luis Potosí	San Luis Potosí	552,500	1.086	600	85	ND	31	197	0.303	0.477
Puerto Peñasco	Sonora	24,000	1.250	30	60	6	6	18	0.450	1.500
Altamira	Tamaulipas	105,000	0.952	100	70	12	10	40	0.267	0.667
Huamantla	Tlaxcala	54,000	0.889	48	90	8	4	12	0.200	0.667
Zacatecas	Zacatecas	108,000	0.833	90	90	42	38	76	0.633	3.167

ND No Disponible

Fuente: Ficha de información mínima municipal

Dirección General de Infraestructura y Equipamiento Urbano

Los costos de recolección representan el 95 % de los costos totales del servicio cuando este no incluye los procesos de transferencia o disposición final controlada (Cuadro 2.2).

CUADRO 2.2
PORCENTAJES DE DISTRIBUCIÓN DE LOS COSTOS EN LOS DIFERENTES
PROCESOS

	<i>Tiradero a cielo abierto</i>	<i>Relleno sanitario sin transferencia</i>	<i>Relleno Sanitario con transferencia</i>	
	México	México	México	EUA
<i>Recolección Barrido</i>	95%	82%	53%	64%
<i>Transferencia</i>	---	---	29%	14%
<i>Disposición Final</i>	5%	18%	18%	22%
TOTAL	100%	100%	100%	100%

Transferencia

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

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

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

Las capacidades de las cajas de transferencia varían de 40 a 70 m³, por lo que en ellas se puede transportar entre 10 y 30 toneladas de residuos si se considera un peso volumétrico de 250 kg/m³. Se sabe que en las zonas metropolitanas, más del 75% de los residuos recolectados pasan por estaciones de transferencia. Ciudades como Querétaro, Qro., Cd. Juárez, Chih., Tepatitlán, Jal., San Luis Potosí, SLP, Cd. del Carmen, Camp., Guadalupe, NL, y el DF, cuentan con este tipo de instalaciones.

Los costos de la transferencia representan aproximadamente el 29% del monto total del servicio integral -considerando que opera un relleno sanitario-, los montos varían de acuerdo a la cantidad de residuos manejados y la distancia que se recorre al sitio de disposición final. Los costos tienen un amplio espectro de variación reportándose desde \$22.00 hasta \$145.00 por tonelada.

Disposición final

Se estima que se deposita de forma adecuada el 49.24% de los residuos sólidos municipales generados en el país. El resto se depositan en tiraderos a cielo abierto o en sitios clandestinos, lo que representa graves riesgos para la salud de la población y la degradación ambiental.

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

La normatividad vigente (NOM-083-ECOL-1996), busca impulsar la utilización de predios con vocación natural y establece las condiciones que deben reunir los sitios, así como el plazo de su entrada en vigor. Por lo que para el año 2000, todos los municipios deberán contar con instalaciones para realizar su disposición final adecuada de sus RSM, bajo condiciones que no produzcan molestias, afectaciones al medio ambiente ni a la salud humana.

Se cuenta con 40 rellenos sanitarios, en ciudades medias y zonas metropolitanas y 13 en localidades pequeñas, de todo el país, operando de forma satisfactoria y el resto de los sitios no cumple con las normas mínimas por lo que se consideran tiraderos a cielo abierto.

En la frontera norte del país, se estima una generación de 192 mil toneladas mensuales, de las cuales se recolecta aproximadamente el 73%. De esta generación, solo el 64.42% se deposita en rellenos sanitarios; Tijuana, Nogales, Cd. Juárez, y Nuevo Laredo entre otros, lo que significa que más de 68,000 toneladas mensuales, permanecen en tiraderos a cielo abierto

Las 83,831 toneladas diarias de basura que se producen en el país, requerirían 111,775 m³ por día para depositarlas. Esto da una idea de la necesidad de terreno y de la importancia de diseñar estrategias para su manejo integral que incluya acciones como reducir la cantidad de basura desde la fuente.

Los costos de operación de un relleno sanitario tienen un amplio espectro de variación dependiendo del volumen de residuos a disponer, el origen de los recursos empleados para la construcción del relleno y el nivel de responsabilidad asignado a quien lo opera, entre otros. Quizás el más significativo de estos factores sea el volumen de residuos a disponer ya que en los costos de operación e inversión aplican fuertemente las economías

de escala, por lo que las autoridades estatales y federales han puesto mucho énfasis en la construcción de rellenos sanitarios regionales, cuando las distancias entre los diferentes centros de población lo permiten. Los costos de operación de un relleno sanitario en nuestro país representan aproximadamente el 18% del costo total del proceso.

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

En el cuadro 2.3 se presentan algunos municipios que cuentan con rellenos sanitarios con eficientes sistemas de administración y operación.

CUADRO 2.3
MUNICIPIOS CON RELLENO SANITARIO

LOCALIDAD	ESTADO
Bordo Poniente	D.F.
Querétaro	Qro.
Cancun (Benito Juárez)	Q. Roo
Tequisquiapán	Qro.
Zona metropolitana de Monterrey (SIMEPRODE)	N.L.
Cd. Juárez	Chih.
Nuevo Laredo	Tamps.

Fuente: Instituto Nacional de Ecología

Tratamiento

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

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

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

El cuadro 2.4 muestra las tendencias mundiales de los diferentes procesos de tratamiento y la disposición final en el mundo.

CUADRO 2.4
TENDENCIAS MUNDIALES DE DIFERENTES TRATAMIENTOS
(Cifras expresadas en porcentaje)

PAIS	Relleno Sanitario	Incineración	Composteo	Reciclaje
E.U.A.	73	14	1	12
JAPON	27	25	2	46
ALEMANIA	52	30	3	15
FRANCIA	48	40	10	2
SUECIA	40	52	5	3
MÉXICO	94	---	---	6 al 10

Fuente: Instituto Nacional de Ecología

II.1.18 Organismo operador

El servicio de limpia es proporcionado como prestación directa del municipio, a través de la Dirección de Servicios Públicos Municipales, por lo que no existe un organismo con una estructura administrativa mínima que permita una operación eficiente a bajo costo, sino un departamento de limpia, enclavado en la compleja organización municipal, en donde sus recursos administrativos son escasos.

De acuerdo con la metodología del desarrollo institucional, la situación del departamento de limpia con respecto a cada uno de los elementos de la estructura administrativa se describe a continuación.

Planeación

No se efectúan los estudios tendientes a formular los planes de desarrollo a corto, mediano y largo plazo. El ejemplo más representativo de esta deficiencia es la inexistencia de estudios de generación, de forma que el sistema de limpia desconoce la generación media de la población, que es el parámetro básico para la planeación a corto, mediano y largo plazos.

Como se carece de información, no se propicia la retroalimentación, comparación y consecuente evaluación para detectar posibles desviaciones y poder dar elementos para la toma de decisiones y aplicar medidas correctivas.

De los tres subsistemas en que pueden dividirse la planeación (física, organizacional y económico-financiera), sólo se hacen algunas actividades en forma parcial e imprecisa. Por ejemplo, se tienen planteadas necesidades de equipo, pero si se desconocen datos de generación de residuos, entonces cómo saber que la cantidad de vehículos presupuestados es suficiente o, por el contrario, excesiva.

Administración

Esta área se refiere a la administración de los recursos humanos, materiales y financieros.

En cuanto a los recursos humanos, la mayoría de los municipios requieren un gran impulso y apoyo formativo para considerar los aspectos de selección, contratación, capacitación, integración y desarrollo en los distintos niveles de operación. Asimismo carecen de estadísticas relativas a accidentes de trabajo y rotación de personal, entre otros.

Con respecto a recursos materiales, se tienen carencias, por lo que debe dotarse de los bienes y servicios necesarios para la operación y mantenimiento al sistema de aseo urbano.

Por lo que toca al aspecto financiero, no existen datos tales como: estudios de flujo de caja, de amortización de equipo, de costos de operación y mantenimiento, de estadísticas y costos derivados de accidentes de trabajo, así como los costos de ciertos parámetros básicos, como por ejemplo, costo por tonelada dispuesta, costo unitario del servicio de recolección, transporte y disposición por habitante servido, costo de mantenimiento contra costos totales de servicio, etc. Toda esta información es indispensable para la toma de decisiones y además permite comparar las eficiencias de los diferentes servicios; sin embargo, se carece de ella.

La situación financiera puede resumirse en los siguientes puntos:

1. Los pagos que hace el usuario por el servicio se encuentran diluidos entre el impuesto predial y por tanto se ignora a cuanto asciende el ingreso global y si es o no suficiente para cubrir el servicio.
2. Por lo ineficiente del servicio, es probable que los ingresos por concepto del servicio de limpia sean inferiores a los costos reales del servicio.
3. No existe una tarifa específica para la prestación del servicio de limpia.
4. No cuenta con los recursos humanos necesarios para elaborar una planeación financiera sana a corto plazo. En el mejor de los casos se programa para un año.
5. Se depende de subsidios del Gobierno Estatal.

Comercialización

No se efectúan las actividades básicas de la comercialización, que son el catastro de usuarios, la medición de volúmenes y la facturación para cobro de venta y sus servicios prestados.

De manera semejante, no se efectúa la promoción y venta o comercialización de subproductos obtenidos en la recolección, ya que el sistema de limpia desconoce el potencial comercial de sus residuos sólidos.

Operación

Este sistema comprende el conjunto de actividades necesarias para operar los elementos funcionales del sistema: recolección, barrido, transporte, tratamiento en su caso, y disposición final de los residuos sólidos así como el mantenimiento de los equipos e instalaciones utilizados.

Conclusiones

En forma general en México se presenta la siguiente problemática:

1. El departamento de limpia no tiene la estructura organizativa adecuada desde el punto de vista administrativo.
2. En lo que se refiere al aspecto financiero, es una unidad dependiente del municipio.
3. La prestación del servicio carece de una tarifa específica.

4. No existe un sistema de recolección planificado para el corto, mediano y largo plazo tendiente a minimizar los costos del servicio.
5. No existe estandarización en el equipo de recolección, siendo además insuficiente.
6. No existe adiestramiento para el personal de mano de obra, técnico y directivo.

II.2 Generación de residuos sólidos

El diseño y operación de un sistema de manejo de residuos sólidos está determinado en gran medida por la generación, parámetro que debe obtenerse mediante un estudio que es específico para cada población, ya que la cantidad de residuos sólidos depende de: ubicación geográfica, clima, grado cultural de la población, situación económica, estación del año, principales actividades económicas de la localidad y hábitos de consumo.

II.2.1 Generación y composición de los residuos

Generación y composición de los residuos.

Si bien la generación percapita de RSM en nuestro país, es inferior a la generación de otros países del mundo, su volumen diario sobrepasa las capacidades instaladas de los municipios (Cuadro 2.5).

CUADRO 2.5
TASA DE GENERACIÓN PER CÁPITA EN DIFERENTES PAÍSES.

PAÍS	GENERACIÓN PER CÁPITA (Kg/hab/día)
E.U.A.	1.97
Canadá	1.9
Finlandia	1.69
Holanda	1.3
Suiza	1.2
Japón	1.12
México	0.853

Fuente: Instituto Nacional de Ecología

La generación de residuos sólidos varía de 0.68 a 1.33 kg/hab/día. Los valores inferiores corresponden a zonas en su mayoría semirurales o rurales, mientras que los valores superiores, representan la generación para zonas metropolitanas como el Distrito Federal (Cuadro 2.6).

CUADRO 2.6
GENERACIÓN ANUAL POR ZONA GEOGRÁFICA

ZONA	POBLACIÓN Proyección 1998	GENERACIÓN PER CAPITA (Kg/hab/día)	GENERACIÓN DIARIA (TON)	GENERACIÓN ANUAL (TON)
Centro	51,117,711	0.788	40,281	14,702,565
D.F.	8,683,824	1.329	11,541	4,212,465
Norte	19,501,930	0.891	17,376	6,342,240
Sur	12,615,849	0.679	8,328	3,039,721
Frontera Norte	6,347,055	0.956	6,067	2,214,455
NACIONAL	98,266,369	0.853	83,831	30,598,315

Fuente: Instituto Nacional de Ecología

La tendencia de incremento de generación se estima que puede variar de 1 a 3% anual dependiendo de la localidad. La zona centro junto con el Distrito Federal producen el 62 % de los residuos generados en el país (Figura 2.1).

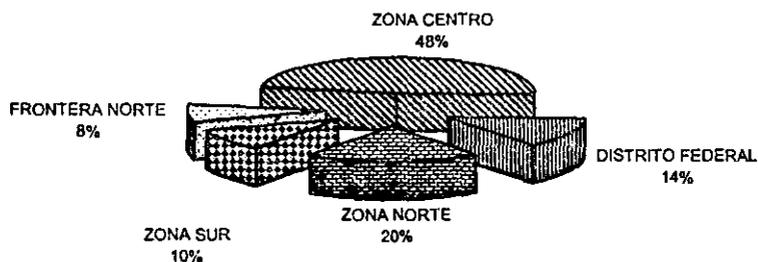


Figura 2.1 Distribución porcentual de la generación de residuos en las diferentes zonas del país.

La composición de los residuos sólidos municipales (RSM) no es homogénea en todo el territorio nacional (Cuadro 2.7), sino que responde a la distribución de hábitos de consumo y poder adquisitivo de la población. Así la composición en la zona sur del país tiene mayores contenidos de residuos de jardinería -estados como Chiapas y Tabasco -, mientras que en las zonas urbanas este mismo producto aparece en menor proporción.

CUADRO 2.7
COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS POR ZONA GEOGRÁFICA
(valores en %)

SUBPRODUCTO	FRONTERA NORTE	NORTE	CENTRO	SUR	D.F.
Cartón	3.973	4.366	1.831	4.844	5.36
Residuos finos	1.369	2.225	3.512	8.075	1.21
Hueso	0.504	0.644	0.269	0.25	0.08
Hule	0.278	0.2	0.087	0.35	0.2
Lata	2.926	1.409	1.7	2.966	1.58
Material ferroso	1.183	1.476	0.286	0.399	1.39
Material no ferroso	0.226	0.652	0.937	1.698	0.06
Papel	12.128	10.555	13.684	8.853	14.58
Pañal desechable	6.552	8.308	6.008	5.723	3.37
Plástico película	4.787	5.12	1.656	1.723	6.24
Plástico rígido	2.897	3.152	1.948	1.228	4.33
Residuos alimenticios	26.972	21.271	38.538	16.344	34.66
Residuos de jardinería	16.091	19.762	7.113	26.975	5.12
Trapo	1.965	2.406	0.807	2.157	0.64
Vidrio de color	2.059	0.934	4.248	0.599	4
Vidrio transparente	4.59	5.254	5.051	3.715	6.77
Otros	11.5	12.267	12.326	14.102	10.41
Total	100	100	100	100	100

Fuente: Instituto Nacional de Ecología

La evolución en la composición de los subproductos durante el período 1991 a 1997 muestra un incremento importante en productos desechables como plástico, papel y vidrio, 4.57, 3.06 y 1.14 % respectivamente, mientras que en los residuos orgánicos -residuos de comida y jardinería principalmente- han tenido un decremento del 7.62% (Cuadro 2.8).

CUADRO 2.8
EVOLUCION DE LA COMPOSICIÓN DE SUBPRODUCTOS EN EL PERÍODO
1991 A 1997 (valores en %)

COMPOSICIÓN	AÑO		
	1991	1997	Diferencia en el periodo
Papel, cartón y productos de papel	14.07	17.13	3.06
Textiles	1.49	2.15	0.66
Plásticos	4.38	8.95	4.57
Vidrio	5.9	7.04	1.14
Metales	2.9	3.82	0.92
Residuos de comida, jardinería y materiales similares (orgánicos)	52.4	44.78	-7.62
Otros tipos de residuos variados: residuos finos, hule, pañal desechable, etc.	18.86	16.13	-2.73
TOTAL	100	100	

Fuente: Instituto Nacional de Ecología

Un factor importante a considerar en la selección de alternativas de manejo de los RSM es su peso volumétrico in situ. Este puede variar de 170 a 330 kg/m³ sin compactar y depende en gran medida del contenido de materia orgánica y su grado de humedad.

II.2.2 Generación de Residuos por Estado

A continuación se presentará en forma sinóptica la generación de residuos municipales, en localidades con más de 100,000 habitantes; ésta información se obtuvo del sitio de INEGI en internet.

B. Calif. Sur

ENTIDAD	POBLACIÓN 1997	GENERACION (TONS/AÑO)	GENERACION (KG/HAB/DIA)
La Paz	195,866	59,168	0.828
Total	195,866	59,168	0.828

B. Calif. N.

ENTIDAD	POBLACION 1997	GENERACION (TONS/AÑO)	GENERACION (KG/HAB/DIA)
Ensenada	314,331	126,695	1.104
Mexicali	721,001	177,603	0.675
Tijuana	908,238	342,813	1.034
Total	1,943,570	647,111	2.813

Sonora

ENTIDAD	POBLACION 1997	GENERACION (TONS/AÑO)	GENERACION (KG/HAB/DIA)
Cajeme	365,572	108,058	0.810
Guaymas	152,773	47,096	0.845
Hermosillo	551,898	162,629	0.807
Navojoa	149,226	47,582	0.874
Nogales	130,092	49,144	1.035
San Luis Río Colorado	133,689	47,582	0.975
Total	1,483,250	462,091	2.884

Chihuahua

ENTIDAD	POBLACION 1997	GENERACION (TONS/AÑO)	GENERACION (KG/HAB/DIA)
Ciudad Cuahutémoc	129,729	40,092	0.847
Ciudad Juárez	943,107	300,477	0.873
Chihuahua	639,606	194,049	0.831
Delicias	121,510	38,159	0.860
Hidalgo del Parral	104,438	30,643	0.804
Total	1,938,390	603,420	2.495

Coahuila

ENTIDAD	POBLACION 1997	GENERACION (TONS/AÑO)	GENERACION (KG/HAB/DIA)
Monclova	215,375	64,563	0.821
Piedras Negras	117,262	27,974	0.654
Saltillo	542,695	163,233	0.824

Torreón	550,924	165,294	0.822
Total	1,426,256	421,064	2.300

Nuevo León

ENTIDAD	POBLACION 1997	GENERACION (TONS/AÑO)	GENERACION (KG/HAB/DIA)
Ciudad Apodaca	151,266	50,166	0.909
General Escobedo	124,173	32,539	0.718
Monterrey	1,231,509	570,228	1.269
San Nicolás de los Garza	531,585	176,258	0.908
San Pedro Garza García	127,104	42,144	0.908
Santa Catarina	208,590	69,163	0.908
Total	2,374,227	940,498	2.725

Tamaulipas

ENTIDAD	POBLACION 1997	GENERACION (TONS/AÑO)	GENERACION (KG/HAB/DIA)
Ciudad Madero	186,046	87,802	1.293
Ciudad Mante	138,772	44,075	0.870
Ciudad Victoria	251,765	83,433	0.908
Matamoros	365,761	145,570	1.090
Nuevo Laredo	247,982	84,649	0.935
Reynosa	340,923	94,981	0.763
Río Bravo	105,383	37,310	0.970
Tampico	304,380	124,475	1.120
Total	1,941,012	702,295	2.854

Sinaloa

ENTIDAD	POBLACION 1997	GENERACION (TONS/AÑO)	GENERACION (KG/HAB/DIA)
Culiacán	759,044	203,411	0.734
Mazatlán	383,975	150,517	1.074
Los Mochis	322,577	78,497	0.667
Total	1,465,596	432,425	2.475

Durango

ENTIDAD	POBLACION 1997	GENERACION (TONS/AÑO)	GENERACION (KG/HAB/DIA)
Durango	507,206	121,560	0.657
Gómez Palacio	285,027	88,475	0.850
Total	792,233	210,035	1.507

Zacatecas

ENTIDAD	POBLACION 1997	GENERACION (TONS/AÑO)	GENERACION (KG/HAB/DIA)
Fresnillo	196,988	48,328	0.672
Guadalupe	98,156	19,862	0.554
Zacatecas	132,979	32,624	0.672
Total	428,123	100,814	1.899

San Luis Potosí

ENTIDAD	POBLACION 1997	GENERACION (TONS/AÑO)	GENERACION (KG/HAB/DIA)
Ciudad Valles	156,749	46,190	0.807
San Luis Potosí	594,813	199,385	0.918
Soledad de Graciano	167,047	54,407	0.892
Total	918,609	299,982	2.618

Veracruz

ENTIDAD	POBLACION 1997	GENERACION (TONS/AÑO)	GENERACION (KG/HAB/DIA)
Boca del Río	346,256	105,371	0.834
Coatzacoalcos	297,079	113,994	1.051
Córdoba	178,175	40,491	0.623
Minatitlán	240,088	64,959	0.741
Orizaba	128,426	37,153	0.793
Poza Rica de Hidalgo	171,562	52,117	0.832
Tuxpan	138,872	43,036	0.849
Veracruz	373,409	114,005	0.836
Xalapa	348,193	106,181	0.835
Total	2,222,060	677,307	2.521

Nayarit

ENTIDAD	POBLACION 1997	GENERACION (TONS/AÑO)	GENERACION (KG/HAB/DIA)
Tepic	293,215	76,735	0.717
Total	293,215	76,735	0.717

Aguascalientes

ENTIDAD	POBLACION 1997	GENERACION (TONS/AÑO)	GENERACION (KG/HAB/DIA)
Aguascalientes	637,555	130,312	0.560
Total	637,555	130,312	0.560

Guanajuato

ENTIDAD	POBLACION 1997	GENERACION (TONS/AÑO)	GENERACION (KG/HAB/DIA)
Celaya	390,035	120,438	0.846
Guanajuato	141,686	52,352	1.012
Irapuato	386,382	118,988	0.844
León	1,077,609	294,159	0.748
Salamanca	251,933	77,098	0.838
Silao	134,007	42,912	0.877
Total	2,381,652	705,857	2.464

Querétaro

ENTIDAD	POBLACION 1997	GENERACION (TONS/AÑO)	GENERACION (KG/HAB/DIA)
San Juan del Río	162,395	44,257	0.747
Querétaro	592,480	220,196	1.018
Total	754,875	264,453	1.765

Hidalgo

ENTIDAD	POBLACION 1997	GENERACION (TONS/AÑO)	GENERACION (KG/HAB/DIA)
Pachuca de Soto	215,272	67,216	0.855
Tulancingo	114,041	34,700	0.834
Total	329,313	101,916	1.689

Jalisco

ENTIDAD	POBLACION 1997	GENERACION (TONS/AÑO)	GENERACION (KG/HAB/DIA)
Guadalajara	1,861,834	704,892	1.037
Lagos de Moreno	132,979	48,296	0.995
Puerto Vallarta	144,621	53,153	1.007
Tlaquepaque	421,570	120,403	0.782
Tonalá	222,357	62,905	0.775
Zapopan	913,364	253,264	0.760
Total	3,696,725	1,242,913	2.317

Michoacán

ENTIDAD	POBLACION 1997	GENERACION (TONS/AÑO)	GENERACION (KG/HAB/DIA)
Apatzingan	115,869	35,647	0.843
Lázaro Cárdenas	175,670	54,098	0.844
Morelia	616,625	247,198	1.098
Uruapan	264,323	80,051	0.830
Zamora	170,914	54,266	0.870
Zitácuaro	125,205	35,150	0.769
Total	1,468,606	506,410	2.469

Colima

ENTIDAD	POBLACION 1997	GENERACION (TONS/AÑO)	GENERACION (KG/HAB/DIA)
Colima	136,638	41,577	0.834
Manzanillo	111,321	50,738	1.249
Total	247,959	92,315	2.082

**Estado de
México**

ENTIDAD	POBLACION 1997	GENERACION (TONS/AÑO)	GENERACION (KG/HAB/DIA)
Atizapán de Zaragoza	381,766	124,284	0.892
Coacalco	186,399	68,894	1.013
Cuautitlán Izcalli	391,363	140,561	0.984
Chalco	352,215	1,242,301	9.663

Chimalhuacán	315,801	107,236	0.930
Ecatepec de Morelos	1,476,598	339,139	0.629
Huixquilucan	160,304	64,475	1.102
Ixtapaluca	169,832	60,996	0.984
La Paz	170,832	62,947	1.010
Metepec	172,238	66,569	1.059
Naucalpan de Juárez	907,616	253,057	0.764
Nezahualcoyotl	1,433,257	424,852	0.812
Nicolás Romero	236,483	87,137	1.010
Tecamac	151,522	55,723	1.008
Texcoco	169,535	62,348	1.008
Tlalnepantla	798,698	281,643	0.966
Toluca	614,472	202,652	0.904
Tultitlán	290,721	94,645	0.892
Total	8,379,652	3,739,459	2.762

Distrito Federal

ENTIDAD	POBLACION 1997	GENERACION (TONS/AÑO)	GENERACION (KG/HAB/DIA)
Distrito Federal	9,693,248	4,749,703	1.342
Total	9,693,248	4,749,703	1.342

Tlaxcala

ENTIDAD	POBLACION 1997	GENERACION (TONS/AÑO)	GENERACION (KG/HAB/DIA)
Tlaxcala	59,312	18,711	0.864
Total	59,312	18,711	0.864

Morelos

ENTIDAD	POBLACION 1997	GENERACION (TONS/AÑO)	GENERACION (KG/HAB/DIA)
Cuautla	218,306	70,718	0.888
Cuernavaca	416,038	156,597	1.031
Jiutepec	127,681	40,279	0.864
Total	762,025	267,594	2.783

Puebla

ENTIDAD	POBLACION 1997	GENERACION (TONS/AÑO)	GENERACION (KG/HAB/DIA)
Atlixco	119,170	46,363	1.066
Tehuacán	188,205	58,052	0.845
Puebla de Zaragoza	1,307,191	471,337	0.988
Total	1,614,566	575,752	2.899

Guerrero

ENTIDAD	POBLACION 1997	GENERACION (TONS/AÑO)	GENERACION (KG/HAB/DIA)
Acapulco de Juárez	745,873	307,719	1.130
Chilpancingo	163,351	33,154	0.556
Iguala	116,057	45,988	1.086
Taxco de Alarcón	103,360	45,612	1.209
Total	1,128,641	432,473	2.851

Oaxaca

ENTIDAD	POBLACION 1997	GENERACION (TONS/AÑO)	GENERACION (KG/HAB/DIA)
Oaxaca de Juárez	256,650	93,609	0.999
Total	256,650	93,609	0.999

Tabasco

ENTIDAD	POBLACION 1997	GENERACION (TONS/AÑO)	GENERACION (KG/HAB/DIA)
Villahermosa	480,059	130,172	0.743
Total	480,059	130,172	0.743

Chiapas

ENTIDAD	POBLACION 1997	GENERACION (TONS/AÑO)	GENERACION (KG/HAB/DIA)
Tapachula	270,560	98,669	0.999
Tuxtla Gutierrez	364,345	111,286	0.837
Total	634,905	209,955	1.836

Campeche

ENTIDAD	POBLACION 1997	GENERACION (TONS/AÑO)	GENERACION (KG/HAB/DIA)
Campeche	206,839	51,342	0.680
Ciudad del Carmen	219,446	67,806	0.847
Total	426,285	119,148	1.527

Yucatán

ENTIDAD	POBLACION 1997	GENERACION (TONS/AÑO)	GENERACION (KG/HAB/DIA)
Mérida	678,088	313,912	1.268
Total	678,088	313,912	1.268

Quintana Roo

ENTIDAD	POBLACION 1997	GENERACION (TONS/AÑO)	GENERACION (KG/HAB/DIA)
Cancún	219,654	119,039	1.485
Chetumal	115,225	35,544	0.845
Total	334,879	154,583	2.330

Conclusiones

Los estados que presentan mayor generación de residuos sólidos son aquellos que cuentan con una gran afluencia de turismo, como Guerrero, Quintana Roo, Morelos y que además cuentan con industrias, tal es el caso de estados como San Luis Potosí, el Estado de México, Michoacán, Veracruz, Guanajuato y Nuevo León.

II.2.3 Recomendaciones

1. Se debe dar al departamento de limpia una estructura organizativa adecuada desde el punto de vista administrativo.

2. Debe calcularse y aplicarse una tarifa específica para la prestación del servicio.
3. Debe planificarse el sistema de recolección para el corto, mediano y largo plazos con el fin de minimizar los costos del servicio.
4. Procurar la estandarización en el equipo de recolección y adquirir el necesario para satisfacer la totalidad de la población.
5. Efectuar un programa de capacitación para el personal directivo, técnico y de mano de obra.
6. Por lo que se refiere al reciclaje, elaborar estudios de los residuos sólidos generados en los municipios en forma constante que permitan elegir algún tipo de separación, previo análisis beneficio-coste.
7. Controlar la pepena en el sitio de disposición final con el fin de proporcionar a las personas que se dedican a ello condiciones adecuadas de salud y seguridad.
8. Elaborar un padrón de usuarios del servicio de limpia, clasificándolos en domiciliarios y no domiciliarios, con el objeto de establecer tarifas y cuotas según el tipo de residuos por recolectar y disponer.

II.3 Situación actual de la disposición final

II.3.1. Características del sitio

La disposición sobre o en el suelo es, al presente, el único método viable para la disposición a largo plazo de: (1) residuos sólidos que son recolectados y que no pueden tener uso posterior, (2) material residual remanente después que los residuos sólidos han sido procesados, y (3) la materia residual remanente después de la recuperación o conversión de productos, incluyendo producción de energía.

En el Cuadro 2.9 se puede observar la extensión que ocupan los tiraderos de basura a cielo abierto y los rellenos sanitarios en la actualidad en cada estado de la República Mexicana; así como, el volumen de recolección de basura y los vehículos disponibles para ese fin.

Cuadro 2.9
Superficies de tiraderos a cielo abierto y rellenos sanitarios

Estado	Superficie de los tiraderos de bsaura a cielo abierto (ha)	Superficie de los rellenos sanitarios (ha)	Volumen de recolección de basura (miles de toneladas)	Vehículos recolectores
Aguascalientes	10.37	4	269.102	67
Baja California N.	ND	ND	ND	ND
Baja California S.	43	50	88.1	76
Campeche	135.5	ND	114.6	37
Chiapas	78	10	383	96
Chihuahua	609.5	288.3	867.3	302
Coahuila	147.2	170	595.2	211
Colima	23.1	43	209.2	95
Distrito Federal	37	ND	4325.25	2011
Durango	86.2	75.73	221.557	94
Guanajuato	25.4	1.8	1283.9	386
Guerrero	55	2.5	852.7	164
Hidalgo	88.37	20.40	ND	ND
Jalisco	ND	ND	ND	ND
México	ND	ND	ND	ND
Michoacán	ND	ND	182.5	57
Morelos	103.2	12	712.67	139
Nayarit	ND	ND	ND	ND
Nuevo León	ND	ND	1134.28	364
Oaxaca	105	18	160.9	76
Puebla	ND	ND	ND	ND
Querétaro	29	31	379	167
Quintana Roo	50	57	465	92
Sinaloa	ND	ND	ND	ND
Sonora	ND	ND	ND	ND
Tabasco	90.75	11.7	356.59	142
Tlaxcala	ND	51.9	1307.43	154
Veracruz	232.5	95	3629.72	320
Yucatán	140.3	ND	123.56	288
Zacatecas	ND	ND	ND	ND
Total	2089.39	942.33	17661.56	5338

ND: No disponible

Fuente: Anuario Estadístico del INEGI 2000

Se puede apreciar en el Cuadro 2.9 que la superficie para tiraderos a cielo abierto es mucho más extensa que la ocupada por los rellenos sanitarios y que además el volumen generado de basura es demasiado para la poca cantidad de vehículos recolectores que operan en el país. Son insuficientes los vehículos para recolectar la basura.

II.3.2. Características operativas

La forma de operación de un tiradero puede ser conforme al método “de área” con las particularidades que se muestran en el Cuadro siguiente, a manra de ejemplo se propone un relleno sanitario en la Ciudad de Irapuato.

TIRADERO DE RESIDUOS SOLIDOS DE IRAPUATO, GUANAJUATO	RELLENO SANITARIO IDEAL
1. No se tiene un proyecto	1. Se elabora un proyecto de relleno sanitario, incluyendo las etapas de planeación, diseño, construcción, operación y abandono al término de la vida útil
2. Los residuos se van descargando de los vehículos de recolección y se amontonan para su manejo con maquinaria	2. Para iniciar el proceso el sitio elegido para frente de trabajo se prepara impermeabilizándolo.
3. Cuando se han amontonado todos los residuos de la jornada se forma la celda y se cubren con material productos de la excavación. Los residuos no se esparcen en capas delgadas, y no siempre se cubren al final de la jornada.	3. Los residuos se colocan esparciéndolos en capas delgadas compactándolas.
4. Se continúa avanzando sobre la celda rellenando y cubriendo cada día	4. Al final de la jornada, los residuos se cubren con tierra. 5. La operación continúa hasta alcanzar la altura proyectada.

El relleno sanitario se define como un sitio en el que se emplea un método ingenieril de disposición de residuos sólidos en el suelo, de manera que se minimicen riesgos ambientales esparciendo y compactando los residuos sólidos hasta su más pequeño volumen práctico y aplicando y compactando material de cobertura al fin de cada jornada de trabajo.

Una adecuada compactación y cobertura de los residuos son los factores más importantes para conseguir el control de olores, insectos y roedores así como de incendios.

II.3.3. Problemática ambiental

En donde se elija el sitio para la disposición final debe estudiarse si hay algún riesgo en cuanto a la infiltración del lixiviado hacia los mantos acuíferos. Debe estudiarse posibles infiltraciones tanto verticales como horizontales para impedir la contaminación de acuíferos regionales.

Adicionalmente se tienen otros impactos adversos tales como los consabidos malos olores, existencia de fauna nociva, contaminación atmosférica por gases y partículas, pepena no controlada, etc.

II.4 Marco legal

II.4.1 La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos

El Artículo 115 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos establece que el municipio es la base de la división territorial y de la organización política y administrativa de los estados miembros de la Federación.

Asimismo, asigna facultades y atribuciones específicas a los municipios, encaminadas a la atención de los servicios públicos y al desempeño de las tareas de Administración Pública en el ámbito de su competencia.

El mismo artículo establece que los municipios serán investidos de personalidad jurídica para todos los efectos legales: "...Cada municipio será administrado por un Ayuntamiento de elección popular directa y no habrá ninguna autoridad intermedia entre éste y el gobierno del Estado".

La Fracción II del Artículo 115 establece que: "Los municipios administrarán libremente su hacienda, la cuál se formará de las contribuciones que señalen las legislaturas de los estados y que, en todo caso, serán las suficientes para atender las necesidades municipales".

Por otra parte, la Fracción XXIX del Artículo 73 señala que el Congreso tiene facultad para establecer impuestos o contribuciones especiales sobre diversas actividades y precisa que: "...las entidades federativas participarán en el rendimiento de estas contribuciones especiales en la proporción que la Ley secundaria federal determine".

La Fracción VIII del Artículo 117 establece que: "los estados y municipios no podrán celebrar empréstitos, sino para la ejecución de obras que estén destinadas a producir directamente un incremento en sus respectivos ingresos".

El Artículo 115, Fracción IV señala que: "...los estados y municipios, en el ámbito de sus competencias, expedirán leyes, reglamentos y disposiciones administrativas que sean necesarias para cumplir con los fines señalados en el párrafo tercero del Artículo 27 de la Constitución, y más adelante, en la Fracción V agrega: "...cuando dos o más centros urbanos situados en territorios municipales de dos o más entidades federativas formen o tiendan a formar una continuidad geográfica, la Federación, las entidades federativas y los municipios respectivos, en el ámbito de su competencia, planearán y regularán de manera conjunta y coordinada el desarrollo de dichos centros con apego a la Ley Federal de la Materia.

Adicionalmente, por lo que se refiere a los deberes ciudadanos, el Artículo 31, Fracción IV señala: "...contribuir para los gastos públicos, así de la Federación como del estado y municipio en que residan, de la manera proporcional y equitativa que dispongan las leyes".

II.4.2 Las Constituciones Estatales

Las Constituciones Políticas de cada estado de la República dedican un capítulo específico al municipio, en el cual consignan el número, denominación y límites de dichos municipios, la categoría de sus poblados, las condiciones para la creación o supresión de un municipio, el patrimonio y la hacienda pública municipal, la integración, elecciones, instalación y duración de los ayuntamientos como de las dependencias municipales.

Es importante señalar que las disposiciones contenidas en las constituciones estatales, son de carácter general y contemplan la necesidad de la existencia de una ley específica que trate en mayor detalle todo lo referente al municipio.

II.4.3 Las Leyes Orgánicas Municipales

Las Leyes Orgánicas Municipales, llamadas en algunos casos Códigos Municipales, tienen su base en las constituciones locales y son expedidas por los congresos estatales. Estas normas jurídicas contienen las disposiciones que regulan la vida municipal y se refieren principalmente a: funcionamiento, facultades y obligaciones de los Ayuntamientos, así como facultades y obligaciones de los servidores públicos, integración de comisiones, principales dependencias de la administración municipal, servicios públicos municipales, condiciones para contratar, realizar empréstitos, adquirir o enajenar bienes.

La Ley Orgánica también establece lo referente a la expedición de reglamentos y bandos específicos, las sanciones, medidas de seguridad y recursos administrativos y las condiciones y facultades para celebrar convenios de coordinación con otros municipios, con el Estado y la Federación.

II.4.4 Los reglamentos municipales

De acuerdo a los párrafos anteriores, los Ayuntamientos tienen la facultad reglamentaria, apoyada en las respectivas constituciones de los estados y en las leyes orgánicas municipales.

Entre los reglamentos que expiden los municipios se tienen los que establecen y regulan la organización y funcionamiento de los servicios públicos.

La importancia de los reglamentos municipales es singular, y de ella se deriva la forma en que operan el Ayuntamiento, sus servicios y los particulares en relación con la vida comunitaria.

II.4.5 Plan de desarrollo municipales

Cada municipio, en sus planes de desarrollo, contempla la expansión de su territorio habitado y de cultivo. Para poder hacer esto requiere seguir las recomendaciones de la Norma Oficial Mexicana NOM-083-ECOL-1997 para que su crecimiento no se vea limitado por la ubicación, en este caso de un relleno sanitario.

Su localización debe ser alejada de la zona donde el municipio vaya a crecer para evitar la contaminación del acuífero, malos olores, enfermedades, daños a cultivos y a la fauna y flora en general.

II.4.6 Normas

La NOM-083-ECOL-1997 establece las características que debe reunir el sitio para la disposición final de los RSM. Entre los puntos más importantes se tiene:

- Respetar el derecho de vía de autopistas, ferrocarriles, caminos principales y caminos secundarios.
- No se deben ubicar sitios dentro de áreas naturales protegidas.
- Se debe localizar fuera de zonas donde los taludes sean inestables, es decir que puedan producir movimientos de suelo o roca, por procesos estáticos y dinámicos.
- Se deben respetar los derechos de vía de obras públicas federales, tales como oleoductos, gasoductos, polductos, torres de energía eléctrica, acueductos, etc.
- El sitio de disposición final de residuos sólidos municipales no se debe ubicar en zonas de pantanos, marismas y similares.

Es de importancia explicar en qué consiste el Método de Cuarteo para la recolección y almacenaje de desechos sólidos.

Método de cuarteo:

1. Se toman bolsas de polietileno conteniendo los residuos sólidos, resultado del estudio de generación.
2. Las bolsas se vacían formando un montón sobre un área plana horizontal de 4 m por 4 m.

3. El montón de residuos sólidos se traspalea con pala y biello, hasta homogeneizarlo, después se divide en 4 partes iguales, se eliminan dos partes opuestas, de una de las partes restantes se llena un tambo de 200 lts hasta el tope con residuos homogeneizados obtenidos.
4. Se golpea el recipiente contra el suelo tres veces dejándolo caer desde una altura aproximada de 10 cm.
5. Nuevamente se agregan residuos sólidos hasta el tope, teniendo cuidado de presionar al colocarlos en el recipiente, esto con el fin de no alterar el peso volumétrico.
6. Se toman la medidas necesarias al colocar los residuos sólidos para que sean incluidos los finos.
7. Para obtener el peso neto de los residuos, se pesa el recipiente lleno y se le resta la tara.
8. Una vez obtenido el peso neto, éste es dividido entre el volumen correspondiente del tambo (m^3) y se presenta el resumen de los pesos volumétricos obtenidos durante la semana del muestreo.

Capítulo 3
Modelo de Generación, Control
y Tratamiento de Biogas

Antecedentes

En este capítulo se tratarán los temas que a continuación se enlistan.

- Composición y características del biogas.
- Generación del biogas.
- Control Pasivo del biogas.
- Control Activo del biogas con facilidades perimetrales.
- Control activo del biogas con pozos de extracción de gas horizontales y verticales.
- Administración del biogas.

Un relleno sanitario puede ser conceptualizado como un reactor bioquímico, con desecho sólido y agua como sus más importantes entradas, y con biogas y lixiviados como sus principales salidas. El material almacenado en el relleno incluye parcialmente materia orgánica biodegradada y otros desechos inorgánicos originalmente colocados en el relleno. Los sistemas de control de biogas son empleados para prevenir movimientos indeseados de biogas hacia la atmósfera o el movimiento lateral o vertical a través del suelo que lo rodea. El biogas recuperado puede ser usado para producir energía o puede ser acampanado bajo condiciones controladas para eliminar la descarga de constituyentes dañinos a la atmósfera.

III.1 Composición y características del biogas

El biogas esta compuesto de una variedad de gases que se presentan en cantidades grandes (gases principales) y una variedad de gases que se presentan en cantidades pequeñas cantidades (gases secundarios). Los gases principales son producidos de la descomposición de la fracción orgánica de desechos sólidos municipales (RSM). Algunos de los gases secundarios, a pesar de estar en pequeñas cantidades, pueden ser tóxicos y pudieran presentar riesgos a la salud pública.

III.1.1 Constituyentes principales del biogas

Los gases encontrados en rellenos sanitarios incluyen Amonio (NH_3), Bióxido de Carbón (CO_2), Monóxido de Carbón (CO), Hidrógeno (H_2), Sulfuro de Hidrógeno (H_2S),

metano (CH₄), Nitrógeno (N₂) y Oxígeno (O₂). El porcentaje típico de distribución de gases encontrados en un relleno sanitario de RSM se puede ver en la Cuadro 3.1. Los datos de peso molecular y densidad se presentan en la Cuadro 3.2.

Cuadro 3.1.
Constituyentes típicos encontrados en biogas de rellenos sanitarios.

Componente	Porcentaje (en base a volumen seco)
Metano	45-60
Bióxido de Carbono	40-60
Nitrogeno	2-5
Oxígeno	0.1-1.0
Sulfuros, Disulfuros	0-1.0
Amonia	0.1-1.0
Hidrógeno	0-0.2
Monóxido de Carbono	0-0.2
Constituyentes secundarios	0.01-0.6
Característica	Valor
Temperatura, °C	37-49
Gravedad Específica	1.02-1.06
Contenido de Humedad	Saturado
mayor valor de calentamiento, Kcal/m ³	3560-4895

Cuadro 3.2.
Peso molecular, densidad, y peso específico de gases encontrados en rellenos sanitarios en condiciones estandar (0°C, 1 atm)

Gas	Fórmula	Peso molecular, g/mol	Densidad (g/L)	Peso específico (kg/m ³)
Aire		28.97	1.2928	1.2943
Amonia	NH ₃	17.03	0.7708	0.7721
Bióxido de Carbono	CO ₂	44.00	1.9768	1.9783
Monóxido de Carbono	CO	28.00	1.2501	1.2510
Hidrógeno	H ₂	2.016	.0898	0.0897
Sulfuro de Hidrógeno	H ₂ S	34.08	1.5392	1.5394
Metano	CH ₄	16.03	0.7167	0.7176
Nitrógeno	N ₂	28.02	1.2507	1.2526
Oxígeno	O ₂	32.00	1.4289	1.4288

El metano y el bióxido de carbono son los principales gases producidos por la descomposición anaeróbica de los desechos orgánicos biodegradables de los RSM. Cuando el metano está presente en el aire en concentraciones entre 5 y 15 por ciento, es explosivo. Cuando cantidades limitadas de oxígeno están presentes en un relleno y las concentraciones de metano alcanzan este nivel crítico, hay un pequeño peligro de que el relleno sanitario explote. Sin embargo, las mezclas de metano en el intervalo explosivo pueden formarse si el biogas del relleno migra fuera de sitio y se mezcla con el aire.

III.1.2 Constituyentes de gases secundarios

El panel del Manejo Integrado de Desechos de California ha realizado un extenso programa de biogas como parte de su estudio de caracterización. El resumen de datos en concentraciones de compuestos secundarios encontrados en muestras de biogas, de 66 rellenos están reportados en la Cuadro 3.3. En otro estudio hecho en Inglaterra, las muestras de gas fueron colectadas de tres diferentes rellenos y analizados para 154 componentes. Un total de 116 componentes orgánicos fueron encontrados en el biogas. Varios de los componentes encontrados podrían ser clasificados como compuestos orgánicos volátiles (COV's). Los datos presentados en la Cuadro 3.3 son representativos de los compuestos secundarios encontrados en la mayoría de los rellenos. La presencia de éstos gases en el lixiviado que es removido de los rellenos dependerá en sus concentraciones del biogas en contacto con el lixiviado. En recientes rellenos en los cuáles la disposición de desechos peligrosos ha sido prohibida, las concentraciones de COV's en el biogas han sido extremadamente bajas.

Cuadro 3.3.
Concentraciones de gases secundarios encontrados en muestras de biogas

Compuesto	Concentración, ppm		
	Medio	Mínimo	Máximo
Acetona	0	6838	240000
Benzeno	932	2057	39000
CloroBenzeno	0	82	1640
Cloroformo	0	245	12000
1,1-Dicloroetano.	0	2801	36000
Diclorometano	1150	25694	620000
1,1-Dicloroetano	0	130	4000
Cloruro Dietileno	0	2835	20000
trans-1,2-Dicloroetano	0	36	850
2,3-Dicloropropano	0	0	0
1,2-Dicloropropano	0	0	0
Bromuro de Etileno	0	0	0
Dicloruro de Etileno	0	59	2100
Oxido de Etileno	0	0	0
Etil benzeno	0	7334	87500
Metil etil cetona	0	3092	130000
1,1,2-Tricloroetano	0	0	0
1,1,1-Tricloroetano	0	615	14500
Tricloroetileno	0	2079	32000
Tolueno	8125	34097	280000
1,1,2,2-Tetracloroetano	0	246	16000
Tetracloroetileno	260	5244	180000
Cloruro de Vinyl	1150	3508	32000
Estireno	0	1517	87000
Acetato de Vinyl	0	5663	240000
Xilenos	0	2651	38000

III.2 Generación del biogas

III.2.1 Generación de los gases principales

La generación de los gases principales se ha estimado que ocurra en cinco fases, como se ilustra en la Figura 3.1.

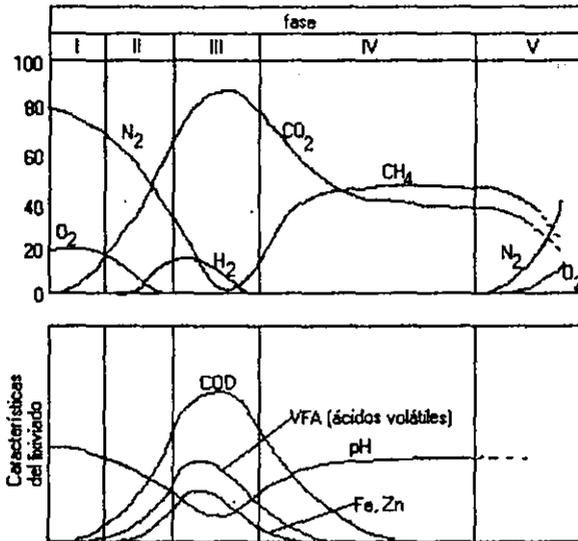


Figura 3.1 Fases generalizadas en la generación de biogas

Fase 1. Ajuste Inicial

La fase 1 es la fase del ajuste inicial, en la cual los componentes orgánicos biodegradables en un RSM sufren descomposición microbiana antes y después de ser dispuestos en el relleno. En la fase 1, la descomposición biológica ocurre bajo condiciones aerobias, porque una cierta cantidad de aire está atrapado dentro del relleno. La fuente principal de los organismos tanto anaerobios como aerobios responsables de la descomposición es el material del suelo que es usado como recubrimiento final.

Fase 2. Fase de transición

En la fase 2, identificada como la fase de transición, el oxígeno es reducido y las condiciones anaeróbicas empiezan a desarrollarse. En tanto el relleno viene a ser anaeróbico,

los nitratos y sulfatos pueden servir como aceptadores de electrones en reacciones biológicas de conversión, son con frecuencia reducidos a nitrógeno y sulfuro de hidrógeno. Las condiciones para la reducción de nitratos y sulfatos ocurren con -50 a -100 milivolts. La producción de metano ocurre cuando los valores potenciales de oxidación/reducción decrecen; los miembros de la comunidad microbial responsables para la conversión de la materia orgánica a metano y bióxido de carbono inician el proceso llamado de 3 pasos con la conversión de material orgánico complejo a ácidos orgánicos y otros productos intermedios como se describirán en la fase 3. En la fase 2, el pH de los lixiviados, si son formados, empieza a descender debido a la presencia de ácidos orgánicos y a los efectos de concentraciones elevadas de CO_2 dentro del relleno. Ver Figura 3.1.

Fase 3. Fase ácida

En la fase 3, la actividad microbial iniciada en la fase 2 se acelera con la producción de cantidades significantes de ácidos orgánicos y cantidades menores de hidrógeno. La primera etapa en el proceso de tres pasos involucra la transformación de la enzima-mediada (hidrólisis) de los más altos componentes moleculares de la masa (p.ej. lípidos, proteínas, y ácidos nucleicos) en componentes adecuados para ser usados por microorganismos como fuente de energía. El segundo paso en el proceso (ácidogénesis) involucra la conversión microbial de los compuestos resultantes del primer paso en compuestos de masa molecular mas baja conocidos como ácidos acéticos (CH_3COOH) y concentraciones pequeñas de otros ácidos orgánicos más complejos. El bióxido de carbono es el principal gas generado durante la fase 3. Cantidades más pequeñas de hidrógeno también serán producidas. Los microorganismos involucrados en esta conversión están formados por bacterias facultativas y anaeróbicas. Estos microorganismos son frecuentemente identificados en la literatura de ingeniería como *formadores de ácido*.

El pH del lixiviado, si se ha formado, frecuentemente estará en valores de 5 o menos debido a la presencia de ácidos orgánicos y las elevadas concentraciones de CO_2 dentro del relleno. También, debido a los bajos valores de pH en el lixiviado, varios constituyentes inorgánicos, principalmente metales pesados, serán solubilizados durante la fase 3. Muchos nutrientes esenciales son también removidos en el lixiviado en ésta fase.

Fase 4. Fase de fermentación del metano

En ésta fase, un segundo grupo de microorganismos, los cuáles convierten el ácido acético e hidrógeno generado por los formadores de ácido en la fase ácida a CH_4 y CO_2 , serán más predominantes. Los microorganismos responsables de ésta conversión son estrictamente anaerobios y son llamados metanogénicos. Colectivamente, son identificados en la literatura como *formadores de metano*. En la fase 4, tanto el metano y la formación de ácido ocurren simultáneamente, a pesar de que el rango de formación de ácido es considerablemente reducido.

Dado que los ácidos y el hidrógeno producidos por los formadores de ácidos han sido convertidos a CH_4 y CO_2 en la fase 4, el pH dentro del relleno se acrecentará a valores más neutrales en el rango de 6.8 a 8. Con altos valores de pH, muy pocos compuestos inorgánicos pueden permanecer en solución; como resultado, la concentración de metales pesados presentes en el lixiviado serán también reducidos.

Fase 5. Fase de maduración.

La fase 5 ocurre después de que la materia orgánica biodegradable disponible ha sido convertida a CH_4 y CO_2 en la fase 4. El rango de generación de biogas disminuye significativamente en la fase 5, porque la mayoría de los nutrientes disponibles han sido removidos con el lixiviado durante las fases previas y los sustratos que quedan en el relleno son biodegradados lentamente. Los gases principales involucrados en el relleno en la fase 5 son CH_4 y CO_2 . Durante la fase de maduración, el lixiviado frecuentemente contendrá ácidos húmico y fúlvico, los cuáles son difíciles de procesar más biológicamente.

Duración de fases.

La duración de las fases individuales en la producción de biogas variará dependiendo de la distribución de los componentes orgánicos en el relleno, la disponibilidad de nutrientes, el contenido de humedad de los desechos, el recorrido de la humedad a través del llenado, y el grado inicial de compactación. Al incrementarse la densidad de los materiales colocados en el relleno decrecerá la posibilidad de alcanzar una humedad en todas las partes de los desechos y, entonces se reducirá la tasa de bioconversión y producción de gas. Datos típicos de los porcentajes de distribución de los principales gases encontrados en un relleno completamente nuevo como función del tiempo son reportados en el Cuadro 3.4.

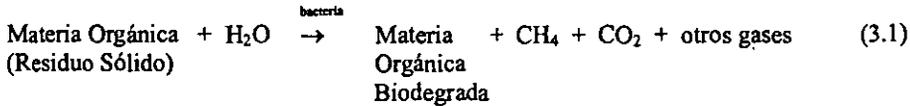
Cuadro 3.4.

Porcentaje de distribución de gases observados durante los primeros 48 meses después de cerrar una celda de un relleno.

Intervalos de tiempo después de haber terminado la celda, meses	Promedio, por ciento por volumen		
	Nitrógeno N_2	Bióxido de Carbono CO_2	Metano CH_4
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

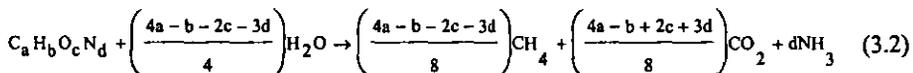
III.2.2 Volumen de gas producido

La reacción química generalizada para la descomposición anaeróbica de desechos sólidos puede ser escrita como:



Hay que notar que la reacción requiere la presencia de agua. Así pues, aunque la cantidad total de gas que será producida de desechos sólidos se deriva de la reacción estequiométrica, las condiciones de la hidrología local afectan significativamente el rango y el período de tiempo sobre el cuál la producción de gas toma lugar.

El volumen de gases liberados durante la descomposición anaeróbica pueden ser estimados en varias formas. Por ejemplo, si los constituyentes orgánicos individuales encontrados en un RSM (con excepción de plásticos) son representados con la fórmula generalizada de la forma $C_aH_bO_cN_d$, entonces el volumen total de gas puede ser estimado usando la ecuación 3.2, asumiendo la completa conversión de desechos orgánicos biodegradables a CO_2 y CH_4 .



En general, los materiales orgánicos presentes en desechos sólidos pueden ser divididos dentro de 2 clasificaciones: (1) en materiales que se descompondrán rápidamente (tres meses a cinco años) y (2) en materiales que se descompondrán lentamente (cerca de 50 años o más). Los componentes que se descomponen rápida y lentamente de la fracción orgánica de un RSM están identificados en la Cuadro 3.5.

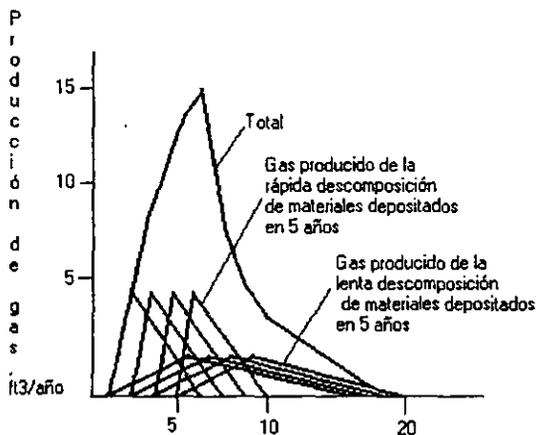


Figura 3.2 Representación gráfica de producción de gas sobre un período de 5 años de la rápida y lenta descomposición de materiales orgánicos en un relleno sanitario

Cuadro 3.5
Constituyentes orgánicos rápida y lentamente biodegradables en un RSM

Componente desechos orgánicos	en Rápidamente biodegradable	Lentamente biodegradable
Desechos de comida	*	
Periódico	*	
Papel de oficina	*	
Cartas	*	
Plásticos ^a		
Textiles		*
Hule		*
Cuero		*
Desechos de patios	^{a,b}	^{a,c}
Madera		*
Varios	*	*

a: Plásticos son generalmente no biodegradables

b: Hojas y pasto. Típicamente, 60% del desperdicio

c: Porciones de madera de los desechos de patios.

III.2.2.1 Cálculo del volumen generado

Se propone, a manera de ejemplo, para mostrar el cálculo del volumen de biogas generado, el caso de un relleno sanitario situado en Irapuato, Guanajuato.

Como consecuencia de la descomposición anaerobia de la materia orgánica de los desechos, el volumen de gas a producirse se puede estimar a partir de la ecuación propuesta por Tchobanoglous, ecuación 3.2.

Donde:

C, H, O, N.: representan el carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, elementos constituyentes de la molécula orgánica.

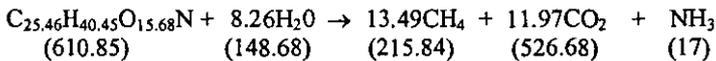
a, b, c, d: representan las concentraciones molares estequiométricas necesarias para balancear la ecuación.

Con base en los porcentajes de descomposición de la materia orgánica en C, H, O, N y cenizas propuestas por Tchobanoglous*, y en el porcentaje en base seca correspondiente a residuos típicos de México, se obtiene la fórmula de la molécula orgánica en los residuos sólidos, que es:



Estos coeficientes se sustituyen en la ecuación 3.2 y se obtienen los volúmenes de metano, dióxido de carbono y amoníaco que se producirán por unidad de peso de desechos sólidos.

La ecuación resultante es:



El análisis de subproductos efectuado en el estudio de generación (Capítulo II), los materiales orgánicos y su peso en una muestra de 1m³ se muestran a continuación.

Materiales degradables	Porcentaje promedio	Peso de muestra (kg/m ³)
Residuos de alimentos	32.12	74.38
Residuos de jardinería	18.03	41.75
Papel	11.48	26.58
Cartón	2.98	6.90
Total	64.61	149.61

Considerando un contenido de humedad aproximado de 40%, la cantidad neta de material orgánico será de 89.76 kg/m³.

* Solid Wastes Engineering Principles and Management Issues. Tchobanoglous, George

La generación en kg de gas por metro cúbico de residuo dispuesto será aproximadamente la siguiente:

$$\text{Metano} = \frac{215.84}{610.85} (89.76) = 31.72 \text{ kg de CH}_4 \text{ por m}^3 \text{ de residuo} \quad (1)$$

$$\text{Dióxido de carbono} = \frac{526.68}{610.85} (89.76) = 77.39 \text{ kg de CO}_2 \text{ por m}^3 \text{ de residuo} \quad (2)$$

De acuerdo con Tchobanoglous, se estima que aproximadamente 30% de los gases calculados se generan en los primeros dos años y 70% en los próximos 5 años. Tomando un promedio de 14.30% anual durante siete años, en el Cuadro 3.6 se calcularon los gastos de emisión de dióxido de carbono y metano desde el inicio supuesto de operación, hasta los nueve años posteriores a su abandono, durante los cuales continuará emitiéndose gas por la descomposición de los residuos más recientemente dispuestos.

Cuadro 3.6
Estimación de la generación de gases en el relleno sanitario

Año	Generación Anual kg	Volumen Anual m ³	CO ₂ Anual kg	CO ₂ kg/día	CH ₄ Anual kg	CH ₄ kg/día
1	69.798x10 ⁶	3.01014x10 ⁵	3.3322E+06	9129.38	1.3666E+06	3744.12
2	74.418x10 ⁶	3.2138x10 ⁵	6.8899E+06	18876.44	2.8257E+06	7741.56
3	79.301x10 ⁶	3.4246x10 ⁵	1.0681E+07	29262.83	4.3804E+06	12001.20
4	84.34x10 ⁶	3.879x10 ⁵	1.4975E+07	41027.36	6.1415E+06	16826.04
5	89.82x10 ⁶	4.123x10 ⁵	1.9539E+07	53531.91	8.0133E+06	21954.37
6	95.46x10 ⁶	4.388x10 ⁵	2.4397E+07	68840.17	1.0005E+07	27412.32
7	101.61x10 ⁶	4.668x10 ⁵	2.9564E+07	80997.64	1.2125E+07	33218.55
8	108.10x10 ⁶	4.958x10 ⁵	3.1720E+07	86905.26	1.3009E+07	35641.36
9	114.80x10 ⁶	5.272x10 ⁵	3.3999E+07	93147.53	1.3944E+07	38201.43
10	122.97x10 ⁶	5.606x10 ⁵	3.6414E+07	99763.45	1.4934E+07	40914.73
11			3.0208E+07	82761.14	1.2389E+07	33941.79
12			2.4002E+07	65758.83	9.8436E+06	26968.84
13			1.7796E+07	48756.53	3.6378E+06	9966.54
14			1.1590E+07	31754.22	1.0927E+06	2993.59
15			5.3844E+06	14751.91	0.00	0.00
16			0.00	0.00	0.00	0.00

* Residuos no compactados

Como se observa en el Cuadro 3.6 la emisión de gases llega a un valor máximo de generación en el último año de operación (año 10).

A continuación se explicará como se obtuvieron los valores anuales para el CO₂, ya que de forma similar se obtienen los del CH₄.

Para los años de operación 1 a 7, el procedimiento es el siguiente:

Año 1)	$(3.01014 \times 10^5) \times (77.39 \times 0.1430) = 3.01014 \times 10^5 \times 11.07 = 3.3322 \times 10^6 \text{ kg}$
Año 2)	$(3.2138 \times 10^5) \times (11.07) = 3.5577 \times 10^6 + 3.3322 \times 10^6 = 6.8899 \times 10^6 \text{ kg}$
Año 3)	$(3.4246 \times 10^5) \times (11.07) = 3.7910 \times 10^6 + 6.8899 \times 10^6 = 10.681 \times 10^6 \text{ kg}$
Año 4)	$(3.879 \times 10^5) \times (11.07) = 4.294 \times 10^6 + 10.681 \times 10^6 = 14.975 \times 10^6 \text{ kg}$
Año 5)	$(4.123 \times 10^5) \times (11.07) = 4.564 \times 10^6 + 14.975 \times 10^6 = 19.540 \times 10^6 \text{ kg}$
Año 6)	$(4.388 \times 10^5) \times (11.07) = 4.858 \times 10^6 + 19.540 \times 10^6 = 24.397 \times 10^6 \text{ kg}$
Año 7)	$(4.668 \times 10^5) \times (11.07) = 5.167 \times 10^6 + 24.397 \times 10^6 = 29.564 \times 10^6 \text{ kg}$

Para los años 8 a 10, el procedimiento de cálculo cambia ya que al resultado obtenido en el año 8, se le restará el resultado del año 1, para que sigan siendo 7 años. Los resultados obtenidos fueron:

Año 8)	$(4.958 \times 10^5) \times (11.07) = 5.489 \times 10^6 + 29.564 \times 10^6 = 35.053 \times 10^6 - 3.3322 \times 10^6 = 31.721 \times 10^6$
Año 9)	$(5.272 \times 10^5) \times (11.07) = 5.836 \times 10^6 + 31.721 \times 10^6 = 37.557 \times 10^6 - (3.2138 \times 10^5 \times 11.07) = 33.9992 \times 10^6$
Año 10)	$(5.606 \times 10^5) \times (11.07) = 6.206 \times 10^6 + 33.9992 \times 10^6 = 40.205 \times 10^6 - 3.424 \times 10^5 \times 11.07 = 36.4140 \times 10^6$

Para los años posteriores al décimo, el volumen anual se considera constante, por lo que el procedimiento de cálculo es el que a continuación se indica:

Año 11)	$(5.606 \times 10^5) \times (11.07) = 6.206 \times 10^6; 36.414 \times 10^6 - 6.206 \times 10^6 = 30.208 \times 10^6 \text{ kg}$
Año 12)	$(5.606 \times 10^5) \times (11.07) = 6.206 \times 10^6; 30.208 \times 10^6 - 6.206 \times 10^6 = 24.002 \times 10^6 \text{ kg}$
Año 13)	$(5.606 \times 10^5) \times (11.07) = 6.206 \times 10^6; 24.002 \times 10^6 - 6.206 \times 10^6 = 17.796 \times 10^6 \text{ kg}$
Año 14)	$(5.606 \times 10^5) \times (11.07) = 6.206 \times 10^6; 17.796 \times 10^6 - 6.206 \times 10^6 = 11.590 \times 10^6 \text{ kg}$
Año 15)	$(5.606 \times 10^5) \times (11.07) = 6.206 \times 10^6; 11.590 \times 10^6 - 6.206 \times 10^6 = 5.384 \times 10^6 \text{ kg}$
Año 16)	$(5.606 \times 10^5) \times (11.07) = 6.206 \times 10^6; 5.384 \times 10^6 - 6.206 \times 10^6 = 0$

En el caso del metano, el procedimiento es el mismo, solamente cambia la tasa de generación de 11.07 a $(31.72 \times 0.1430) = 4.54 \text{ kg de CH}_4 \text{ por m}^3$.

Para obtener la generación en kilogramos por día, basta con dividir la generación de cada compuesto entre 365 días.

III.2.3 Variación en la producción de gas con el tiempo

Bajo condiciones normales, el intervalo de descomposición, medido por la producción de gas, alcanza un pico dentro de los dos primeros años y luego lentamente disminuye, continuando en muchos casos por períodos hasta de 25 años o más. Si la humedad no está adherida a los desperdicios en un relleno bien compactado, es común encontrar materiales en su forma original años después de ser enterrados.

La variación en la tasa de producción de gas de la descomposición anaeróbica de los rápidos (cinco años o menos – algunos desechos altamente biodegradables son descompuestos después de unos días de haber sido colocados en el relleno) y lentos (5 a 50

años) materiales orgánicos biodegradables en un RSM puede ser modelada como se indica en la Figura 3.2.

Como se muestra en la Figura 3.2, anualmente los intervalos de descomposición de material descompuesto rápida y lentamente están basados en un modelo triangular de producción de gas en el cuál el intervalo pico de producción de gas ocurre al año y 5 años después, respectivamente, después de que la producción inicio. Se asume que la producción de gas empieza al final del primer año completo de operación del relleno. El área bajo el triángulo es igual a un medio de la base por la altura, así, la cantidad total de gas producido del desecho depositado el primer año de operación es igual a:

Gas Total = $\frac{1}{2}$ (base, año) x (altura, intervalo pico de producción de gas, m³/kg-año) (3.3)
El Gas Total producido está en m³/año.

Usando un modelo triangular, el intervalo total de producción de gas de un relleno en el cuál los desechos fueron colocados por un período de 5 años es obtenido gráficamente sumando la producción de gas de las rápidas y lentas porciones biodegradables del RSM depositadas cada año (ver Figura 3.2). La cantidad total producida de gas corresponde al área bajo el intervalo de la curva.

Como se notó previamente, en muchos rellenos la humedad disponible es insuficiente para permitir la conversión completa de los constituyentes orgánicos biodegradables en el RSM. La humedad óptima contenida para la conversión de la materia orgánica biodegradable en un RSM está del orden de 50 a 60%. Cuando la humedad contenida del relleno es limitada, la curva de producción de gas es más achaparrada y se extiende sobre un mayor período de tiempo.

III.2.4 Fuente de gases secundarios

Los constituyentes secundarios en el biogas tienen dos fuentes básicas. Ellos pueden ser traídos al relleno con la llegada de desechos o pueden ser producidos por reacciones bióticas y abióticas dentro del relleno. De los componentes secundarios encontrados en el biogas, muchos son mezclados en el desecho que llega en forma líquida, pero tienden a volatizarse. La tendencia a volatizar puede ser aproximadamente proporcional al área superficial de una esfera del líquido volátil dentro del relleno. La amplia variación de veces de volatización que son esperadas de algunos líquidos seleccionados volátiles que pueden ser encontrados en rellenos sanitarios está ilustrada en el Cuadro 3.7.

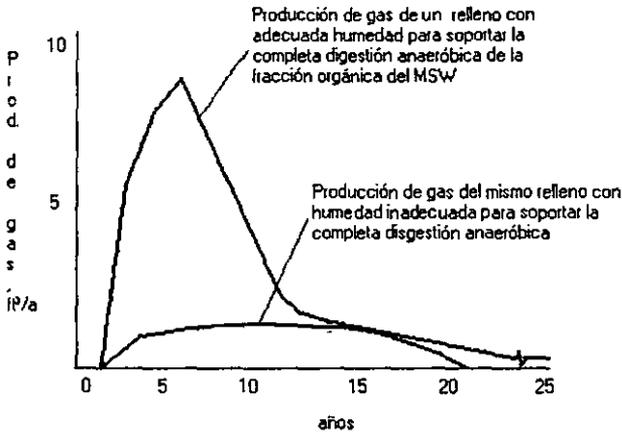


Figura 3.3 Efecto de la reducción del contenido de humedad en la producción de biogas

Cuadro 3.7

Tiempos estimados para la volatilización completa de líquidos seleccionados volátiles encontrados en rellenos.

Compuesto	Tiempo de evaporación, días
Cloroetano	0.0
Diclorometano	1.2
Triclorometano	4.4
Benzeno	6.4
Tetraclorometano	9.6
Tricloroetano	13.6
Tolueno	23.4
Tetracloroetileno	62.6
Clorobenzeno	76.0
1,2-Dibromoetano	128.2
o-Diclorobenzeno	497.6

Movimiento del Biogas

Bajo condiciones normales, los gases producidos en suelos son liberados a la atmósfera. En el caso de un relleno activo, la presión interna es usualmente mayor que la presión atmosférica y el biogas será liberado. La siguiente ecuación general relaciona estos factores en un volumen de control unidimensional (vertical). Ecuación 3.4.

$$\alpha(1 + \beta) \frac{\partial C_A}{\partial t} = -V_z \frac{\partial C_A}{\partial z} + D_z \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} + G \quad (3.4)$$

donde:

α = porosidad total, cm^3/cm^3

β = factor de retardo contable para cambio de fase

C_A = concentración del compuesto A, g/cm^3

V_z = Velocidad convectiva en la dirección vertical, cm/s

D_z = Coeficiente efectivo de difusión, cm^2/s

G = Parámetro usado para todos los términos de generación, $\text{g}/\text{cm}^3 \cdot \text{s}$

z = profundidad, m

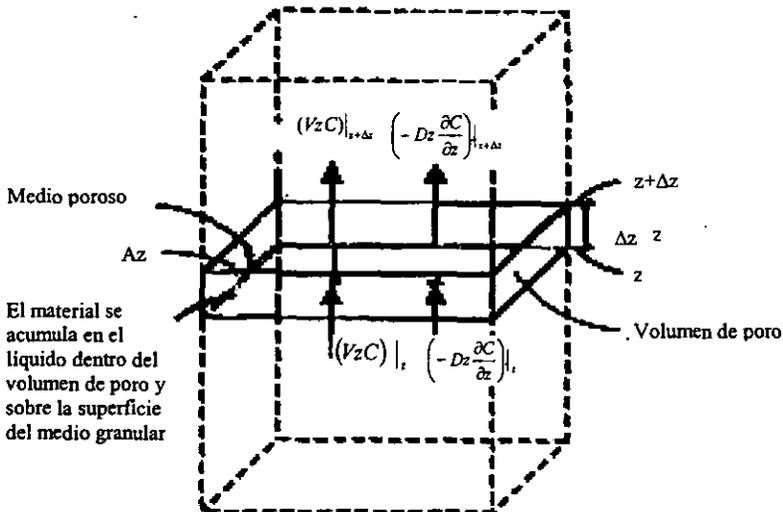


Figura 3.4 Volumen de control para el movimiento vertical de biogas

La velocidad convectiva V_z en la dirección vertical puede ser estimada usando la ley de Darcy como sigue: Ecuación 3.5.

$$V_z = -\frac{K}{\mu} \frac{dP}{dz} \quad (3.5)$$

donde:

- V_z = Velocidad convectiva, m/s
- k = permeabilidad intrínseca, m^2
- μ = Viscosidad de mezcla de gas, $N \cdot s/m^2$
- P = Presión, N/m^2
- z = profundidad, m

Los valores típicos para la velocidad convectiva para los gases principales en rellenos son del orden de 1 a 15 cm/d.

Algunas formas simplificadas de la ecuación 3.4 pueden ser de ayuda para estimar las emisiones sin tener que recurrir a técnicas complejas de solución en computadoras. Por ejemplo, si los efectos generativos son negativos, entonces la ecuación 3.4 se reduce a la: Ecuación 3.6.

$$0 = -V_z \frac{dC_A}{dz} + D_z \frac{d^2 C_A}{dz^2} \quad (3.6)$$

Si el biogas no es más producido en cantidades significantes, solo la porción difusiva de la ecuación (3.6) permanece, la cuál puede ser integrada para dar la siguiente expresión: Ec.(3.7)

$$N_A = -D_z \frac{dC_A}{dz} \quad (3.7)$$

donde N_A = flujo de gas, $g/cm^2 \cdot s$

El coeficiente efectivo de difusión es una función tanto de la difusión molecular como de la porosidad del suelo. La siguiente relación fue determinada empíricamente por el movimiento del vapor Lindano a través del suelo. Ec.(3.8)

$$D_z = D \frac{(\alpha_{ps})^{\frac{10}{3}}}{\alpha^2} \quad (3.8)$$

donde

D_z = Coeficiente efectivo de difusión, cm^2/s

D = Coeficiente de difusión, cm^2/s

α_{gas} = Porosidad que se presenta al estar lleno de gas, cm^3/cm^3

α = Porosidad total, cm^3/cm^3

Otra aproximación usada para determinar el coeficiente efectivo de difusión es como sigue:

$$D_z = D\alpha\tau$$

Donde τ = factor de tortuosidad (valor típico = 0.67)

III.2.5 Movimiento de los gases principales en el relleno

Aunque la mayoría de las emisiones a la atmósfera son de metano, tanto el metano como el bióxido de carbono han sido encontrados en concentraciones de hasta 40% en distancias laterales de hasta 122 m de los bordes de rellenos. Para rellenos no ventilados, la extensión de este movimiento lateral varía con las características del material cobertor y del suelo cercano. Si el metano es ventilado en una manera incontrolada, puede acumularse (porque su gravedad específica es menor que la del aire) arriba de edificios o en otros espacios encerrados, o cercanos a rellenos sanitarios. Con la ventilación apropiada, el metano no debe ser un problema. El bióxido de carbono, por otra parte, es problemático debido a su densidad. Como se presentó en el Cuadro 3.2, el bióxido de carbón es cerca de 1.5 veces más denso que el aire y 2.8 veces más denso que el metano; por lo que, trata de moverse con dirección hacia abajo del relleno. Como resultado, la concentración de dióxido de carbono en las porciones más bajas pudiera ser alta por años.

III.2.5.1 Migración hacia arriba de biogas

El metano y bióxido de carbono pueden ser liberados a través de la cubierta del relleno a la atmósfera por convección y difusión. El flujo difusivo a través de la cubierta puede ser estimado usando las ecuaciones 3.6 y 3.7 asumiendo que el gradiente de concentración es lineal y el suelo es seco, así $\alpha_{\text{gas}} = \alpha$.

Asumiendo condiciones de suelo seco se introduce un factor de seguridad considerando que cualquier infiltración de agua en la cubierta del relleno reducirá la porosidad y el flujo de vapor del relleno. Ec. (3.8).

$$N_A = -\frac{D\alpha^{4/3}(C_{A_{\text{atm}}} - C_{A_{\text{relleno}}})}{L} \quad (3.9)$$

donde

N_A = Flujo de gas del compuesto A, g/cm²

C_{Aatm} = Concentración del compuesto A en la superficie de la cubierta del relleno, g/cm³

$C_{Arelleno}$ = Concentración del compuesto A al fondo de la cubierta del relleno, g/cm³

L = Profundidad de la cubierta del relleno, cm.

Los valores típicos para el coeficiente de difusión para el metano y el bióxido de carbono son 0.20 cm²/s y 0.13 cm²/s, respectivamente.

III.2.5.2 Migración hacia abajo del biogas

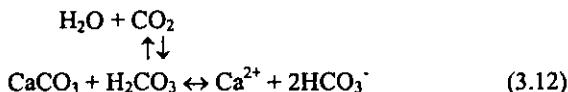
El bióxido de carbón, debido a su densidad, puede acumularse al fondo del relleno. Si un suelo arcilloso es usado, el bióxido de carbono puede moverse de ahí hacia abajo, primeramente por transportación difusiva a través de los espacios intersticiales del suelo, y a través de la formación de subcapas hasta que alcanza la tierra con agua (notar que el movimiento del bióxido de carbono puede ser limitado con el uso de una geomembrana). El bióxido de carbono es de buen grado soluble en agua y puede reaccionar con ella para formar ácido carbónico, ó



Esta reacción reduce considerablemente el pH, el cuál en cambio puede incrementar el contenido mineral del agua de la tierra a través de solubilización. Por ejemplo, si el carbonato de calcio sólido esta presente en la estructura del suelo, este ácido carbónico reaccionará con él para formar bicarbonato de calcio soluble, de acuerdo a las siguientes reacciones:



Reacciones similares ocurren con carbonatos de magnesio. Para un concentración de gas dada de bióxido de carbono, la reacción mostrada en la ecuación 3.9 procederá hasta que el equilibrio es alcanzado, como se describe en la ecuación 3.11



Así pues, cualquier proceso que incremente el bióxido de carbono libre disponible a la solución causará más carbonato de calcio para disolver.

III.2.6 Movimiento de gases secundarios

Para las condiciones de frontera mostradas en la Figura 3.5, la ecuación 3.8 puede ser modificada para los gases secundarios encontrados en rellenos como sigue:

$$N_i = -\frac{D\alpha^{4/3}(C_{i_{atm}} - C_{is}W_i)}{L} \quad (3.13)$$

donde

- N_i = Flujo de vapor del compuesto i , g/cm^2
- D = Coeficiente de difusión, cm^2/s
- α = Porosidad de suelo seco, cm^3/cm^3
- $C_{i_{atm}}$ = Concentración del compuesto i en la superficie de la cubierta del relleno, g/cm^3
- C_{is} = Concentración de vapor de saturación del compuesto i , g/cm^3
- W_i = Factor de escala para contar la fracción actual del compuesto secundario i en el desecho
- $C_{is}W_i$ = Concentración del compuesto i al fondo de la cubierta del relleno, g/cm^3
- L = Profundidad de la cubierta del relleno, cm

La ecuación 3.13 puede ser simplificada asumiendo que $C_{i_{atm}}$ es cero; esta suposición es razonable porque la concentración del constituyente secundario que alcanza la superficie será rápidamente disminuida tanto por el viento como por la difusión en el aire. Haciendo esta suposición, la estimación del flujo de masa del gas será conservativo; cualquier incremento en $C_{i_{atm}}$ ocasionará en un decremento en el flujo de masa. La forma simplificada de la ecuación 3.13 es

$$N_i = \frac{D\alpha^{4/3}(C_{is}W_i)}{L} \quad (3.14)$$

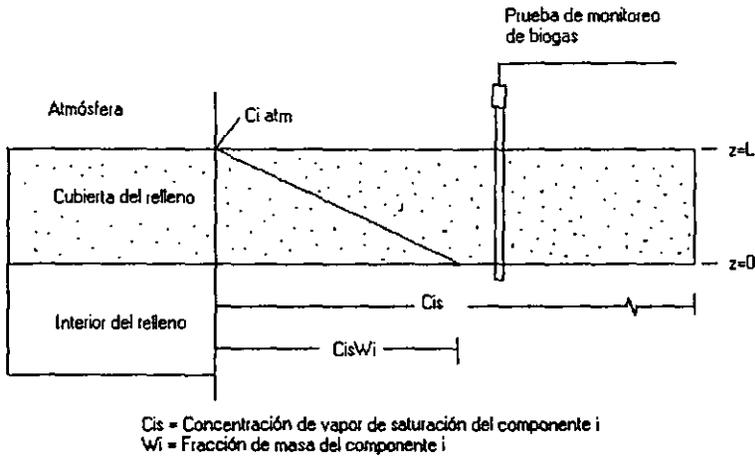


Figura 3.5 Esquema para el movimiento de gases secundarios de un relleno a través de la cubierta

Algunos valores estimados del coeficiente de difusión D para doce compuestos secundarios están reportados en la Cuadro 3.7 para temperaturas que varían de 0°C a 50°C . Los valores de porosidad típicamente varían de 0.010 a 0.30 para diferentes tipos de arcilla. El término C_{i,W_i} corresponde a la concentración del compuesto en cuestión arriba del relleno justo arriba de la cubierta. Si las mediciones en campo no están disponibles, el valor del término C_{i,W_i} puede ser estimado usando los datos dados en la Cuadro 3.8 para C_{i_s} y W_i por los compuestos secundarios reportados. Si un compuesto de interés no está listado en la Cuadro 3.9, uno puede usar un valor de 0.001 como un estimado para W_i . Si el valor del término C_{i,W_i} será estimado en campo, las medidas deben ser tomadas insertando una probeta para gas a través de la cubierta del relleno, a un punto más allá del fondo de la cubierta, y medir tanto la concentración del compuesto como la temperatura en éste punto en el relleno.

Cuadro 3.9
Concentraciones medidas y saturación de gases en fases de 10 compuestos secundarios

Compuestos	Concentración, mg/m ³		
	Medida máxima	Valor de saturación	Factor de escala, Wi
Benzeno	135.9	319,000	0.0004
Clorobenzeno	6.8	54,000	0.0001
Etilbenzeno	414.5	40,000	0.01
1,1,1-Tricloroetano	86.3	715,900	0.0001
Cloroetano	89.2	8,251,000	0.00001
Tetracloroetano	1331.7	126,000	0.01
Tricloroetano	85.1	415,000	0.0002
Diclorometano	871.5	1,702,000	0.0005
Triclorometano	63.9	1,027,000	0.00001
Tolueno	1150.5	110,000	0.01

III.3 Control Pasivo del Biogas

El movimiento del biogas es controlado para reducir emisiones atmosféricas, para minimizar la liberación de emisiones olorosas, para minimizar migración subsuperficial de gas, y para permitir la recuperación de energía del metano. Los sistemas de control pueden ser clasificados como pasivos o activos. En los sistemas de control de gas pasivo, la presión del gas que es generada dentro del relleno sirve como la fuerza actuante para el movimiento de gas. En los sistemas de control de gas activo, la energía en forma de un vacío inducido es usado para controlar el flujo de gas. Cuando la producción de los gases principales es limitada, los controles pasivos no son muy efectivos porque la difusión molecular será el mecanismo predominante transportador.

III.3.1 Alivio de presión por quemadores/ventiladores en la cubierta del relleno

Uno de los métodos pasivos más comunes para el control de biogas está basado en el hecho que la migración lateral del biogas puede ser reducida aliviando la presión de gas dentro del relleno. Para éste propósito, los venteos son instalados a través de la cubierta final del relleno extendido por debajo en la masa del desecho sólido. Ver Figura 3.6. Si el metano en el gas que se ventea es de suficiente concentración, gran cantidad de venteos pueden ser conectados juntos y equipados con un quemador de gas. Ver Figura 3.7a. La altura del quemador de desechos puede variar de 3 a 6 m encima del relleno completado. Para derivar el máximo beneficio de la instalación de un quemador de gas, una flama piloto debe ser usada. Ver Figura 3.7b. Debe notarse, sin embargo, que los venteos pasivos con quemadores pudieran no mejorar las eficiencias de los COV y la destrucción de olor que son requeridos por muchas agencias de control urbanas de calidad del aire, y, así, su uso no está considerado como buena práctica.

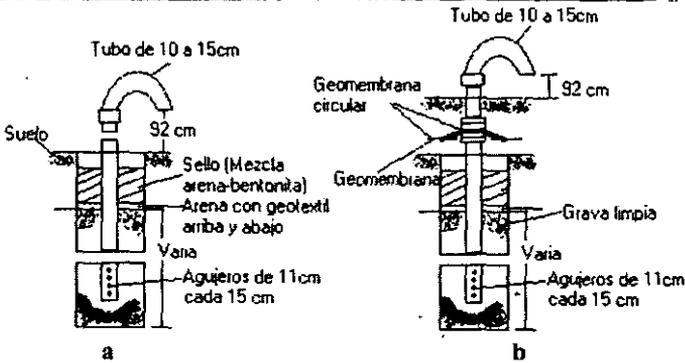


Figura 3.6 Ventiladores típicos de gas usados en la superficie de un relleno para el control pasivo de biogas: a) Ventilador para gas para un relleno con cubierta que no contiene geomembrana b) Ventilador para gas para un relleno con cubierta que contiene una membrana sintética

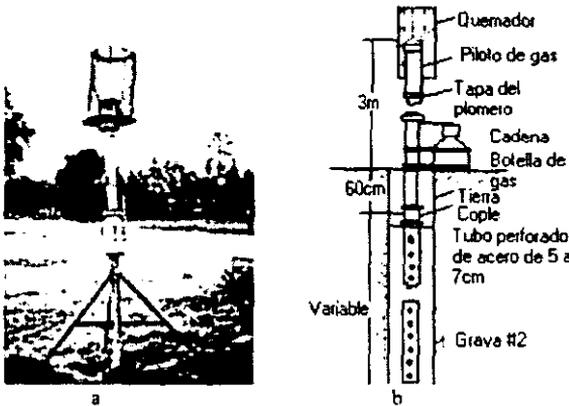


Figura 3.7 Típico quemador de gas en forma de vela usado para quemar biogas de un pozo de venteo varios pozos de venteo conectados: (a) sin flama piloto (b) con Flama piloto

III.3.2 Zanjas interceptoras en el perímetro

Un sistema de zanjas en el perímetro, formado por interceptores llenos con grava conteniendo tubos perforados de plástico horizontales (comúnmente Cloruro de Polivinilo, PVC o Polietileno, PE), pueden ser usados para interceptar el movimiento lateral del biogas. Ver Figura 3.8a. El tubo perforado es conectado a ascensores verticales a través de los cuáles el biogas que se colecta en la zanja puede ser venteado a la atmósfera.

III.3.3 Zanja perimetral de barrera o pared de estiércol y agua

Las zanjas de barrera, ver Figura 3.8b, son usualmente rellenas con materiales relativamente impermeables tales como bentonita o excremento con agua y arcilla. En este caso, la zanja viene a ser una barrera física al movimiento de gas lateral subterráneo. Sin embargo, las zanjas de excremento y agua pueden ser materia de desecación cuando se permite su resequedad, y por lo tanto son comúnmente usados en proyectos de intercepción. La efectividad a largo plazo de zanjas como barreras para el control de la migración de biogas es incierta.

III.3.4 Uso de barreras absorbentes dentro de rellenos para gases secundarios

Basados en resultados de programas de muestreo, es aparente que los gases secundarios están presentes en rellenos en diversas variedades de concentraciones. El uso de materiales absorbentes tales como la composta pueden ser usados para retardar la liberación de gases secundarios. En cambio, los mecanismos de transformación bióticos y/o abióticos pueden requerir más tiempo para degradar los compuestos secundarios absorbidos.

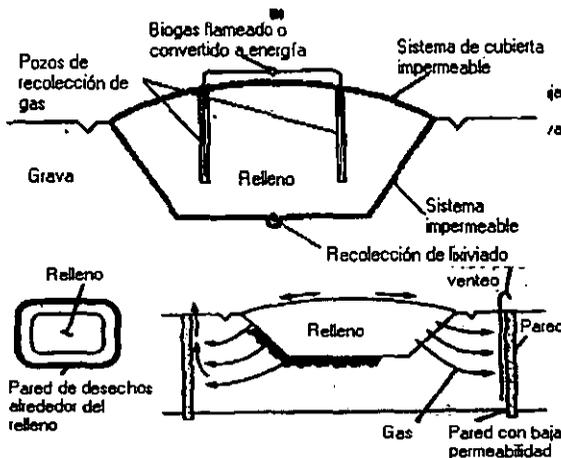


Figura 3.8 Facilidades pasivas usadas para el control de biogas: (a) zanja interceptora llenada con grava y tubería perforada, (b) zanja perimetral de barrera. (c) uso de membrana en relleno.

III.4 Control Activo de biogas con facilidades perimetrales

El movimiento lateral del biogas puede ser controlado pozos de extracción de gas perimetral y zanjas y creando una succión parcial, la cual induce al avance del gradiente de presión en el pozo de extracción. El gas extraído es tanto quemado para controlar la emisión de metano y COV's o usado para la producción de energía.

III.4.1 Pozos perimetrales de extracción de gas y control de olor

Los pozos perimetrales de extracción, ver Figura 3.9a, son típicamente usados en rellenos con una profundidad de desechos sólidos de al menos 8 m, donde la distancia entre el relleno y el desarrollo exterior es relativamente pequeña. Consisten de unas series de pozos verticales instalados tanto dentro del relleno como a lo largo de su borde o en el área entre el borde del relleno y la frontera del sitio.

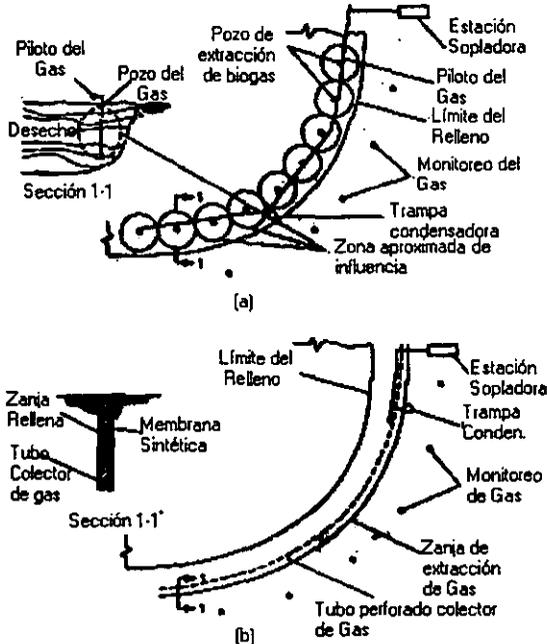


Figura 3.9 Facilidades activas usadas para el control de subsuperficie de la migración de biogas: (a) pozos de extracción de biogas perimetral y (b) zanja de extracción de biogas perimetral

Los pozos de extracción de biogas individual están conectados por una tubería que está conectada a una bomba centrífuga eléctricamente manejada, la cuál induce un vacío (presión negativa) en la tubería colectora y en los pozos individuales. Cuando el vacío es aplicado, una zona de radio de influencia es creada extendiéndose en la masa del desecho sólido cercana a cada pozo y dentro del cuál el gas generado es llevado al pozo. El biogas extraído es usualmente venteado o quemado, bajo condiciones de control, en la estación de bombas. El gas extraído puede también ser usado como una fuente de energía si la cantidad de gas que puede ser colectada es de cantidad y calidad suficiente.

El diseño típico de extracción de pozos consiste de una tubería de 10 a 15 cm (frecuentemente PVC o PE) puestas en un agujero de 46 a 91 cm, ver Figura 3.10. La parte de abajo es de un tercio a un medio de la cubierta perforada y puesta en un relleno con grava. La longitud restante de la cubierta no es perforada y es puesta en suelo (preferible). Los pozos están espaciados tal que sus radios de influencia se superpongan. En distinta forma a los pozos de agua, los radios de influencia para pozos verticales es esencialmente una esfera extendida en todas direcciones del pozo de extracción, ver Figura 3.9a.

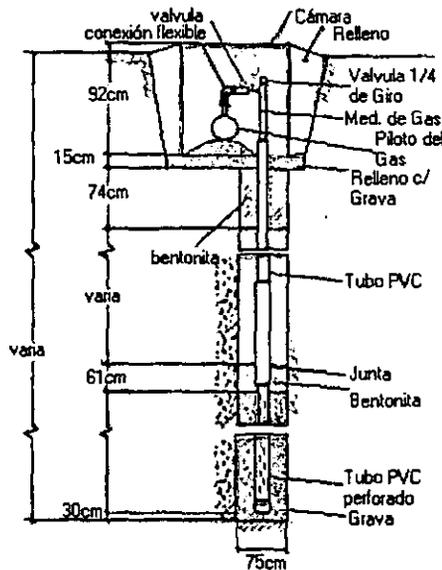


Figura 3.10 Detalles representativos de un pozo de extracción de biogas

Para prevenir la intrusión de aire, el rango del flujo de gas de cada pozo debe ser controlado cuidadosamente. Dependiendo de la profundidad del relleno y otras condiciones

locales, el espaciamiento de pozos para la extracción perimetral de biogas variará de 8 a 15 m, aunque espacios más largos han sido usados.

En largos rellenos, los pozos verticales perimetrales son también usados en conjunción con pozos de extracción de gas verticales y horizontales localizados en el interior del relleno.

III.4.2 Zanjas perimetrales de extracción de gas

Las zanjas perimetrales de extracción, ver Figura 3.8b, son usualmente instalados en suelo natural adyacente al perímetro del relleno. Son típicamente usados para rellenos poco profundos en sitios de disposición con profundidades de 2.5 m o menos. Las zanjas son rellenadas con grava y contienen tuberías de plástico perforadas que son conectadas a través de tuberías laterales a una bomba centrífuga de succión. La bomba de succión crea una zona de presión negativa en cada zanja, la cuál se extiende hacia delante del desecho sólido.

III.4.3 Inyección de aire en pozos perimetrales (Sistema de cortina de aire)

Los pozos de inyección de aire perimetrales consisten en una serie de pozos verticales instalados en suelos naturales entre los límites del relleno de desechos sólidos y por los mecanismos para proteger contra la intrusión de biogas. Los pozos de inyección de aire son típicamente instalados cerca de los rellenos con profundidades de desechos sólidos de 6 m ó más en áreas de suelo sin disturbios entre el relleno y las propiedades potencialmente afectadas.

III.5 Control activo de biogas con pozos de extracción de gas horizontales y verticales

Ambos pozos de gas verticales y horizontales han sido usados para la extracción de biogas dentro de los rellenos. En algunas instalaciones ambos tipos de pozos han sido usados.

III.5.1 Pozos de extracción de gas vertical

Un sistema típico de recuperación de gas usando pozos de extracción vertical se ilustra en la figura 3.11. Los pozos están espaciados con la intención que sus radios de influencia se sobrepongan, ver figura 3.12. Típicamente un pozo de extracción es instalado a lo largo con muestras de gas a distancias regulares del pozo, y el vacío del relleno es medido como si un vacío fuese aplicado a un pozo de extracción. Ya que el volumen de gas producido disminuirá con el tiempo, algunos diseñadores prefieren usar un espacio de

pozos uniforme y controlar el radio de influencia del pozo ajustando el vacío en la cabeza del pozo. Para rellenos profundos con una cubierta compuesta conteniendo una geomembrana de 46 a 61 m de espacio es común para pozos de extracción de gas en

rellenos. En rellenos con cubiertas de arcilla y/o suelo, un espacio más cercano (p.e., 30 m) podría ser requerido para evadir gases atmosféricos en el sistema de recuperación de gas.

Los pozos de extracción de gas verticales son usualmente instalados después del relleno o en porciones del relleno que hayan sido completados. En rellenos más viejos, los pozos verticales son instalados para recuperar energía y para controlar el movimiento de gases a propiedades adyacentes. El diseño típico de pozos de extracción consiste de una tubería en la cubierta de 10 a 15 cm (PVC o PE) colocada en un agujero de 46 a 91 cm, ver figura 3.9. La parte de abajo a un tercio o un medio de la cubierta es perforada y se coloca grava. La longitud remanente de la cubierta no es perforada y es rellena con suelo y sellada con arcilla. Los pozos de recuperación de biogas son típicamente diseñados para penetrar 80% de la profundidad del desecho en el relleno, porque sus radios de influencia se extenderán hacia abajo del relleno.

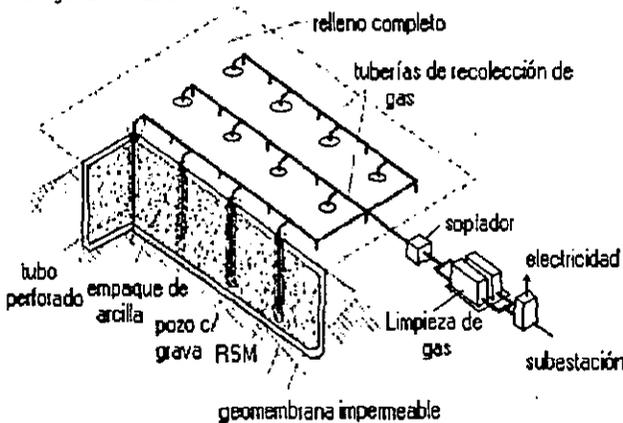


Figura 3.11 Sistema de recuperación de biogases usado en pozos verticales

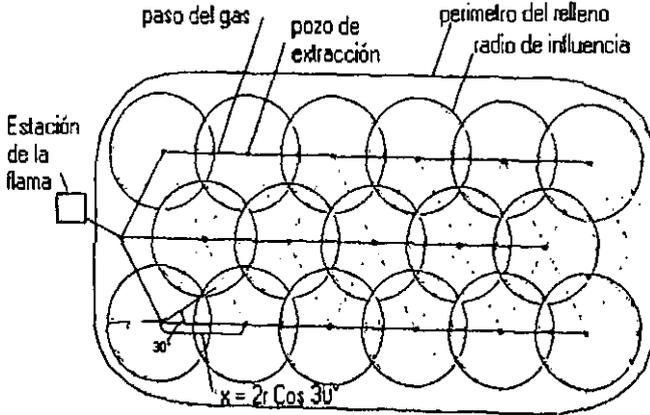


Figura 3.12 Distribución triangular equilateral para pozos de extracción de gas vertical

III.5.2 Pozos de extracción de gas horizontales

Una alternativa a los pozos de recuperación de gas vertical es el uso de pozos horizontales. El uso de pozos perimetrales verticales en conjunción con pozos de extracción perimetrales horizontales están ilustrados en la figura 3.13. La zanja horizontal de extracción de gas es excavada en el desecho sólido usando una pala. La zanja es entonces llenada a la mitad con grava y una tubería perforada con juntas abiertas es instalada. La zanja es llenada entonces con grava y tapada con desecho sólido. Las zanjas horizontales están instaladas a aproximadamente 24 m en intervalos verticales y a 61 m en intervalos horizontales.

III.5.3 Manejo de la condensación en los sistemas de recuperación

La condensación se forma cuando el biogas caliente es enfriado al ser transportado en la tubería con dirección hacia la bomba. Las tuberías colectoras de gas son usualmente instaladas con una pendiente mínima de 3% para permitir el asentamiento diferencial. El condensado de los tanques es bombeado periódicamente y transportadas a un sitio de disposición final autorizado o tratados in situ antes de la disposición o descargadas a una alcantarilla local.

III.6 Manejo de biogas

Típicamente, el biogas que ha sido recuperado de un relleno activo es quemado o usado para la recuperación de energía en forma de electricidad, o ambas. Más

recientemente, la separación del bióxido de carbono del metano en los rellenos ha sido sugerida como una alternativa para la producción de calor y electricidad.

III.6.1 Quema de biogas

Un método común de tratamiento de biogases es la destrucción termal; el metano y cualquier otro gas secundario (incluyendo COV's) son quemados con la presencia de oxígeno (contenido en el aire) a bióxido de carbono (CO_2), dióxido de sulfuro (SO_2), óxidos de nitrógeno, y otros gases relacionados. La destrucción termal del biogas es usualmente completada en un diseño fácil especialmente para quemar. Debido a lo concerniente sobre contaminación del aire, a mecanismos con quemadores modernos son diseñados cumplir con especificaciones rigurosas de operación para asegurar la destrucción efectiva de COV's y otros compuestos similares que pudieran estar presentes en el biogas.

III.6.2 Sistemas de recuperación de energía del biogas

El biogas es usualmente convertido a electricidad, ver Figura 3.13. En instalaciones más pequeñas (hasta de 5 MW), es común el uso motores de gasolina de combustión interna, ver Figura 3.14a, o turbinas de gas, ver Figura 3.14b. En instalaciones grandes, el uso de turbinas de vapor es común.

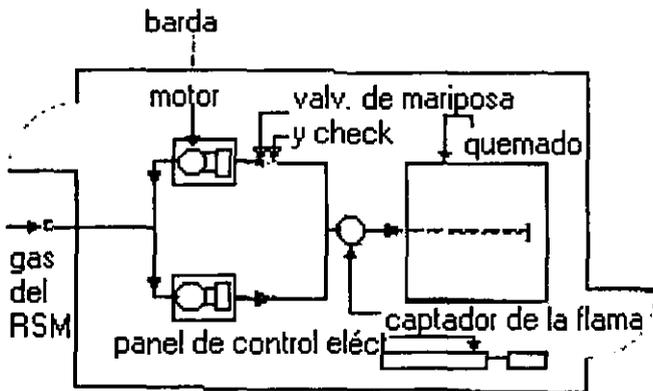


Figura 3.13 Distribución esquemática de la estación de quemado

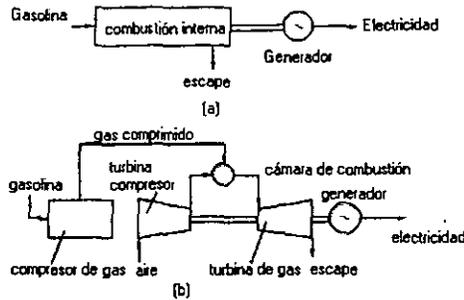


Figura 3.14 Diagrama de flujo esquemático para la recuperación de energía de combustibles gaseosos: (a) usando motor de combustión interna y (b) usando una turbina de gas.

Si el gas contiene H_2S , la temperatura de combustión debe ser controlada cuidadosamente para evitar problemas de corrosión. Alternativamente, el biogas puede ser pasado a través de un restregón conteniendo hojas de hierro, o a través de otros aparatos para restregar, para remover el H_2S antes que el gas sea quemado.

Las temperaturas de combustión serán críticas cuando el biogas contiene COV's liberados de desechos puestos en el relleno antes de que la disposición de desechos peligrosos en rellenos municipales fuera prohibido. El ciclo de servicio típico para motores de gasolina corriendo en biogas varía de 3000 a 10,000 horas antes de que el motor deba ser revisado. El ciclo de servicio típico para las turbinas de gas corriendo en biogas es aproximadamente de 10,000 horas. En el Cuadro 3.10 se presentan elementos importantes para diseñar los quemadores de biogas cercanos al nivel de la tierra.

Cuadro 3.10
Elementos importantes de diseño para quemadores de biogas cercanos a nivel de tierra

Artículo	Comentarios
Indicadora y grabadora de temperatura	Usada para medir y grabar la temperatura del gas en la llama. En cualquier momento cuando la flama está en operación, una temperatura de 816°C o mayor debe ser mantenida en la llama como medida por el indicador de temperatura 0.3 s después de pasar a través del quemador.
Sistema de piloto automático de reinicio	Para asegurar la continuación de la operación
Alarma de falla con un sistema de aislamiento automático	La alarma y el sistema de aislamiento son usados para aislar la flama de la línea de suministro de biogas, apagar la bomba, y notificar a un encargado del apagado.
Sistema de combustión controlado automáticamente	Usado para controlar la cantidad de aire en la combustión y la temperatura de la flama
Puertos fuentes de prueba proveídos con acceso seguro y adecuado	Usados para monitorear el proceso de combustión y para muestreo de emisiones de aire.
Puertos de vista	Un número suficiente de puertos para vista deben estar disponibles para permitir la inspección visual de la locación del sensor de temperatura dentro de la flama
Escudo contra calor	Un escudo contra el calor debería estar alrededor de lo alto de la flama para su uso durante la prueba

Las temperaturas de combustión serán críticas donde el biogas contenga COV's liberados de desechos puestos en el relleno antes de que la disposición de desechos peligrosos en rellenos municipales fuera prohibido. El ciclo de servicio típico para motores de gasolina corriendo en biogas varía de 3000 a 10,000 horas antes de que el motor deba ser revisado. El ciclo de servicio típico para las turbinas de gas corriendo en biogas es aproximadamente 10,000 horas.

III.6.3 Purificación y recuperación de gas

Donde haya un uso potencial para el CO₂ contenido en el biogas, el CH₄ y CO₂ en el biogas pueden ser separados. La separación de CO₂ del CH₄ puede ser completada por absorción física, absorción química, y por separación por membranas. En la absorción física y química, un componente es absorbido preferiblemente usando un buen solvente. La separación por membranas involucra el uso de una membrana semipermeable para remover el CO₂ del CH₄. Las membranas semipermeables han sido desarrolladas para permitir que el CO₂, H₂S, y H₂O pasen mientras que el CH₄ es retenido.

III.6.4 Dispersión del biogas

III.6.4.1 Modelo Gaussiano de dispersión

Los contaminantes liberados a la atmósfera viajan con el viento dominante, dispersándose tanto en la dirección vertical como horizontal a partir del centro de línea de una pluma de emisión. La tasa de dispersión en cada dirección es una función compleja de las condiciones meteorológicas, las características de los contaminantes y la topografía.

Se ha demostrado que la dispersión de contaminantes puede ser aproximada a una distribución Gaussiana o normal (Turner, 1970). La ecuación que modela la dispersión normal de un contaminante gaseoso emitido por una fuente elevada se da en la ecuación (3.15), la cual predice la concentración de estado estable en el punto de coordenadas (x,y,z):

$$\chi = \frac{Q}{2\pi v \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \left(e^{-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}} \right) \quad (3.14)$$

donde:

- χ = concentración de estado estable en el punto (x,y,z), $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- Q = tasa de emisión, $\mu\text{g}/\text{s}$
- σ_y, σ_z = parámetros de dispersión vertical y horizontal, m
- v = promedio de la velocidad del viento a la altura de la chimenea, m/s
- y = distancia horizontal desde el centro de línea de la pluma, m
- z = distancia vertical a partir del nivel del terreno, m
- H = altura efectiva de la chimenea ($H=h+\Delta h$, donde h = altura física de la chimenea y Δh = altura de ascensión de la pluma), m

Es importante tener en mente algunas relaciones generales indicadas por la ecuación (3.14):

1. La concentración viento abajo en cualquier punto es directamente proporcional a la cantidad emitida por la fuente.
2. La concentración viento abajo a nivel de piso es generalmente inversamente proporcional a la velocidad del viento.
3. Debido a que σ_y y σ_z se incrementan viento abajo conforme la distancia x se incrementa, la concentración en el centro de línea de la pluma declina continuamente conforme se incrementa x . Sin embargo, las concentraciones a nivel de piso, alcanzan un valor máximo, y luego decrecen conforme el observador se aleja de la chimenea.

4. Los parámetros de dispersión σ_y y σ_z se incrementan conforme aumenta la turbulencia atmosférica (inestabilidad). Así, las condiciones inestables hacen decrecer las concentraciones viento abajo (en el promedio).

5. La concentración máxima a nivel de piso calculada con la ecuación (3.14) decrece conforme la altura efectiva de la emisión se incrementa. La distancia a partir de la altura física de la emisión a la cual ocurre la concentración máxima también se incrementa.

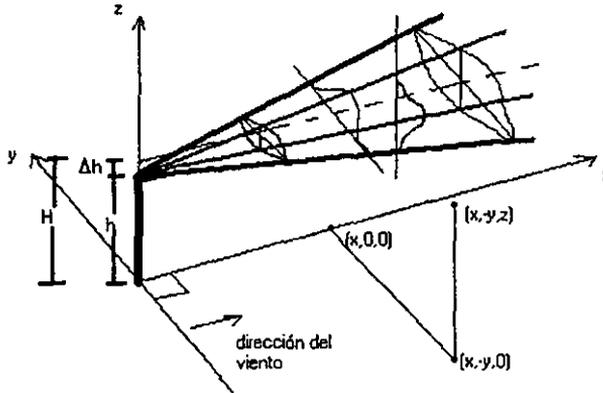


Figura 3.15 Dispersión a la salida de una chimenea, mostrando ejes coordenados.

Capítulo 4
Modelo de Generación, Control
Y Tratamiento de Lixiviados

Antecedentes

En este capítulo se tratarán los temas que a continuación se enlistan.

- Composición del lixiviado.
- Balance de agua y generación de lixiviado en rellenos.
- La ley de Darcy.
- Estimación de la filtración vertical del lixiviado.
- Destino de los constituyentes en el lixiviado en migración subterránea.
- Control de lixiviados en rellenos.
- Sistemas de colección de lixiviados.

IV. Lixiviado

El lixiviado puede ser definido como un líquido que se ha filtrado a través del desecho sólido y tiene materiales disueltos o suspendidos. En la mayoría de los rellenos, el lixiviado está compuesto del líquido que ha entrado al relleno proveniente de fuentes externas, tales como drenaje superficial, lluvia, tierra con agua, y agua de manantiales subterráneos y el líquido producido por la descomposición de desechos, si hay.

IV.1 Composición del lixiviado

Cuando el agua se filtra a través de los desechos sólidos que están en camino a descomponerse, los constituyentes biológicos y químicos están en la solución. Datos representativos en las características del lixiviado se presentan en el Cuadro 4.1 para rellenos nuevos y maduros. Los parámetros físicos, químicos, y biológicos típicos monitoreados que son usados para caracterizar al lixiviado se muestran en el Cuadro 4.2.

CUADRO 4.1
Datos típicos en la composición del lixiviado de rellenos nuevos y maduros

Constituyente	Valor, mg/L ^b		
	Nuevo relleno (menos de 2 años)		Relleno maduro (más de 10 años)
	Intervalo ^c	Típico ^d	
DBO5(demanda bioquímica de oxígeno a 5 días)	2,000-30,000	10,000	100-200
COT(carbón orgánico total)	1,500-20,000	6,000	80-160
DQO(demanda química de oxígeno)	3,000-60,000	18,000	100-500
Sólidos suspendidos totales	200-2,000	500	100-400
Nitrógeno Orgánico	10-800	200	80-120
Nitrógeno Amoniacal	10-800	200	20-40
Nitrato	5-40	25	5-10
Fósforo Total	5-100	30	5-10
Fósforo Ortho	4-80	20	4-8
Alcalinidad como CaCO ₃	1,000-10,000	3,000	200-1,000
PH	4.5-7.5	6	6.6-7.5
Dureza total como CaCO ₃	300-10,000	3,500	200-500
Calcio	200-3,000	1,000	100-400
Magnesio	50-1,500	250	50-200
Potasio	200-1,000	300	50-400
Sodio	200-2,500	500	100-200
Cloruro	200-3,000	500	100-400
Sulfato	50-1,000	300	20-50
Hierro total	50-1,200	60	20-200

b: Excepto pH, el cuál no tiene unidades.

c: Intervalo representativo de valores. Los valores máximos han sido reportados en la lectura por alguno de los constituyentes.

d: Valores típicos para rellenos nuevos variarán con el estado metabólico del relleno.

CUADRO 4.2
Parámetros en muestras de lixiviados

Físicos	Constituyentes orgánicos	Constituyentes Inorgánicos	Biológicos
Apariencia	Químicos orgánicos	Sólidos suspendidos	DBO
PH	Fenoles	Sólidos disueltos totales	Bacterias coliformes Cuenta de plato
Potencial de oxidación-reducción	DQO	Sólidos suspendidos	
Conductividad	COT	volátiles, sólidos disueltos	
Color	Acidos volátiles	totales	
Turbiedad	Taninos, ligninos	Cloruro	
Temperatura	Orgánico-N	Sulfato	
Olor	Eter soluble (aceite y grasa)	Fosfato Alcalinidad y acidez	
	Sustancias activas de azul de metileno (MBAS)	Nitrato-N Nitrito-N Amonia-N	
	Grupos orgánicos Funcionales como sean requeridos	Sodio Potasio Calcio	
	Hidrocarbomos Clorinados	Magnesio Dureza Metales Pesados (Pb, Cu, Ni, Cr, Zn, Cd, Fe, Mn, Hg, Ba, Ag) Arsénico Cianuro Fluoruro Selenio	

IV.1.1 Variaciones en la composición del lixiviado

Hay que notar que la composición química del lixiviado variará enormemente dependiendo de la edad del relleno y los eventos, precediendo el tiempo de la muestra. Por ejemplo, si una muestra del lixiviado es colectada durante la fase ácida de descomposición, (ver figura 3.1), el valor de pH será bajo y las concentraciones de DBO₅, COT, nutrientes, y metales pesados serán altas. Si, al contrario, una muestra del lixiviado es colectada durante la fase de fermentación del metano, el valor de pH estará en el intervalo de 6.5 a 7.5, y la DBO₅, COT, DQO, y los valores de concentración de nutrientes serán significativamente menores. El pH del relleno dependerá no sólo de la concentración de los ácidos que están presentes sino que también de la presión parcial del CO₂, y en el biogas que está en contacto con el lixiviado.

La biodegradabilidad del lixiviado variará con el tiempo. Los cambios en la biodegradabilidad del lixiviado pueden ser monitoreados midiendo la relación DBO_5/DQO .

La relación de DBO_5/DQO si está en el intervalo de 0.4 a 0.6 se considera como una indicación de que la materia orgánica en el lixiviado es fácilmente biodegradable.

Como resultado de la variabilidad en las características del lixiviado, el diseño de los sistemas de tratamiento de lixiviados es complicado. Por ejemplo, una planta de tratamiento diseñada para tratar lixiviado con las características reportadas para un nuevo relleno sería muy diferente de una diseñada para tratar lixiviados de un relleno maduro.

IV.1.2 Compuestos secundarios

La presencia de compuestos secundarios (algunos de los cuales pueden poseer riesgos para la salud) en el lixiviado dependerán de la concentración de estos compuestos en la fase gaseosa dentro del relleno.

IV.2 Balance de agua y generación de lixiviado en rellenos

El potencial para la formación de lixiviado puede ser evaluado preparando un balance de agua en el relleno. El balance de agua involucra sumar las cantidades de agua entrantes al relleno, sustraer las cantidades de agua consumidas en las reacciones químicas y restar la cantidad que sale como vapor de agua. La cantidad de lixiviado potencial es la cantidad de agua en exceso que no puede retener el material del relleno.

IV.2.1 Descripción de los componentes del balance de agua para una celda del relleno

Los componentes que hacen el balance de agua para una celda unitaria del relleno están identificados en la figura 4.1. Las fuentes principales incluyen el agua entrante a la celda por arriba, la humedad en el desecho sólido, la humedad en el material de la cubierta, y la humedad en los lodos, si la disposición de lodos está permitida. Los principales escurrimientos son el agua abandonando el relleno como parte del biogas (p.ej. el agua usada en la formación del gas), como vapor de agua saturado en el biogas, y como lixiviado.

IV.2.2 Agua entrando por arriba

Para la capa superior del relleno, el agua por arriba corresponde a la precipitación que se ha filtrado a través de la cubierta. Para las capas debajo de la superior, el agua por arriba corresponde al agua que se ha filtrado a través del desecho sólido por debajo de la capa en cuestión. Donde una geomembrana no es usada, la cantidad de lluvia que se filtra a

través de la cubierta puede ser determinada usando el modelo de Evaluación Hidrológica del Desempeño de Rellenos (HELP).

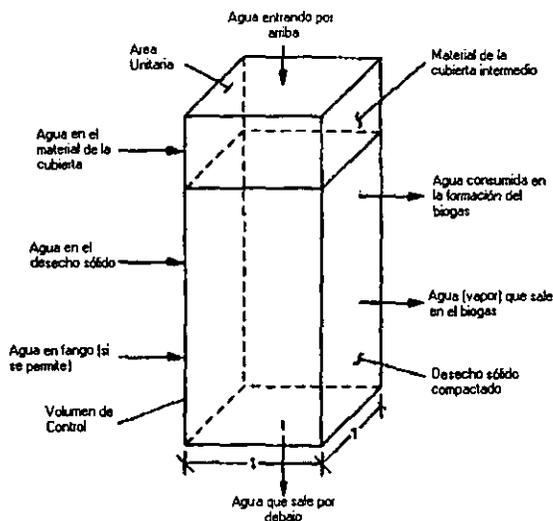


Figura 4.1. Esquema para el balance de agua usado para evaluar la formación del lixiviado en el relleno.

IV.2.3 Agua entrando en el desecho sólido

El agua entrando al relleno con materiales de desecho se considera como la humedad inherente en el material de desecho así como la humedad que ha sido absorbida de la atmósfera o de lluvia (donde los contenedores de almacenaje no están sellados adecuadamente). Sin embargo, debido a la variabilidad de la humedad contenida durante las estaciones de lluvia y estiaje, puede ser necesario conducir una serie de pruebas en estos períodos.

IV.2.4 Agua entrando en el material de la cubierta

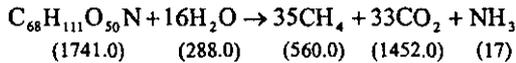
La cantidad de agua entrando en el material de la cubierta dependerá del tipo y fuente del material de la cubierta y de la temporada del año. La cantidad máxima de humedad que puede ser contenida en la cubierta está definida por la capacidad del terreno (FC) del material, que es, el líquido que permanece en el poro sujeto al empuje de la gravedad. Los valores típicos para suelos se encuentran en los intervalos de 6 a 12% para arena y 23 a 31% para arcillas.

IV.2.5 Agua saliendo por debajo

El agua saliendo por debajo de la primera celda del relleno es lixiviado. Como se notó previamente, el agua saliendo por debajo de la segunda y subsecuentes celdas es el agua que entra por arriba de la celda debajo de la celda anterior.

IV.2.6 Agua consumida en la formación de biogas

El agua es consumida durante la descomposición anaeróbica de los constituyentes orgánicos de los residuos sólidos municipales (rsm). La cantidad de agua consumida por las reacciones de la descomposición pueden ser estimadas usando la fórmula para la rápida descomposición de materiales. La masa de agua tomada por gramo de desecho orgánico seco consumida puede ser estimada como sigue:



La masa de agua consumida por kilogramo de sólidos volátiles rápidamente biodegradables secos (SVRB) destruida es

$$\text{Agua consumida} = \frac{288.0}{1741.0} = 0.0748 \text{ kg} \cdot H_2O / \text{kg RBVS destruidas}$$

Usando un valor de producción de gas de 0.868 m³/kg RBVS destruido, el valor correspondiente para la cantidad de agua consumida por m³ cúbico de gas producido es

$$\text{Agua consumida} = \frac{(0.0748 \text{ kg} H_2O / \text{kg RBVS destruido})}{(0.868 \text{ m}^3 / \text{kg RBVS destruido})} = 0.08617 \text{ kg} H_2O / \text{m}^3$$

IV.2.7 Agua perdida como vapor de agua

El biogas usualmente es saturado en vapor de agua. La cantidad de vapor de agua escapando del relleno es determinada asumiendo que el biogas está saturado con vapor de agua y aplicando la ley de los gases perfectos como sigue:

$$p_v V = nRT \quad (4.1)$$

donde

p_v = presión de vapor de H₂O a la temperatura T, kg/cm²

V = Volumen, m³

n = número de moles por kilogramo

R = Constante universal de los gases = 1543 m·kg/(kg·mol)·°R

T = (460+90) = 550°R

$$n = \frac{(p_v)(V)}{RT} = \frac{(100.8)(1.0)}{(1543)(550)} = 5.44 \times 10^{-5} \text{ Kgmol} = (5.44 \times 10^{-5} \text{ kgmol})(8.17 \text{ kg/kgmol}) = 4.44 \times 10^{-4} \text{ kgH}_2\text{O/m}^3 \text{ biogas}$$

IV.2.8 Capacidad del terreno del relleno

El agua que entra al relleno y que no es consumida y que no existe como vapor de agua puede ser retenida dentro del relleno o puede aparecer como lixiviado. La cantidad de agua que puede ser retenida en contra del empuje de gravedad está referida a la capacidad del terreno. La cantidad potencial de lixiviado es la cantidad de humedad dentro del relleno en exceso de la capacidad del terreno del relleno. La FC, la cuál varía con el peso de sobra, puede ser estimada usando la siguiente ecuación:

$$FC = 0.6 - 0.055 \left(\frac{W}{10,000 + W} \right) \quad (4.2)$$

donde

FC = capacidad del terreno (p.ej. la fracción de agua en el desecho basado en el peso seco del desecho)

W = Peso de más calculado a media altura del desecho en el lugar en cuestión

IV.2.9 Preparación del balance de agua en el relleno

Los términos que componen el balance de agua pueden ser puestos en la forma de ecuación como sigue:

$$\Delta S_{SW} = W_{SW} + W_{TS} + W_{CM} + W_{AR} - W_{LG} - W_{WV} - W_E + W_{B(L)} \quad (4.3)$$

donde

ΔS_{SW} = cambio en la cantidad de agua almacenada en el desecho sólido del relleno, kg/dm³

W_{SW} = agua (humedad) viniendo del desecho sólido, kg/dm³

W_{TS} = agua (humedad) viniendo de la planta de tratamiento de lodos, kg/dm³

W_{CM} = agua (humedad) en el material de la cubierta, kg/dm³

W_{AR} = agua de arriba (para la capa superior del relleno, agua de arriba corresponde a la lluvia), kg/dm³

W_{LG} = agua perdida en la formación de biogas, kg/dm³

W_{WV} = agua perdida como vapor saturado con biogas, kg/dm³

W_E = agua perdida debido a la evaporación en la superficie, kg/dm³

$W_{B(L)}$ = agua abandonando por debajo del elemento (para la celda colocada directamente arriba del sistema colector de lixiviado, agua debajo correspondiente al lixiviado), kg/dm³

El balance de agua del relleno es preparado añadiendo la masa de agua entrante a una unidad de área de una capa en particular del relleno tomando un incremento de tiempo para esta acción; determinar la humedad contenida de esa capa al final del incremento de tiempo previo, y sustrayendo la masa de agua perdida de la capa durante el incremento actual de tiempo. Para determinar si cualquier lixiviado se formará, la capacidad del terreno es comparada con la cantidad de agua que está presente. Si la capacidad del terreno es menor que la cantidad de agua presente, entonces el lixiviado será formado.

En general, la cantidad de lixiviado es una función directa de la cantidad de agua externa entrando al relleno.

IV.3 La ley de Darcy

La cantidad del lixiviado filtrado de la parte de abajo del relleno puede ser estimada usando la ley de Darcy, la cuál puede ser expresada como sigue,

$$Q = -KA \frac{dh}{dl} \quad (4.4)$$

donde

- Q = Descarga del lixiviado por unidad de tiempo, m³/año
- K = Coeficiente de permeabilidad, m³/m²·año
- A = Area transversal a través de la cuál el lixiviado fluye, m²
- dh/dl = Gradiente hidráulico, m/m
- h = Pérdida de carga, m
- l = Longitud del camino del flujo, m

El signo negativo en la Ley de Darcy surge del hecho que dh es siempre negativa. El coeficiente de permeabilidad es también conocido como conductividad hidráulica, la permeabilidad efectiva, o el coeficiente de filtración. En el Cuadro 4.3 se presentan los coeficientes típicos de permeabilidad para varios suelos.

IV.4 Estimación de la filtración vertical del lixiviado

Antes de que la Ley de Darcy sea aplicada a la estimación de intervalos de filtración en el relleno, es importante recordar las condiciones físicas del problema refiriéndose a la Figura 4.2. Ahí, una celda del relleno ha sido colocada en la superficie del acuífero, compuesto de material de permeabilidad moderada, eso sustituye un acuífero con una cama de roca. Con respecto al movimiento del lixiviado, hay dos problemas de interés. El primero es el rango al cuál el lixiviado se filtra desde abajo del relleno al acuífero de la superficie. El segundo es el intervalo al cual la tierra del acuífero de la superficie se mueve en el acuífero con cama de roca.

CUADRO 4.3
Coefficientes de permeabilidad típicos para varios suelos

Material	Coeficiente de permeabilidad, k	
	m/d	l/m ² d
Arena uniforme áspera	406.3	1332.8
Arena media uniforme	101.5	332.9
Arena y grava bien graduada, limpia	101.5	332.9
Arena fina uniforme	4.1	13.3
Arena con limos y grava bien graduada	0.4	1.3
Arena limosa	0.1	0.3
Limo uniforme	0.05	0.16
Arcilla arenosa	0.005	0.016
Arcilla limosa	0.0009	0.003
Arcilla (30 a 50% de tamaños de arcilla)	0.00009	0.0003
Arcilla coloidal	0.0000009	0.000003

Tiempo de apertura al paso del lixiviado

Este tiempo puede ser estimado usando la siguiente ecuación:

$$t = \frac{d^2 \alpha}{K(d + h)} \tag{4.5}$$

donde

- t = tiempo de apertura al paso del lixiviado, años
- d = Espesor de la capa de arcilla, m
- α = Porosidad efectiva,
- K = Coeficiente de permeabilidad, m/año,
- h = Carga hidráulica, m

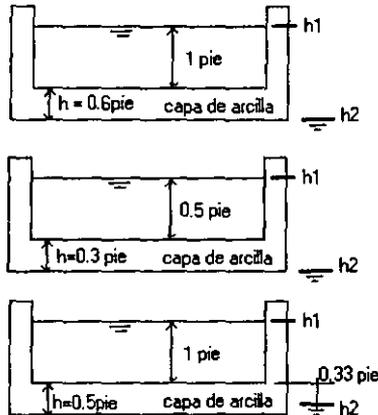


Figura 4.2 Esquema de evaluación de la equivalencia de capas de rellenos. (note que la descarga a través de cada configuración es la misma)

Los valores típicos de porosidad efectiva para arcillas con un coeficiente de permeabilidad en el intervalo de 10^{-6} a 10^{-8} cm/s variará de 0.1 a 0.3, dependiendo del tipo específico de arcilla.

IV.5 Destino de los constituyentes en el lixiviado en migración subterránea

Metales pesados

En general, los metales pesados son removidos por reacciones iónicas cuando el lixiviado se mueve a través del suelo mientras las trazas orgánicas son removidas principalmente por absorción. La habilidad de un suelo para retener los metales pesados encontrados en el lixiviado es una función de la capacidad de intercambio de cationes (CEC) del suelo. El CEC de un suelo depende de la cantidad de mineral y materia orgánica coloidal presente en el suelo matriz. El total de la CEC de un suelo se define como el número de miliequivalentes (meq) de cationes que 100 gramos de suelo absorberá.

La capacidad de un relleno de arcilla para tomar metales pesados puede ser estimada como sigue. Asumiendo que la CEC de un material de 100meq/100g. Si la densidad del material arcilloso usado en la capa es 2194.5 kg/m^3 (gravedad específica igual a 2.2), entonces cerca de 300meq de cationes pueden ser absorbidos por pie cúbico de material. Usando un valor típico de 20 mg/meq para metales pesados, la cantidad de metal que pudiera ser absorbido por pie cúbico es igual a 60 g. Si la concentración de metales pesados en el lixiviado fue de 100 mg/l, los metales pesados pueden ser removidos de 600 l de lixiviado. Si la permeabilidad de la arcilla es igual a 1×10^{-7} cm/s, entonces 2.83 l pasarán a través de 1000 cm^2 cada año. En éste intervalo de filtración, tomaría 212 años para saturar los originales m^3 de arcilla.

IV.6 Control del lixiviado en rellenos

En tanto el lixiviado se filtra a través del estrato, muchos constituyentes químicos y biológicos originalmente contenidos en él serán removidos por la acción filtrante y de absorción del material que compone el estrato. Debido al riesgo potencial involucrado en permitir al lixiviado filtrarse al agua subterránea, la mejor práctica llama a su eliminación o contenerlo.

Las capas en los rellenos son ahora normalmente usadas para limitar o eliminar el movimiento del lixiviado y biogases del sitio de relleno. La arcilla es favorecida por su habilidad para absorber y retener muchos de los constituyentes químicos encontrados en el lixiviado y por su resistencia al flujo de éste. Las características, ventajas, y desventajas de las geomembranas que han sido usadas para RSM están resumidas en el Cuadro 4.4 y las especificaciones típicas para geomembranas están dadas en el Cuadro 4.5.

Sistemas de capas para desechos sólidos municipales

El objetivo en el diseño de capas para rellenos es minimizar la infiltración del lixiviado en el suelos subterráneos debajo del relleno para así eliminar la contaminación potencial del agua subterránea. Algunos de los muchos tipos de diseño de capas que han sido usadas están ilustradas en la Figura 4.3.

CUADRO 4.4
Guías para facilitar el control del lixiviado

Item	Comentarios
Capas de membranas flexibles sintéticas	Las capas deben ser diseñadas y construidas para contener fluidos, los cuales incluirán desechos y lixiviados. Para la administración de desechos en RSM, las capas sintéticas no son requeridas. Sin embargo, si esta alternativa es seleccionada, las capas sintéticas deben tener un mínimo de espesor de 40 mils. Estas capas deben ser instaladas para cubrir todos los materiales geológicos que están en contacto con desechos o lixiviados en una unidad de administración de residuos.
Sellos abajo	No existen regulaciones específicas para la aplicación de sellos abajo en las unidades de administración de RSM. El diseño, construcción e instalación de los sellos son sujeto de la aprobación de las autoridades locales.
Capas de barro artificiales	Las capas de arcilla son opcionales para rellenos de RSM. Si son requeridos por las condiciones del sitio, las capas de arcilla para las unidades de MSW deben tener un mínimo de 1 pie de espesor y deben estar instaladas a una compactación relativa de al menos 90 por ciento. Una capa de arcilla debe exhibir una permeabilidad máxima de 1×10^{-6} cm/s. Las capas de arcilla, si son instaladas, deben cubrir todos los materiales geológicos naturales que están en contacto con el desecho o el lixiviado en una unidad de administración de desechos.
Barreras subterráneas	Una barrera subterránea se usa en conjunción con materiales naturales geológicos para asegurar que los estándares de permeabilidad son satisfechos. Las barreras pueden ser requeridas por las autoridades ambientales encargadas de las unidades de desechos en un MSW para movimiento lateral del fluido, incluyendo desechos y lixiviado, y la permeabilidad de los materiales geológicos naturales es usada para contener el desecho en lugar de capas. Las barreras deben tener un mínimo de 60 cm de altura para arcillas o un mínimo de 4 mm para materiales sintéticos. Las barreras son requeridas para tener sistemas de colección del fluido de la estructura. Los sistemas deben diseñarse, construirse, operarse y mantenerse para prevenir la acumulación de carga hidráulica en contra de la estructura. El sistema colector debe inspeccionarse regularmente y remover el fluido acumulado.

CUADRO 4.5
Pruebas realizadas para medir las propiedades de capas de geomembranas sintética y valores típicos para estas propiedades.

Pruebas	Método de Prueba	Valores Típicos
Categoría en Fuerza		
Propiedades para tensarse	ASTM D368, Tipo IV; dumbbell 2 pulg/min	
Fuerza de tensión al ceder		168.73 kg/cm ²
Fuerza de tensión cuando se rompe		281.22 kg/cm ²
Elongación al ceder		0.15
Elongación al romperse		7
Resistencia		
Resistencia al inicio de romperse	ASTM D1004 die C	20.4 kg
Resistencia a pincharse	FTMS 101B, Método 2031	104.32 kg
Temperaturas bajas para quebrarse	ASTM D746, procedimiento B	-70°C
Durabilidad		
Porcentaje de carbón negro	ASTM D1603	0.02
Dispersión de carbón negro	ASTM D3015	A-1
Envejecimiento acelerado con calor	ASTM D573, D1349	Cambio en la fuerza después de 1 mes a 110°C
Resistencia Química		
Resistencia a mezclas de desechos químicos	EPA Método 9090	10% en el cambio de la fuerza de tensión sobre 120 días
Resistencia a agentes puros químicos	ASTM D543	10% en el cambio de la fuerza de tensión sobre 7 días
Resistencia de romperse con el esfuerzo		
Resistencia ambiental para romperse	ASTM D1693, condición C	1500 h

Construcción de capas de arcilla

En todos los diseños de capas ilustrados anteriormente, muchos cuidados deben ser ejercitados en la construcción de las capas de arcilla. Quizá el más serio problema con el uso de la arcilla es su tendencia a formar grietas debido a la desecación. Para asegurar que la arcilla actúe como se diseñó, la capa de arcilla debe estar recostada en 10- a 15- cm de capas con adecuada compactación. Otro problema que se ha encontrado cuando las arcillas de diferentes tipos han sido usadas es el quebrantamiento debido a la dilatación diferencial. Para evitar estos problemas sólo un tipo de arcilla debe ser usada en la construcción de la capa.

IV.7 Sistemas de colección de Lixiviados

El diseño de un sistema de colección de lixiviados involucra (1) la selección del tipo de sistema de capa a usar, (2) el desarrollo del plan incluyendo el lugar de la colección de lixiviado, canales de drenaje y tuberías para remover el lixiviado, y (3) la distribución y diseño de las facilidades para remover, coleccionar y sostener el lixiviado.

Selección del sistema de capas

El tipo de sistema de capas seleccionado dependerá en una larga extensión en la geología local y requisitos ambientales del sitio del relleno. Por ejemplo, en locaciones donde no hay agua subterránea, una sencilla capa de arcilla compactada podría ser suficiente. En sitios donde tanto el lixiviado y la migración de gas deben ser controlados, una capa combinada comprimida de arcilla, una geomembrana con un apropiado drenaje y una capa de protección del suelo serán necesarias.

Diseño de facilidades para colectar el lixiviado

Una gran variedad de diseños de capas han sido usados para remover el lixiviado del relleno. La terraza con pendiente y tuberías por debajo se discuten a continuación.

Terrazas con pendiente

Para evadir la acumulación de lixiviado abajo del relleno, el área de abajo es graduada en una serie de terrazas con pendientes. Las terrazas están formadas para que el lixiviado que se acumula en la superficie de las terrazas drene a los canales colectores. Las tuberías perforadas colocadas en cada canal colector son usadas para guiar el lixiviado coleccionado a un sitio central, del cuál es removido para tratamiento o reaplicación a la superficie del relleno.

La pendiente de las terrazas es usualmente de 1 a 5%, y la pendiente de los canales de drenaje son de 0.5 a 1.0%.

Tuberías abajo

Las tuberías colectoras del lixiviado están colocadas directamente sobre la geomembrana. Las tuberías colectoras de 10 cm tienen perforaciones, sobre la mitad de su circunferencia. Los orificios están espaciados 6.35 mm y el tamaño del orificio es de 0.00254 mm, correspondiente al más pequeño grano de arena. Las tuberías colectoras, espaciadas cada 6 m, están cubiertas con 60 cm de capa de arena antes de que empiece a operar el relleno.

Opciones en el manejo del lixiviado

Una variedad de alternativas han sido usadas para manejar el lixiviado colectado de rellenos incluyendo: (1) Reciclado de lixiviado, (2) evaporación de lixiviado, (3) tratamiento seguido por disposición, y (4) descarga a sistemas colectores de desechos municipales.

Reciclado de lixiviado

Un método efectivo para el tratamiento del lixiviado es coleccionar y recircular el lixiviado a través del relleno. Cuando el lixiviado es recirculado, los constituyentes son atenuados por actividad biológica y por otras reacciones químicas y físicas que ocurren dentro del relleno. Por ejemplo, los ácidos simples orgánicos presentes en el lixiviado serán convertidos de CH_4 a CO_2 . Un beneficio adicional de recircular el lixiviado es la recuperación de biogas que contiene CH_4 .

Típicamente, el intervalo de producción de gas es mayor en sistemas de recirculación de lixiviados. Para evadir la liberación incontrolada de biogas cuando el lixiviado es recirculado para tratamiento, el relleno debe equiparse con un sistema de recuperación de gas.

Evaporación del lixiviado

Uno de los más sencillos sistemas de administrar el lixiviado involucra el uso de evaporación del lixiviado en estanques. El lixiviado que no es evaporado es rociado en las porciones completadas del relleno. El lixiviado acumulado es disponible a evaporarse durante los meses calientes de verano, descubriendo las facilidades de guardado, y rociando el lixiviado en la superficie del relleno completado y operando. Los gases olorosos que se pudieran acumular debajo de la superficie que lo cubre son llevados a un suelo filtrante.

Durante el verano cuando el estanque es descubierto, la aeración superficial puede requerir controlar los malos olores.

Tratamiento del lixiviado

Cuando la recirculación y evaporación del lixiviado no es usado, y la disposición directa del lixiviado a un tratamiento no es posible, alguno de los pretratamientos o tratamientos completos será requerido. Porque las características del lixiviado colectado pueden variar ampliamente, varias opciones han sido usadas para el tratamiento del lixiviado.

Selección de las opciones para el tratamiento

El tipo de tratamiento usado dependerá primordialmente de las características del lixiviado y segundo de la ubicación geográfica y física del relleno. Los altos valores de COD favorecen al tratamiento anaeróbico porque el tratamiento aerobio es costoso. Las concentraciones altas de sulfatos pueden limitar el uso del tratamiento anaeróbico debido a la producción de olores de la reducción biológica del sulfuro. La capacidad del tratamiento dependerá del tamaño del relleno y la vida útil esperada.

Sistema integrado del manejo del lixiviado

El lixiviado que se mueve hacia abajo a través del desecho sólido es primero filtrado en tanto pasa la capa de arena en el relleno. El lixiviado es transportado a una laguna de tratamiento. El líquido en la laguna es aerado para reducir el contenido orgánico y controlar los olores.

IV.8 Control del agua superficial

Igualmente importante para controlar el movimiento del lixiviado es el manejo de todas las aguas superficiales incluyendo la lluvia, corrientes hechas por tormentas y pozos artesianos. Con el uso de un diseño apropiado de capa cobertora, una apropiada pendiente del terreno (3 a 5%), un adecuado drenaje pluvial, la infiltración superficial puede ser controlada efectivamente.

Sistemas de control de agua superficial

La eliminación o reducción de la cantidad de agua superficial que entra a un relleno es de fundamental importancia en el diseño porque el agua superficial es la mayor contribuidora del volumen total del lixiviado.

Opciones de drenaje para el agua superficial

En esos sitios donde el agua de lluvia de las áreas circundantes pueden entrar al relleno (p.ej. rellenos situados en cañones), el lugar debe estar dimensionado debidamente y su drenaje propiamente diseñado. En los sitios donde solamente el agua superficial de arriba del relleno debe ser removida, las opciones para el drenaje deben ser diseñadas para limitar la distancia de recorrido del agua superficial.

Capas de cubierta intermedia

Son usadas para cubrir los desechos puestos cada día para eliminar enfermedades y limitar los desechos. Parte del agua, en forma de lluvia, entra mientras los desechos están siendo puestos en el relleno. El agua también entra al relleno por primera vez infiltrándose y subsecuentemente percolándose a través de la cubierta intermedia del relleno.

Capa final de la cubierta

Los propósitos primarios de una capa final de un relleno son (1) minimizar la infiltración de agua de lluvia después de que el relleno ha sido completado, (2) limitar la liberación incontrolada de biogases, (3) suprimir la proliferación de vectores, (4) limitar el potencial para fuegos, (5) proveer una superficie adecuada para la reforestación del sitio, y (6) servir como elemento central en el uso final del sitio. Para conocer estos propósitos la cubierta del relleno (1) debe estar disponible a resistir climas extremos, (2) debe estar disponible a resistir erosiones por agua y aire, (3) debe tener estabilidad en contra de desplomes, quebraduras y fallas de pendiente, (4) debe resistir los efectos de asentamientos diferenciales en el relleno causados por la liberación de biogas y la compresión del desecho y el suelo de cimentación, (5) debe resistir fallas debido a las operaciones de llenado tales como cargas de llenado en pilas y los viajes de vehículos colectores a través de las porciones completadas del relleno, (7) debe resistir alteraciones para cubrir materiales causadas por constituyentes en el biogas, y (8) debe resistir rupturas causadas por plantas, animales, gusanos e insectos.

Diseños típicos de cubiertas

Algunos tipos de diseños de cubiertas están ilustrados en la figura 4.3. En la figura 4.3a, el filtro geotextil es usado para limitar la mezcla de suelo con la arena de la capa. El uso de una barrera compuesta de una geomembrana y una capa de arcilla está mostrado en la figura 4.3b. En el diseño mostrado en la figura 4.3c, una capa de arena o grava es sustituida por una capa de drenaje. En el diseño mostrado en la figura 4.3d, una capa delgada de suelo de 1.5 a 3 metros es usada como la capa cobertora. La profundidad del suelo es usada para retener el agua de lluvia que no corre y se infiltra en el suelo de la cubierta.

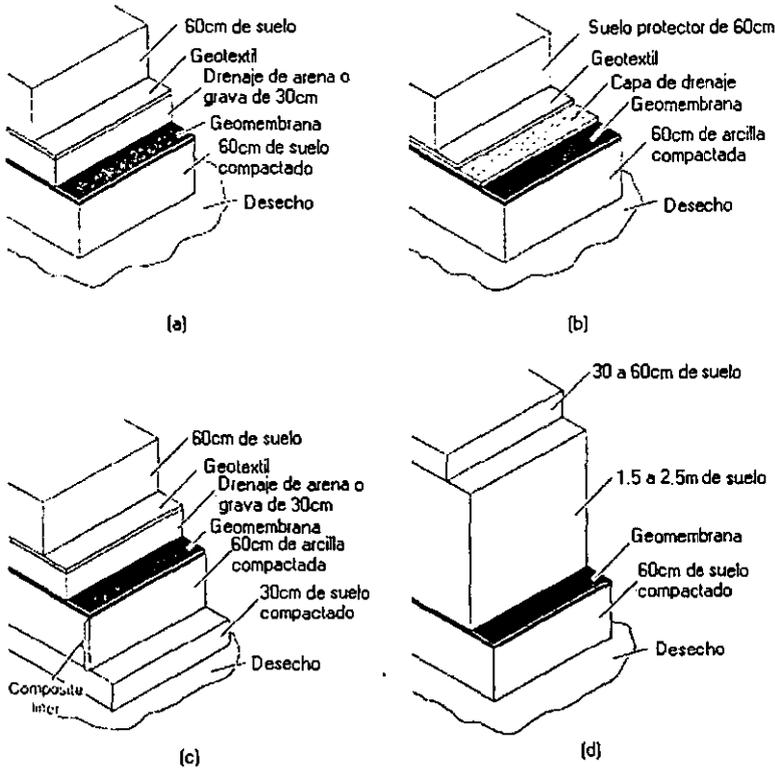


Figura 4.3 Diseños típicos de cubiertas finales para rellenos sanitarios

CUADRO 4.6

Componentes típicos que constituyen una cubierta del relleno

Componente	Materiales Típicos
Capa superficial	Suelo para cubierta disponible,
Capa protectora	local o importado
Capa de drenaje	Arena, Grava, separador geotextil
Capa de barrera	Geomembrana (Ver Cuadro 4.5)
Subbase	Suelo nativo compactado y graduado

IV.9 Determinación de la percolación a través de las capas cobertoras intermedias y finales

Si se asume (1) que el material cobertor está saturado, (2) que una capa delgada de agua está mantenida en la superficie, y (3) que no hay resistencia al flujo debajo de la capa cobertora, entonces la cantidad teórica de agua, expresada en m³, que pudiera entrar al

relleno por unidad de área en un período de 24 horas para varios materiales cobertores está dada en el Cuadro 4.3 en la columna 3. En la práctica actual, la cantidad de agua entrante al relleno dependerá de las condiciones hidrológicas locales, el diseño de la cubierta, la pendiente final del relleno y si ha sido plantada vegetación.

La estimación del intervalo de percolación de lluvia a través de la capa de suelo arriba de la capa de drenaje o a través de una capa cobradora compuesta solo de suelo es usualmente determinada usando uno de tantos programas simuladores hidrológicos disponibles. Se puede calcular el balance de agua para un relleno con cubierta de suelo con la expresión siguiente:

$$\Delta S_{LC} = P - R - ET - PER_{sw} \quad (4.6)$$

donde

ΔS_{LC} = cambio en la cantidad de agua almacenada en una unidad de volumen de la cubierta del relleno, cm

P = cantidad de precipitación por unidad de área, cm

R = cantidad de fuga por unidad de área, cm

ET = cantidad de agua perdida durante la evapotranspiración por unidad de área, cm

PER_{sw} = cantidad de agua filtrada a través de una unidad de área de la cubierta del relleno al desecho sólido compactado, cm

IV.10 Caso de generación de lixiviado en un relleno sanitario ubicado en Irapuato, Guanajuato

En este apartado se calculará la cantidad anual de lixiviados producidos en el relleno sanitario, considerando que en su primera etapa se operará por un período de seis años y de cinco en la segunda. Los cálculos se harán hasta completar 5 capas de residuos sólidos ya que en ambas etapas de operación coincide dicha condición. Para simplificar los cálculos, se determinará la cantidad de lixiviados producidos en un área unitaria de 1 m² y luego se convertirá la solución para tomar en cuenta la cantidad total de residuos depositados en el relleno.

Se cuenta con los siguientes datos:

1. Cantidad de residuos
 - a) Residuos depositados por día = 268.62 ton
 - b) Número de días de operación = 312
 - c) Residuos depositados por año = 83,808.015 ton
2. Características de los residuos
 - a) Peso volumétrico compactado = 0.895 ton/m³
 - b) Contenido de humedad de los residuos = 30% en masa

3. Características del relleno

a) General

- i) Altura de la capa = 3.15 m (promedio)
- ii) Proporción de residuos a cobertura 1:0.25 por volumen
- iii) Número de capas: 5

b) Material de cubierta

Peso específico = 1,780 kg/m³ (incluye humedad)

c) Producción de gas

Se estima que la producción de gas en una columna de 1 m² de área y 3 m de altura será: (31.72 kg/m³ de CH₄ + 77.39 kg/m³ de CO₂) x 3 m³ = 327.33 kg.

Que corresponde a : 327.3 kg/12 años = 27.27 kg/año

4. Para determinar la cantidad de lluvia que se infiltra en el relleno es necesario hacer un balance entre la precipitación, evaporación y escurrimiento. Para lo anterior se consideran datos promedio mensuales de precipitación y evaporación, y se estimó en 30% el coeficiente de escurrimiento. Adicionalmente se debe conocer el déficit inicial de humedad del material de cobertura, el cuál se determina a continuación:

$$FC = 0.27 \times 10 \text{ mm/cm} = 2.7 \text{ mm/cm}$$

$$PWP = 0.12 \times 10 \text{ mm/cm} = 1.2 \text{ mm/cm}$$

$$SM = (2.7 \text{ mm/cm} - 1.2 \text{ mm/cm}) \times 30 \text{ cm} = 45 \text{ mm}$$

El déficit inicial de humedad del material de cobertura es:

$$SM_d = (2.7 \times 0.5 - 1.2) \times 30 = 4.5 \text{ mm}$$

En el Cuadro 4.7 se muestra el análisis para determinar la lluvia infiltrada.

Cuadro 4.7
Análisis para determinar la lluvia infiltrada

Mes	Precipitación mm	Evaporación mm	Escurrimiento mm	Humedad (+) ganada o (-) perdida mm	Déficit del material de cobertura mm	Infiltración potencial mm
Enero	4.08	3.98	1.22	-1.12	-5.62	0
Febrero	7.42	5.63	2.23	-0.44	-6.06	0
Marzo	3.87	7.5	1.16	-4.79	-10.85	0
Abril	7.85	8.33	2.36	-2.84	-13.69	0
Mayo	36.83	8.14	11.05	17.64	0	3.95
Junio	113.62	7.62	34.09	71.91	0	71.91
Julio	203.63	6.2	61.09	136.34	0	136.34
Agosto	135.47	6.2	40.64	88.63	0	88.63
Septiembre	106.3	5.58	31.89	68.83	0	68.83
Octubre	33.67	5	10.1	18.57	0	18.57
Noviembre	5.18	4.31	1.55	-0.68	-0.68	0
Diciembre	12.88	3.72	3.86	5.3	0	4.62
						$\Sigma = 392.85$

Se estima que la lluvia que se infiltra es de 392.85 mm.

Para determinar la cantidad de lixiviados que se generarán en el relleno se utiliza el método propuesto por George Tchobanoglous en Solid Waste Management, Ed. McGraw-Hill.

IV.11 Análisis para obtener la generación de lixiviados

1. Definición de los elementos del balance de agua para la primera capa

a) Cálculo del peso del material de cubierta y residuos en cada capa

Porcentaje del material de cobertura con respecto a la altura de la capa = 5%

Peso del material de cobertura = $1,780 \text{ kg/m}^3 \times 3.15 \text{ m} \times 0.05 \times 1 \text{ m}^2 = 280.35 \text{ kg}$

Porcentaje del residuo sólido con respecto a la altura de la capa = 95%

Peso del residuo sólido = $892 \text{ kg/m}^3 \times 3.15 \times 0.95 \times 1 \text{ m}^2 = 2,669.3 \text{ kg}$

Peso total de la capa = $280.35 \text{ kg} + 2,669.3 \text{ kg} = 2,949.3 \text{ kg}$

b) Peso seco de los residuos sólidos: $2,669.3 \text{ kg} \times 0.70 = 1,868.51 \text{ kg}$

c) Contenido de humedad en los residuos: $2,669.3 \text{ kg} \times 0.30 = 800.79 \text{ kg}$

d) Peso de la lluvia que entra al relleno cada año: $0.39 \times 1 \text{ m}^2 \times 1 \text{ T/m}^3 = 393 \text{ kg}$

e) Peso total de la capa = $2,949.3 \text{ kg} + 393 \text{ kg} = 3,342.30 \text{ kg}$

2. Balance de agua para la capa 1 y determinación del lixiviado esperado en la capa 1

a) Cantidad de agua requerida en la producción de gas

Agua consumida: 0 kg en la primera capa

b) Peso del gas producido = 0 kg en la primera capa

c) Cálculo del peso del agua en el residuo sólido de la capa 1

Peso del agua = $800.79 \text{ kg} + 393 \text{ kg}$ (precipitación) = $1,193.79 \text{ kg}$

d) Cálculo del peso seco de los residuos sólidos en la capa 1

Peso seco del residuo = $1,868.51 \text{ kg} - 0$ (gas) $- 0$ (agua consumida) = $1,868.51 \text{ kg}$

e) Peso promedio = $0.5 (1,868.51 + 1,193.79) + 280.35 = 1,811.5 \text{ kg}$

f) Cálculo del factor de capacidad de campo

$$FC = 0.6 - 0.55 (W / (10,000 + W))$$

$$FC = 0.6 - 0.55 (3,993.67 / (10,000 + 3,993.67))$$

g) Cantidad de agua que puede ser retenida en el residuo sólido

Agua retenida en la capa 1 = $0.44 \times 1,868.51 \text{ kg} = 822.14 \text{ kg}$

h) Cantidad de lixiviado formado

Lixiviado formado = agua en el residuo $-$ capacidad de campo

$$= 1,193.79 \text{ kg} - 822.14 \text{ kg} = 371.65 \text{ kg}$$

i) Agua remanente en la capa 1

Agua remanente = $1,193.79 \text{ kg} - 371.65 \text{ kg} = 822.14 \text{ kg}$

j) Peso total de la capa

$$\begin{aligned}\text{Peso total} &= \text{peso seco} + \text{agua remanente} + \text{cobertura} \\ &= 1,868.51 + 822.14 + 280.35 = 2,971.00 \text{ kg}\end{aligned}$$

3. Balance de agua para las capas 1 y 2 al final del año 2 y determinación del lixiviado esperado en la capa 1

- a) Cantidad de agua requerida en la producción de gas

$$\text{Agua consumida total} = 148.68 / 610.85 \times 89.76 \text{ kg/m}^3 \times 3 \text{ m}^3 = 65.54 \text{ kg}$$

$$\text{Cada año} = 65.43 / 12 = 5.46 \text{ kg}$$

- b) Peso del gas producido = 27.27 kg

- c) Cálculo del peso de agua en el residuo sólido de la capa 1 al final del año 2

$$\text{Peso del agua} = 822.14 \text{ kg} - 5.45 \text{ kg} + 371.65 \text{ kg} = 1,188.33 \text{ kg}$$

- d) Cálculo del peso seco de los residuos sólidos en la capa 1 al final del año 2

$$\text{Peso seco del residuo} = 1,868.51 \text{ kg} - (27.27 - 5.45) = 1,846.69 \text{ kg}$$

- e) Peso promedio de los residuos colocados en la capa 1

$$\begin{aligned}\text{Peso promedio} &= 2,971.00 (\text{capa 2}) + 0.5 (1,864.70 + 1,188.34) + 280.35 \\ &= 4,777.87 \text{ kg}\end{aligned}$$

- f) Cálculo del factor de capacidad de campo

$$\text{FC} = 0.6 - 0.55 (W/(10,000 + W))$$

$$\text{FC} = 0.6 - 0.55 (10,533.39/(10,000 + 10,533.39))$$

- g) Cantidad de agua que puede ser retenida en el residuo sólido

$$\text{Agua retenida en la capa 1} = 0.32 \times 1,846.69 = 590.94 \text{ kg}$$

- h) Cantidad de lixiviado formado

$$\begin{aligned}\text{Lixiviado formado} &= \text{agua en el residuo} - \text{capacidad de campo} \\ &= 1,188.34 - 590.94 = 597.40 \text{ kg}\end{aligned}$$

- i) Agua remanente en la capa 1

$$\text{Agua remanente} = 1,188.34 - 597.40 = 590.94 \text{ kg}$$

- j) Peso total de la capa 1 al final del año 2

$$\begin{aligned} \text{Peso total} &= \text{peso seco} + \text{agua remanente} + \text{cobertura} \\ &= 1,846.69 + 590.94 + 280.35 = 2,717.98 \text{ kg} \end{aligned}$$

4. Balance de agua para las capas 1,2 y 3 al final del año 3 y determinación del lixiviado esperado en la capa 1

- a) Cantidad de agua requerida en la producción de gas

$$\text{Agua consumida total} = 148.68 / 610.85 \times 89.76 \text{ kg/m}^3 \times 3 \text{ m}^3 = 65.54 \text{ kg}$$

$$\text{Cada año} = 65.54 / 12 = 5.46 \text{ kg}$$

$$\text{Agua consumida} = 2 \text{ capas} \times 5.46 = 10.9 \text{ kg}$$

- b) Peso del gas producido = $2 \times 27.27 = 54.54 \text{ kg}$

- c) Cálculo del peso del agua en el residuo sólido de la capa 1 al final del año 3

$$\text{Peso del agua} = 590.94 - 10.9 + 597.40 = 1,177.44 \text{ kg}$$

- d) Cálculo del peso seco de los residuos sólidos en la capa 1 al final del año 3

$$\text{Peso seco del residuo} = 1,846.69 - (54.54 - 10.9) = 1,803.05 \text{ kg}$$

- e) Peso promedio de los residuos colocados en la capa 1

$$\begin{aligned} \text{Peso promedio} &= 2,971.00 \text{ (capa 3)} + 2,717.98 \text{ (capa 2)} + 0.5 (1,803.05 + \\ &\quad + 1,177.44) + 280.35 = 7,459.58 \text{ kg} \end{aligned}$$

- f) Cálculo del factor de capacidad de campo

$$FC = 0.6 - 0.55 (W / (10,000 + W))$$

$$FC = 0.6 - 0.55 (16,457.56 / (10,000 + 16,457.56))$$

- g) Cantidad de agua que puede ser retenida en el residuo sólido

$$\text{Agua retenida en la capa 1} = 0.26 \times 1,803.05 = 468.79 \text{ kg}$$

- h) Cantidad de lixiviado formado

$$\text{Lixiviado formado} = \text{agua en el residuo} - \text{capacidad de campo}$$

$$= 1,177.44 - 468.79 = 708.65 \text{ kg}$$

- i) Agua remanente en la capa 1 al final del año 3

$$\text{Agua remanente} = 1,188.34 - 719.55 = 468.79 \text{ kg}$$

- j) Peso total de la capa 1 al final del año 3

$$\text{Peso total} = \text{peso seco} + \text{agua remanente} + \text{cobertura}$$

$$= 1,803.05 + 468.79 + 280.35 = 2,552.19 \text{ kg}$$

5. Balance de agua para las capas 1, 2, 3 y 4 al final del año 4 y determinación del lixiviado esperado en la capa 1

- a) Cantidad de agua requerida en la producción de gas

$$\text{Agua consumida total} = 148.68 / 610.85 \times 89.76 \text{ kg/m}^3 \times 3 \text{ m}^3 = 65.54 \text{ kg}$$

$$\text{Cada año} = 65.54 / 12 = 5.46 \text{ kg}$$

$$\text{Agua consumida} = 3 \text{ capas} \times 5.46 \text{ kg} = 16.38 \text{ kg}$$

- b) Peso del gas producido = $3 \times 27.27 = 81.81 \text{ kg}$

- c) Cálculo del peso del agua en el residuo sólido de la capa 1 al final del año 4

$$\text{Peso del agua} = (468.79 - 16.38) + 719.55 = 1,171.96 \text{ kg}$$

- d) Cálculo del peso seco de los residuos sólidos en la capa 1 al final del año 4

$$\text{Peso seco del residuo} = 1,803.05 - (81.81 - 16.38) = 1,737.62 \text{ kg}$$

- e) Peso promedio de los residuos colocados en la capa 1

$$\text{Peso promedio} = 2,971.00 \text{ (capa 4)} + 2,717.98 \text{ (capa 3)} + 2,552.19 \text{ (capa 2)} \\ + 0.5 (1,737.59 + 1,171.96) + 280.35 = 9,976.30 \text{ kg}$$

- f) Cálculo del factor de capacidad de campo

$$\text{FC} = 0.6 - 0.55 (W / (10,000 + W))$$

$$\text{FC} = 0.6 - 0.55 (21,994.00 / (10,000 + 21,994.00))$$

- g) Cantidad de agua que puede ser retenida en el residuo sólido

$$\text{Agua retenida en la capa 1} = 0.22 \times 1,737.59 = 382.27 \text{ kg}$$

- h) Cantidad de lixiviado formado

$$\text{Lixiviado formado} = \text{agua en el residuo} - \text{capacidad de campo}$$

$$= 1,171.99 - 382.27 = 789.72 \text{ kg}$$

- i) Agua remanente en la capa 1 al final del año 4

$$\text{Agua remanente} = 1,171.99 - 789.72 = 382.27 \text{ kg}$$

- j) Peso total de la capa 1 al final del año 4

$$\begin{aligned} \text{Peso total} &= \text{peso seco} + \text{agua remanente} + \text{cobertura} \\ &= 1,737.59 + 382.27 + 280.35 = 2,400.21 \text{ kg} \end{aligned}$$

6. Balance de agua para las capas 1, 2, 3, 4 y 5 al final del año 5 y determinación del lixiviado esperado en la capa 1.

- a) Cantidad de agua requerida en la producción de gas

$$\text{Agua consumida total} = 148.68 / 610.85 \times 89.76 \text{ kg/m}^3 \times 3 \text{ m}^3 = 65.54 \text{ kg}$$

$$\text{Cada año} = 65.54 / 12 = 5.46 \text{ kg}$$

$$\text{Agua consumida} = 4 \text{ capas} \times 5.46 \text{ kg} = 21.8 \text{ kg}$$

- b) Peso del gas producido = $4 \times 27.27 = 109.08 \text{ kg}$

- c) Cálculo del peso del agua en el residuo sólido de la capa 1 al final del año 5

$$\text{Peso del agua} = 382.27 - 21.8 + 789.72 = 1,150.19 \text{ kg}$$

- d) Cálculo del peso seco de los residuos sólidos en la capa 1 al final del año 5

$$\text{Peso seco del residuo} = 1,737.59 - (109.8 - 21.8) = 1,650.31 \text{ kg}$$

- e) Peso promedio de los residuos colocados en la capa 1

$$\begin{aligned} \text{Peso promedio} &= 2,971.00 \text{ (capa 5)} + 2,717.98 \text{ (capa 4)} + 2,552.19 \text{ (capa 3)} \\ &+ 2,400.21 \text{ (capa 2)} + 0.5 (1,650.31 + 1,150.19) + 280.35 = 12,321.98 \text{ kg} \end{aligned}$$

- f) Cálculo del factor de capacidad de campo

$$FC = 0.6 - 0.55 (W/(10,000 + W))$$

$$FC = 0.6 - 0.55 (27,165.32 / (10,000 + 27,165.32))$$

- g) Cantidad de agua que puede ser retenida en el residuo sólido

$$\text{Agua retenida en la capa 1} = 0.20 \times 1,650.31 = 330.06 \text{ kg}$$

- h) Cantidad del lixiviado formado

$$\text{Lixiviado formado} = \text{agua en el residuo} - \text{capacidad de campo}$$

$$= 1,150.19 - 330.06 = 820.13 \text{ kg}$$

- i) Agua remanente en la capa 1 al final del año 5

$$\text{Agua remanente} = 1,150.19 - 820.13 = 330.06 \text{ kg}$$

- j) Peso total de la capa 1 al final del año 5

$$\text{Peso total} = \text{peso seco} + \text{agua remanente} + \text{cobertura}$$

$$= 1,650.31 + 330.06 + 280.35 = 2,260.72 \text{ kg}$$

En el Cuadro 4.8 se muestra un resumen de las cantidades esperadas del lixiviado.

Cuadro 4.8
Producción de lixiviados

Capa No.	Total	
	kg/m ²	m ³ /m ²
1	371.65	0.372
2	597.40	0.597
3	708.65	0.709
4	789.72	0.790
5	820.13	0.820

Se observa que la presión ejercida por el lixiviado aumenta a medida que pasa por las capas del relleno sanitario.

Capítulo V
Impacto Ambiental Generado por los
Lixiviados y el Biogas de un Relleno
Sanitario y Medidas de Mitigación

Antecedentes

En este Capítulo se tratarán los temas que a continuación se enlistan:

- Rasgos físicos
- Rasgos biológicos
- Rasgos socioeconómicos
- Vinculación con las Normas y Regulaciones sobre Uso del Suelo
- Normatividad para la elección del sitio de disposición final
- Identificación de impactos ambientales

V.1 Rasgos físicos

V.1.1 Localización Geográfica

Para la construcción del relleno sanitario se debe especificar la distancia de éste a la ciudad más cercana, los cerros, montañas, laderas y todo desnivel cercano al relleno incluyendo las elevaciones de éstos. También se debe incluir los predios, terrenos o sitios colindantes al relleno. Las carreteras cercanas, si hay zonas agrícolas, de cultivo, ganadería, etc., cerca del lugar.

Se incluirán los datos de su latitud y longitud, para su localización geográfica.

V.1.2 Climatología

En la zona donde se proponga construir el relleno sanitario se tendrá que incluir el dato de si existen estaciones climatológicas cercanas al lugar.

Se debe decir que tipo de clima es, por ejemplo, muy húmedo, semi-húmedo, poco húmedo, frío, extremadamente frío, cálido, semi-cálido, etc. Así como la temperatura media anual y la precipitación en el lugar.

Se deben indicar los meses con mayor humedad, precipitación, heladas, sequías, etcétera.

Se incluirá también los datos sobre los vientos, las variaciones de éstos, los vientos dominantes, los reinantes, en que dirección vienen, en que temporada se presentan. Estos datos se pueden encontrar en el Servicio Meteorológico Nacional.

V.1.3 Calidad del aire

El sitio del proyecto debe estar alejado de zonas industriales y de las ciudades para evitar efectos contaminantes .

Cabe mencionar que se debe realizar el estudio de dispersión atmosférica o modelo gaussiano, el cuál se explica en el Capítulo 3 del presente trabajo.

V.1.4 Geomorfología y geología

La geomorfología en el sitio del proyecto puede corresponder a volcanes y valles. Se tiene que indicar si el componente de estos volcanes, cerros, montañas, etc., están erosionados, con drenaje, que tipo de roca es, los diámetros de los volcanes.

Los tipos de rocas que yacen cercanas al lugar son también importantes de indicar. También tenemos que incluir los estratos que se encuentran por debajo de éstas rocas. En la figura 5.1 se puede observar la geomorfología de la República Mexicana.

V.1.5 Estratigrafía

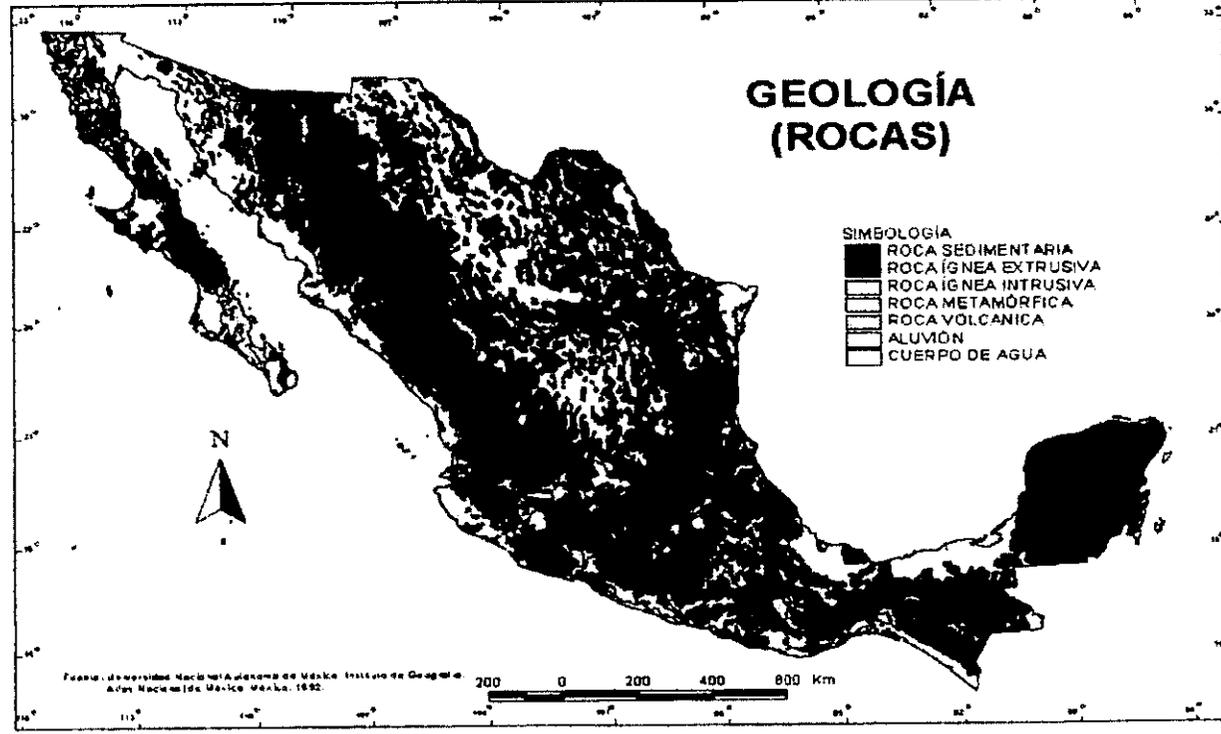
Aquí se tiene que indicar la composición de la capa principal, si es un basalto o es lutita, por ejemplo. Examinar las capas debajo de ésta.

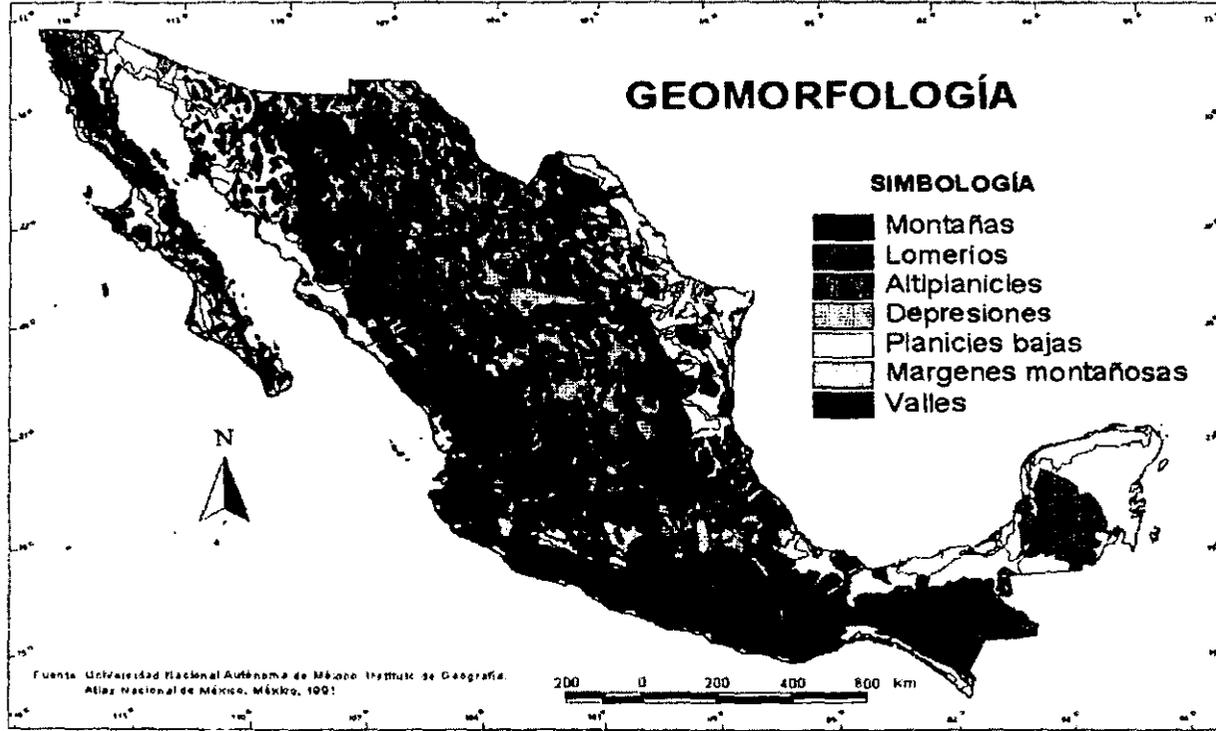
Se debe excavar a una profundidad satisfactoria para nosotros porque se pueden encontrar arenas, lo que puede significar problemas de infiltración a los mantos subterráneos.

Se debe detallar en un cuadro y una imagen los diferentes estratos que se tienen en el lugar, para facilidad de reconocimiento. Se puede observar en la figura 5.2 la geología de la República Mexicana.

V.1.6 Tipos de suelo

Es de importancia indicar el tipo de suelo que se encontrará en el lugar, si éste es derivado de aluviones, o son de roca o arenosos, etc. Se deben incluir datos como, el espesor de las capas, sus colores, su permeabilidad, si ésta es moderada o alta, su contenido de materia orgánica, su contenido de agua, si es ácido o no, etcétera.





En climas semiáridos o templados los suelos residuales son normalmente firmes y estables y no se extienden hasta gran profundidad. En cambio, en climas calientes y húmedos, en particular donde el tiempo de exposición ha sido largo, estos tipos de suelos pueden extenderse hasta profundidades de varias decenas de metros y ser firmes y estables. Bajo estas circunstancias llegan a ser la fuente de dificultades para las cimentaciones y otros tipos de construcción.

Las condiciones de los suelos del lugar donde ha de construirse una estructura son comúnmente exploradas por medio de sondeos, perforaciones o excavaciones a cielo abierto.

V.1.7 Susceptibilidad de la zona a sismicidad

Se indicará si la zona es asísmica, sísmica o penisísmica. Se indicará también las localizaciones, de las zonas cercanas al lugar de construcción del relleno, que presenten diferente sismicidad.

Se debe incluir el dato de fallas que existan cerca del lugar.

V.1.8 Hidrología

Indicar los ríos, lagunas, lagos, estanques y si el mar está cercano al sitio. También se incluirá la localización de pozos cercanos al sitio, ya que pudieran abastecer de agua a las poblaciones cercanas.

Se deberá investigar el nivel freático del agua, así como si hay acuíferos subterráneos, e investigar la calidad de agua de éstos.

V.2 Rasgos biológicos

V.2.1 Vegetación

Se tiene que explorar la zona en estudio para determinar el tipo de vegetación que existe en el lugar. Pero sobre todo asegurarse que no hay vegetación en peligro de extinción.

V.2.2 Fauna

La fauna dependerá de la vegetación que se tenga en el sitio, y puede verse afectada por tiraderos de basura cercanos o que el lugar esté desprovisto de vegetación suficiente. Debe asegurarse que no hayan especies en peligro de extinción en el sitio.

V.2.3 Ecosistema y Paisaje

En la zona donde se haya proyectado el relleno sanitario pudieran o no existir arroyos superficiales o cuerpos de agua. Esto puede modificar la situación de la fauna en el lugar y de la vegetación también. Pueden existir zonas de cultivo cercanas al lugar que pueden ser atractivo visual a las personas. Pueden modificarse las condiciones del paisaje para mejorar la calidad del ecosistema existente en el sitio.

V.2.4 Aspectos estéticos, turísticos y de interés histórico o patrimonial del la zona en estudio

Las ciudades cercanas al lugar pueden contrastar en su arquitectura, ya sea colonial o de corte antiguo, a una moderna y muy vistosa, así como construcciones históricas y de gran importancia.

Sin embargo, los rellenos deben ser proyectados alejados de estas construcciones por razones de higiene para la población, para evitar malos olores, y cuidar el paisaje del sitio.

V.3 Rasgos socioeconómicos

V.3.1 Población económicamente activa

Este dato se puede obtener con facilidad a partir de los Censos Generales de Población y Vivienda.

V.3.2 Grupos étnicos

Se debe hacer un estudio sobre la distribución de los grupos indígenas en el territorio nacional. Asimismo, conocer sus tradiciones, costumbres y las religiones practicadas por estos grupos.

También es importante saber si en la zona de estudio para el establecimiento del relleno sanitario, es un terreno el cual no esté destinado para el asentamiento de grupos étnicos y también que no haya alguna clase de conflicto por construirlo ahí.

Cuadro 5.1

Localidades Indígenas en la República Mexicana

Localidades indígenas	1990	1995
Total de localidades en México	156 602	201 138
Localidades con más de 70% de HLI*	13 179	11 924
Localidades con 30% a 69% de HLI	4 359	5 523
Localidades con menos de 30% de HLI	26 680	22 419

Localidades identificadas en los censos de población del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).

* HLI: Hablantes de Lengua Indígena.

V.3.3 Servicios

Medios de comunicación

La existencia de carreteras y autopistas en la zona facilitan el acceso al sitio y promueve el desarrollo de la región.

En cuanto a telecomunicaciones se debe ver si se cuenta con líneas telefónicas, radio, agencias de comunicación, etcétera.

Servicios públicos

El gobierno debe proporcionar servicios de agua potable, alcantarillado, alumbrado público, limpia y recolección de basura, mercados y centrales de abasto, parques y jardines, seguridad pública, regulación urbana y estacionamientos públicos, entre otros.

Centros de salud

Se debe investigar los servicios de salud que se prestan para cada estrato socioeconómico, como hospitales, clínicas, sanatorios, etcétera.

Vivienda

El alto índice de la tasa de crecimiento poblacional ocasiona un déficit en el aspecto de la vivienda, ocasionando el incremento de habitantes por vivienda y de asentamientos irregulares, dificultando que lleguen hasta ellos los servicios públicos.

V.3.4 Uso actual del suelo

Pudiera ser que se este usando como banco de extracción de materiales, o como zona de cultivo, por lo que se debe asegurar que ninguna actividad se vaya a llevar a cabo en el sitio.

V.3.5 Sectores productivos

Los sectores productivos son: Agricultura, Ganadería, Industria, Minería, Turismo, Comercio, Servicios, entre otros. Y se deben identificar estos servicios en el sitio.

V.4 Vinculación con las Normas y Regulaciones sobre Uso del Suelo

V.4.1 Generalidades

La planeación estatal y municipal es una obligación de los respectivos gobiernos con la ciudadanía, al tiempo que debe observar congruencia con las estrategias, metas y políticas que se contemplan en el Plan Nacional de Desarrollo.

Programas de desarrollo

La ley de planeación estipula que únicamente se tiene un Plan, en el que queda constituido por el Plan Nacional de Desarrollo, el cual dará vigencia a los programas que las dependencias del sector público federal enmarquen.

Los aspectos de Planeación Nacional del Desarrollo que corresponden a las Dependencias y Entidades de la Administración Pública Federal, se llevarán a cabo en los términos de esta Ley mediante el Sistema Nacional de Planeación Democrática.

Es a través de los Comités de Planeación para el Desarrollo (COPLADE), establecidos en cada entidad federativa, donde se analizan los programas sectoriales y gestionan su realización. En el seno del COPLADE también se revisa el grado de cumplimiento de las metas por alcanzar, detectándose posibles desviaciones y retroalimentando la capacidad de gestión de los municipios.

El Sistema Nacional de Planeación Democrática establece cuatro vertientes, para el logro de las metas de desarrollo, las cuales se refieren a la obligatoria, que trata sobre el cumplimiento de los programas sectoriales; la de coordinación, que se efectúa entre las entidades federativas, y las de inducción y concertación con los sectores sociales y privados.

Plan Nacional de Desarrollo

El Plan Nacional de Desarrollo establece que el desequilibrio ecológico resultado de los esquemas actuales de desarrollo en el país, es una preocupación vigente para la ciudadanía por lo que tienen una alta prioridad en el Gobierno Federal. Con esta finalidad el Plan establece como propósito prioritario el hacer del ordenamiento ecológico de las zonas y regiones del país un instrumento eficaz de protección del medio ambiente.

A través del ordenamiento ecológico se buscará ordenar los usos del suelo en su totalidad del territorio nacional, con la participación de las diversas instancias del gobierno y la cooperación de los sectores privados y sociales, dando prioridad a las regiones del país que, debido a su problema ambiental se consideren críticas y en aquellas zonas donde el ordenamiento constituya un instrumento preventivo a fin de lograr la mayor participación de los sectores productivos en su programación de las metas que tienen establecidas.

Programa Nacional para la Protección del Medio Ambiente

El Programa Nacional para la protección del Medio Ambiente constituye una respuesta a las inquietudes de los diversos sectores de la población, así como el diagnóstico que se ha realizado sobre la situación que guarda el medio circundante.

En el Plan Nacional de Desarrollo, la protección del ambiente representa una de las más altas prioridades del crecimiento, así como un requisito impostergable para dar viabilidad al proceso de modernización del país.

Bajo estas premisas fundamentales el Programa Nacional de Protección del Medio ambiente, se orienta a compatibilizar el proceso general de desarrollo con el reestablecimiento de la calidad del medio y la conservación y respeto a los recursos naturales.

La estrategia para la gestión ambiental en el ámbito del ordenamiento ecológico considera que "El equilibrio futuro entre las acciones productivas y el medio circundante depende de la planeación racional del territorio, donde se considere la vocación de cada zona, el cuidado de los recursos naturales, la distribución armónica de la población y sus actividades socioeconómicas".

Programa Nacional de Desarrollo Urbano

El programa se estructura a partir de los tres grandes objetivos de desarrollo urbano que señala el Plan Nacional de Desarrollo y con fundamento en la Ley General de Asentamientos Humanos, la cual señala en su Art. 4 que el Programa Nacional de Desarrollo Urbano es el principal elemento para "la ordenación y regulación de los asentamientos humanos en el país". La transformación del patrón de los asentamientos humanos en concordancia con las políticas de descentralización y de desarrollo económico; el mejoramiento de la calidad de los servicios urbanos, atendiendo preferentemente a los

grupos sociales más necesitados; y el fortalecimiento de la capacidad municipal para propiciar el sano desarrollo de las ciudades, mediante su ordenamiento y regulación.

Con la finalidad de incidir directamente en el crecimiento y desarrollo de los centros de población para alcanzar un mejor ordenamiento territorial de los asentamientos humanos e incrementar la dotación de servicios este programa ha propuesto un sistema urbano-regional, con base en asignar un sistema jerárquico a los principales núcleos de población.

Programa de 100 ciudades medias

Plantea el mejoramiento de los servicios urbanos y la promoción del desarrollo de los centros de población en las ciudades que cuentan con potencial para su desarrollo, impulsando las condiciones sociales y económicas favorables.

El programa pretende alcanzar 6 objetivos fundamentales:

1. Proporcionar el uso ordenado del suelo, mediante la adecuada planeación y administración urbana local.
2. Ofrecer suelo urbano a la población de escasos recursos y garantizar la conservación de áreas naturales en el entorno urbano.
3. Estructurar sistemas viales y de transporte público eficientes que eleven la productividad, el bienestar social y reduzcan la contaminación ambiental.
4. Mantener el equilibrio ecológico de los procesos urbanos, a través del cuidado de los recursos hidráulicos y su aprovechamiento racional, así como mejorar e incrementar el manejo, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos.
5. Promover la revitalización de los centros de las ciudades, rescatar su imagen urbana y fortalecer la convivencia y el sentido de identidad de sus habitantes.
6. Participación social en el desarrollo urbano de los centros de población.

Para asegurar una ejecución eficiente del Programa de 100 ciudades, se proponen 4 líneas de instrumentación:

- Consolidar la coordinación entre gobiernos federal, estatal y municipal en el marco del convenio de desarrollo social.
- Asegurar una acción coordinada de las dependencias federales vinculadas al desarrollo urbano.
- Contribuir al fortalecimiento y promoción de los responsables del desarrollo urbano municipal, mediante asistencia técnica.

- Fortalecer las instancias de participación de la sociedad en todas las fases del proceso de desarrollo urbano.

V.4.2 Política de desarrollo urbano

El Plan Director de Desarrollo presenta la adecuación, creación o implantación de acciones y programas encaminados a controlar algunos problemas ambientales en el municipio. Dentro de los programas específicos que impedirán el detrimento del medio ambiente, el Plan Director contempla los siguientes:

Programa Agrícola

Programa Ecológico

Programa de Corredores Urbanos

Programa de Tenencia y Regularización de la Tierra.

V.4.3 Desarrollo urbano

El Plan Director de Desarrollo Urbano determina las superficies de crecimiento urbano así como las áreas de equipamiento, evitando la dispersión de los núcleos urbanos y el incremento de los costos de la infraestructura y equipamiento. Para la ejecución del Plan Director se distinguen tres plazos:

- a) Corto Plazo, que se desarrollará de 1 a 2 años,
- b) Mediano Plazo, de 2 a 5 años para desarrollarse y,
- c) Largo Plazo, para desarrollarse en más de 5 años.

V.5 Normatividad para la elección del sitio de disposición final

En el Diario Oficial de la Federación el Proyecto de Norma Oficial Mexicana NOM-083-ECOL-1996, establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados para la disposición final de los residuos sólidos municipales en rellenos sanitarios; Dichas condiciones se presentan a continuación.

Condiciones que deben reunir los sitios de disposición final de residuos sólidos

CONDICIONES	Reune las cond. al proyecto	
	SI	NO
Profundidad del manto freático Deberá estar ubicado a una profundidad vertical mayor a 10 m del nivel freático		
Zona de recarga Deberá estar ubicado a una distancia mayor de un kilómetro y aguas debajo de las zonas de recarga de acuíferos o fuentes de abastecimiento de agua potable.		
Ubicación con respecto a la zona de fracturación Deberá ubicarse a una distancia horizontal de 100 m como mínimo del límite de la zona de fracturación o falla geológica.		
Características de los estratos del suelo Deberá reunir condiciones tanto de impermeabilidad como remoción de contaminantes, representadas estas por el coeficiente de permeabilidad de 1×10^{-5} cm/seg y por la capacidad de intercambio catiónico de 30 meq/100 gr de suelo.		
Material para cobertura Se deberá contar como mínimo con un 25% de material de cubierta en relación al volumen de los residuos municipales a disponer diariamente.		
Vida útil del sitio Vida útil mínima de 7 años.		
Ubicación con respecto a cuerpos de agua Deberá ubicarse a una distancia mayor de 1km de las zonas de inundación, cuerpos de agua y corrientes naturales.		
Ubicación con respecto a centros de población y vías de acceso Estará ubicado a una distancia mayor de 500m del área urbana; a una distancia mayor de 70m de las vías de comunicación terrestre, a una distancia mayor de 3km de áreas naturales protegidas y aeropuertos, así como respetar el derecho de vía a 20m de cada lado de líneas de conducción de energía eléctrica, oleoductos, potoductos, gaseoductos y a una distancia mayor de 150m de áreas de almacenamiento de hidrocarburos.		
Drenaje Deberá permitir la salida de aguas de lluvia naturalmente		
Topografía La pendiente media en la base del terreno natural del sitio no mayor de 30%		
Limitación No se podrá operar en zona fracturada		

V.6 Identificación de Impactos Ambientales

V.6.1 Metodología

V.6.1.1 Identificación de impactos

Para la identificación de impactos directos e indirectos de un proyecto se puede usar la técnica de listado simple y se puede dividir en dos partes: 1) Lista de actividades del relleno sanitario que pueden producir un efecto significativo en el medio; y 2) lista de factores ambientales que son potencialmente afectados por las actividades del relleno sanitario.

1) Lista de actividades del relleno sanitario que pueden producir un efecto significativo en el medio.

A continuación aparece la lista de actividades del relleno sanitario que pueden producir un efecto significativo en el medio.

A. Selección y preparación del sitio

1. Identificación y selección del sitio.
2. Campamentos.
3. Desmante y despalme.
4. Cortes y nivelación.
5. Préstamos de bancos de material.
6. Terraplenes.
7. Transporte de materiales y movimiento de equipo.
8. Construcción de caminos de acceso e interiores.

B. Construcción y operación

1. Edificaciones.
2. Sistema de captación y conducción de aguas de escurrimiento pluvial.
3. Cercado del predio fijo y móvil.
4. Sistema de impermeabilización.
5. Señalamientos.
6. Transporte de material y movimiento de maquinaria.
7. Sistemas de captación y disposición de lixiviados.
8. Control y vigilancia.
9. Celda diaria (incluyendo cobertura).
10. Pozos de monitoreo.
11. Sistemas de captación de biogas.

C. Mantenimiento y conservación

1. Reparación de áreas dañadas.
2. Cubierta y paisaje.
3. Monitoreo ambiental.

2) Lista de factores ambientales que son potencialmente afectados por las actividades del relleno sanitario.

A continuación se presenta la lista de factores ambientales que son potencialmente afectados por las actividades del relleno sanitario.

A. Factores bióticos

1. Cubierta vegetal en el predio.
2. Vegetación en el medio circundante.
3. Fauna silvestre.
4. Areas de cultivo.
5. Especies raras o en peligro de extinción.
6. Ecosistemas.

B. Factores físicos

1. Procesos erosivos.
2. Drenaje natural.
3. Calidad del aire.
4. Infiltración al acuífero.
5. Nivel freático.
6. Calidad del agua subterránea.
7. Nivel de ruido y vibración.
8. Calidad del agua superficial.
9. Calidad del suelo.
10. Microclima.

C. Factores sociales

1. Vías de comunicación terrestre.
2. Obras o construcciones aledañas (incluye infraestructura municipal).
3. Tenencia de la tierra.
4. Opinión pública.
5. Accidentes.
6. Salud pública y ocupacional.
7. Uso del suelo.

D. Factores económicos

1. Impuestos.
2. Servicios públicos.
3. Fuentes de empleo.
4. Costo del terreno.

E. Factores estéticos

1. Paisaje natural.
2. Olores desagradables.
3. Erección de construcciones ajenas al medio.
4. Basura y desperdicios.

V.6.2 Evaluación de impactos

Una vez que se identificaron los factores de modificación del medio como consecuencia del proyecto y las obras básicas y actividades complementarias que se llevarán a cabo, las listas resumidas se manejan por medio de una Matriz de Evaluación.

La trascendencia del impacto de un proyecto es consecuencia de la vulnerabilidad del ambiente en donde se lleve a cabo. Con respecto a la estructura de la Matriz de Evaluación de Impactos empleada en proyectos se puede formar de la siguiente manera:

El carácter: puede hacer referencia a su consideración benéfica o perjudicial respecto al estado previo a la acción; indica si en lo que se refiere a la faceta de vulnerabilidad que se esté teniendo en cuenta, la obra o actividad es benéfica o perjudicial.

El tipo de acción del impacto: se refiere a la relación causa-efecto; describe el modo de producirse el efecto de la obra o actividad sobre los componentes ambientales: si el impacto es directo o indirecto.

La duración del impacto: se refiere a sus características temporales; si el efecto es a corto plazo y luego cesa (temporal), o si es permanente.

La dilución de la intensidad del impacto en el mosaico espacial y puede ser localizado o extensivo. Debido a la existencia de este mosaico, la dilución no siempre tendrá relación lineal con la distancia a la fuente del impacto.

La reversibilidad del impacto: toma en cuenta la posibilidad, dificultad o imposibilidad de retornar a la situación previa a la obra o actividad. De ésta manera se hablará de impactos reversibles e irreversibles.

Los impactos pueden ser mitigables o no.

El riesgo del impacto: mide la probabilidad de ocurrencia (alta, media o baja), sobre todo de aquellas circunstancias no periódicas pero de excepcional gravedad.

Todas estas circunstancias y características descritas definen la mayor o menor gravedad y el mayor o menor beneficio que se deriva de las obras y actividades del proyecto evaluado. La expresión de esta evaluación, para cada faceta de la vulnerabilidad que se presente, se contempla normalmente con la utilización de alguna escala de niveles de impacto, de manera que facilite la utilización de la información adquirida en la formulación de medidas de mitigación.

La escala de niveles de impacto que se puede aplicar es la siguiente:

Impacto de magnitud baja;

Impacto de magnitud moderada;

Impacto de magnitud alta;

En los renglones de la matriz se incluyen las componentes ambientales y los factores de modificación del medio. La evaluación se realiza para las diferentes etapas del proyecto.

La Matriz de Evaluación de los Impactos Ambientales se complementa con una descripción de los procesos de cambio que se manifestarán en los factores ambientales por las acciones del proyecto. Los resultados permitirán prever las medidas de prevención y mitigación (restauración, control o compensación) que deberán ser implementadas para el desarrollo del proyecto.

V.6.2.1 Ruido

El ruido se define comúnmente como un sonido no deseado o desagradable. Esto implica que el ruido causa disturbios o que tiene efectos adversos a los humanos, animales domésticos, o vida salvaje. El ruido es casi siempre una mezcla de una multitud de sonidos, compuesto de muchas frecuencias a diferentes niveles de sonoridad (Mestre y Wooten, 1980).

El oído humano puede escuchar sonidos con frecuencias desde aproximadamente 15 Hertz (Hz), hasta aproximadamente 20,000 Hz. Sin embargo la respuesta auditiva no es lineal con respecto a presiones y frecuencias, debido a la no linealidad de la respuesta auditiva humana se ha desarrollado una escala logarítmica para medir presiones sonoras. Ruido o sonido se reporta como "nivel de presión acústica", definida como la relación logarítmica de la presión acústica con respecto a la presión de referencia. La presión de referencia es la frontera de la audición humana 0.0002 microbares. La ecuación que la define es:

$$NPA = 10 \log \left(\frac{P}{P_0} \right)^2 \quad (5.1)$$

donde:

NPA = Nivel de Presión Acústica,

P = Presión sonora en microbares,

P₀ = Presión de referencia, 0.0002 microbares.

Las unidades del NPA son los decibeles (dB). La medición del NPA se hace mediante un filtro o sistema de filtros que representan la respuesta de frecuencia del oído.

Cuadro 5.1
Nivel de Precisión Acústica de algunos equipos de construcción

TIPO DE MAQUINARIA	NPA (dBA)
Camión de volteo a 15 m	76
Excavadora a 15 m	80
Motoescropa y camión pesado a 15 m	93
Tractor de orugas a 10 m	93
Bulldozer a 15 m	94
Camión recolector de basura	100

V.6.2.2 Descripción de la matriz de evaluación

En esta matriz se incluye el análisis de todas las actividades que se llevarán a cabo en el predio del relleno sanitario desde la preparación del sitio hasta su abandono. Se utiliza una sola matriz para la evaluación en virtud de que la construcción y operación de la obra son simultáneas e interdependientes a lo largo de la vida útil del relleno. Con respecto a la estructura de la Matriz de Evaluación de Impactos mostrada en la figura 5.3, se tiene que:

- El carácter (columna 1) hace referencia a su consideración benéfica o adversa respecto al estado previo a la acción; indica si en lo que se refiere a la faceta de vulnerabilidad que se está teniendo en cuenta, la obra o actividad es benéfica o perjudicial.
- El tipo de acción del impacto (columna 2) se refiere a la relación causa-efecto; describe el modo de producirse el efecto de la obra o actividad sobre los componentes ambientales: si el impacto es directo o indirecto.
- La duración del impacto (columna 3) se refiere a sus características temporales: si el efecto es a corto plazo y luego cesa (temporal), o si es permanente.

- La columna 4 y 5 informan sobre la dilución de la intensidad del impacto en el mosaico espacial y puede ser localizado o extensivo, y próximo o alejado de la fuente. Debido a la existencia de este mosaico esta dilución no siempre tendrá relación lineal con la distancia a la fuente del impacto.
- La reversibilidad del impacto (columna 6) toma en cuenta la posibilidad, dificultad o imposibilidad de retornar a la situación previa a la obra o actividad. De esta manera se hablará de impactos reversibles o irreversibles.
- La posibilidad de recuperación (columna 7) indica si la pérdida de calidad en el factor ambiental puede ser recuperable, reemplazable, o irrecuperable.
- Los impactos pueden ser mitigables o no (columna 8)
- El riesgo del impacto o (columna 9) mide la probabilidad de ocurrencia (alta, media o baja), sobre todo de aquellas circunstancias no periódicas pero de excepcional gravedad.

SOCIOECONOMIA	FAUNA	VEGETACION	OCEANOGRAFIA	HIDROLOGIA	SUELO	GEOMORFOLOGIA	ATMOSFERA	ELEMENTOS AMBIENTALES IMPACTADOS Y CARACTERISTICAS SUSCEPTIBLES DE SER IMPACTADOS	MANIFESTACION DE IMPACTO AMBIENTAL	ETAPAS DEL PROYECTO ACTIVIDADES EN EVALUACION
									MATRIZ DE EVALUACION DE IMPACTOS AMBIENTALES	
								BENEFICO		1
								ADVERSO		2
								DIRECTO		3
								INCORRECTO		4
								TEMPORAL		5
								PERMANENTE		6
								LOCALIZADO		7
								EXTENSO		8
								PROX. A LA FUENTE		9
								ALEJADO DE LA FUEN		10
								REVERSIBLE		11
								IRREVERSIBLE		12
								RECUPERABLE		13
								IRRECUPERABLE		14
								SIN A M B		15
								MEDIDA DE MITIGACION		16
								PROB. DE OCURENC		17
								COMPATIBLE		18
								MODERADO		19
								SEVERO		20
								CRITICO		21
								AUSENCIA		22
								DE IMPACTOS		23
								OBRA O ACTIVIDAD		24
								GENERADORA DE IMP		25

V.6.3 Medidas de Prevención y Mitigación de los Impactos Ambientales Identificados

Objetivos ambientales del proyecto

Una de las principales medidas para evitar impactos adversos es que tanto el contratista como el Organismo operador conozcan y cumplan las medidas de mitigación que les correspondan, así como las leyes, reglamentos, normas oficiales mexicanas y demás disposiciones oficiales de carácter ambiental que guarden relación con sus actividades.

Los objetivos ambientales del proyecto que deberán cumplir el contratista y el Organismo operador del relleno sanitario son:

- a. Evitar al máximo la contaminación del suelo, agua y aire;
- b. Evitar al máximo la destrucción de la vegetación natural;
- c. Evitar al máximo la erosión de los suelos y la sedimentación en cuerpos de agua;
- d. No utilizar el fuego para la eliminación de ningún desecho o material de cualquier naturaleza;
- e. Disponer o desechar los residuos sólidos generados de forma ambientalmente apropiada;
- f. Utilizar las tecnologías más apropiadas durante la realización de los trabajos, bajo criterios de calidad ambiental y minimización de costos financieros;
- g. Minimizar hasta donde sea posible, la interferencia con la vida diaria de la comunidad.

Lixiviados y biogases

En el caso de los lixiviados, se puede instalar un sistema de recirculación en el relleno con el fin de obtener una depuración de la concentración de contaminantes y se dispondrán en estanques de evaporación. Cuando se rebasa el nivel de regularización de los estanques, el volumen excedente será transportado a la planta de tratamiento.

En el caso del biogas, se monitoreará la generación de gases en el relleno y dependiendo de los resultados, se propondrá o no la instalación de quemadores, siempre y cuando la concentración de metano sea mayor del 5%, o sistemas de captación y aprovechamiento.

Conclusiones

En el diseño de los rellenos sanitarios intervienen tres factores a considerar, estos son: la generación, el control y el tratamiento final de lixiviados y biogas; ya que los principales compuestos generados en un relleno sanitario son éstos. Dichos factores pueden ser afectados por las condiciones hidrológicas, topográficas, geológicas, geofísicas, etc., por lo que un buen estudio evitará que el relleno sanitario sea perjudicado y no cubra la vida útil para la que fue diseñado.

La información disponible acerca de rellenos sanitarios y todo lo referente a lixiviados y biogas, es aún escasa en México. Existe la Asociación Mexicana de Residuos Sólidos y Peligrosos, AMCRESPAC, y el Instituto Nacional de Ecología, pero en ninguno de estos dos se tiene la información de la generación por estado de la composición química de los residuos sólidos, por lo que es necesario realizar un estudio para facilitar la estimación del biogas y los lixiviados, por lo que para la presente tesis dicha información tuvo que ser consultada del estudio hecho para un relleno sanitario en la ciudad de Irapuato, Guanajuato, y del libro de George Tchobanoglous, Solid Wastes Engineering Principles and Management Issues, principalmente.

Cuando el biogas es liberado a la atmósfera se debe medir su concentración de metano, ya que si se supera el 5% de éste, puede ser explosivo, por lo que un método común empleado para solucionar estos tipos de problemas, consiste en colocar quemadores encargados de flamear el biogas. Se puede aplicar el Modelo Gaussiano de Dispersión para tratar de determinar que dirección llevarán los gases debido a los vientos dominantes. En cuanto a los lixiviados, se puede instalar un sistema de recirculación en el relleno para depurar la concentración de contaminantes y se podrán disponer en tanques de evaporación, si se rebasa el nivel de regularización, el volumen excedente se lleva a plantas de tratamiento; debido a que las plantas de tratamiento no operan a su máxima capacidad todo el tiempo, hay un cierto período en donde la cantidad del lixiviado aumentará haciendo que la planta trabaje satisfactoriamente, pero va a llegar un momento en donde la producción de lixiviados se mantenga constante y finalmente la producción de éste decrecerá, haciendo que las plantas trabajen a su mínima capacidad.

En cuanto al impacto ambiental generado por el biogas y los lixiviados puede ser reducido si se ubica adecuadamente el relleno sanitario. Deberán identificarse los impactos que se puedan generar por las actividades que se tengan que llevar a cabo, para esto es conveniente el uso de una tabla, llamada Matriz de Impactos Ambientales.

La aportación de éste trabajo es proporcionar un documento que explique a detalle la estimación de la generación del lixiviado y del biogas, así como los métodos para su control y tratamiento. Se proponen varias alternativas para la recolección del lixiviado y la disposición del biogas, para convertirlo en energía o simplemente quemarlo para que no se disperse en la atmósfera.

Se tiene la intención de que éste trabajo sirva como manual para la materia concerniente a los residuos sólidos que se imparte en la Facultad de Ingeniería de la U.N.A.M. También tiene el propósito de servir de guía. También servirá éste trabajo para las materias referentes a Impacto Ambiental y Contaminación del Agua, por las afectaciones que pueden llegar a ocasionar los rellenos sanitarios y por la contaminación que pudieran llegar a producir en los acuíferos cercanos al lugar.

Bibliografía

Análisis de la Contaminación Ambiental por el ruido generado en obras de edificación y en vialidades urbanas. Tesis.

Galindo Briones, Luz María
Facultad de Ingeniería

Contaminación del Aire. Origen y Control

Kenneth Wark. Cecil F. Warner
Editorial Limusa

Geología Aplicada a la Ingeniería Civil

Ruiz, González
Editorial Limusa

Instituto de Geografía, Atlas Nacional de México, México. Proyección: Cónica conforme de Lambert. Escala 1:16, 000,000.

Instituto de Geografía, Atlas Nacional de México, México. Proyección: Cónica conforme de Lambert. Escala 1:4, 000,000.

Manual de Diseño de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento

Pruebas de Bombeo, Libro V, 3.3.2. CNA

Manual de Diseño de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento

Prospección Geoeléctrica y Registros Geofísicos de Pozos, Libro V, 3.2.1. CNA

Manual de Diseño de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento

Exploración Gravimétrica y Magnetométrica, Libro V, 3.2.3. CNA

Página del INEGI

<http://www.inegi.gob.mx>

Página del Instituto Nacional de Ecología

<http://www.ine.gob.mx>

Página del Instituto Nacional Indigenista

<http://www.ini.gob.mx>

Página de SEMARNAP

<http://www.semarnat.gob.mx>

Solid Wastes Engineering. Principles and Management Issues.

Tchobanoglous, George T.
Editorial McGraw-Hill

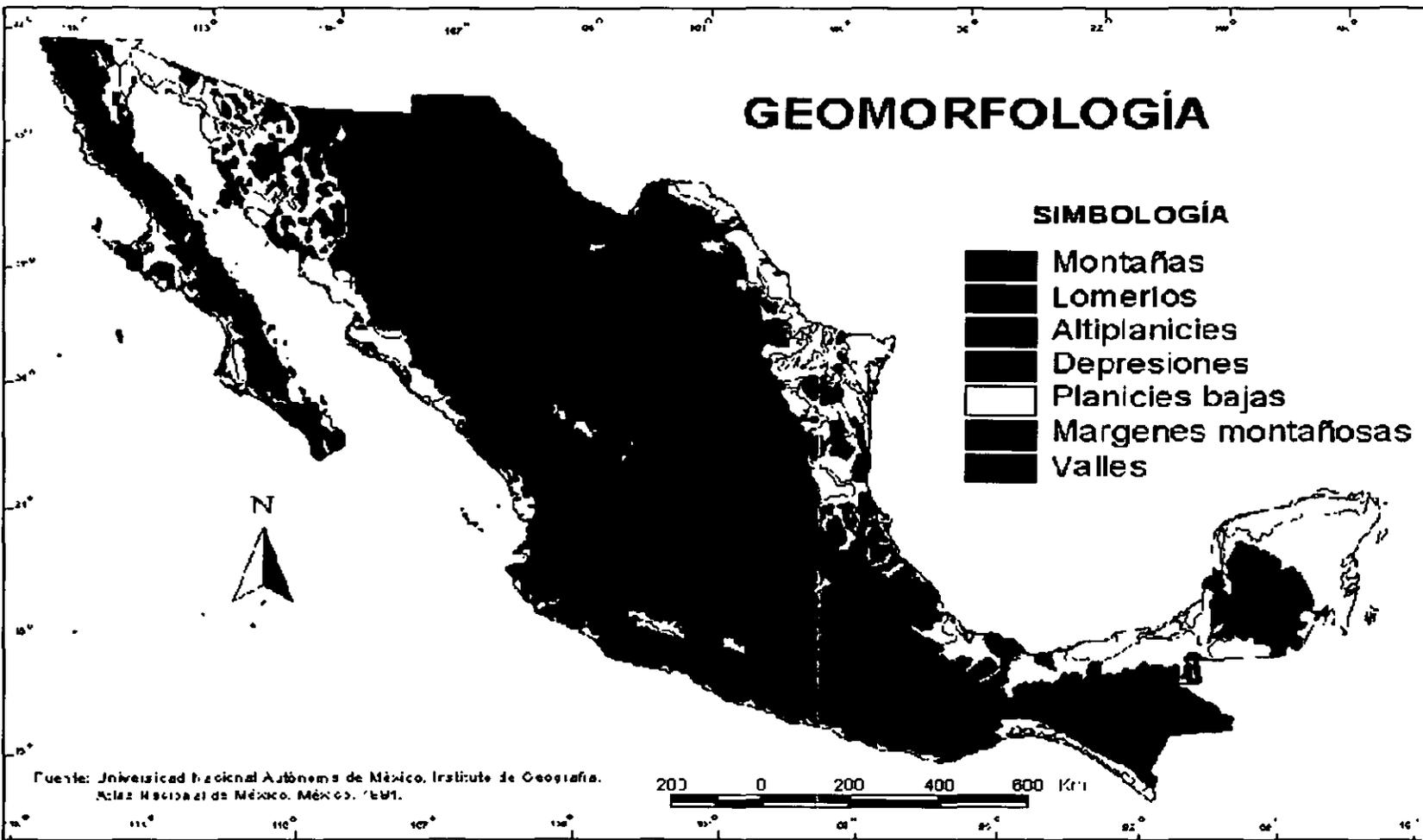
Solid Waste Management

Tchobanoglous, George T.
Editorial McGraw-Hill

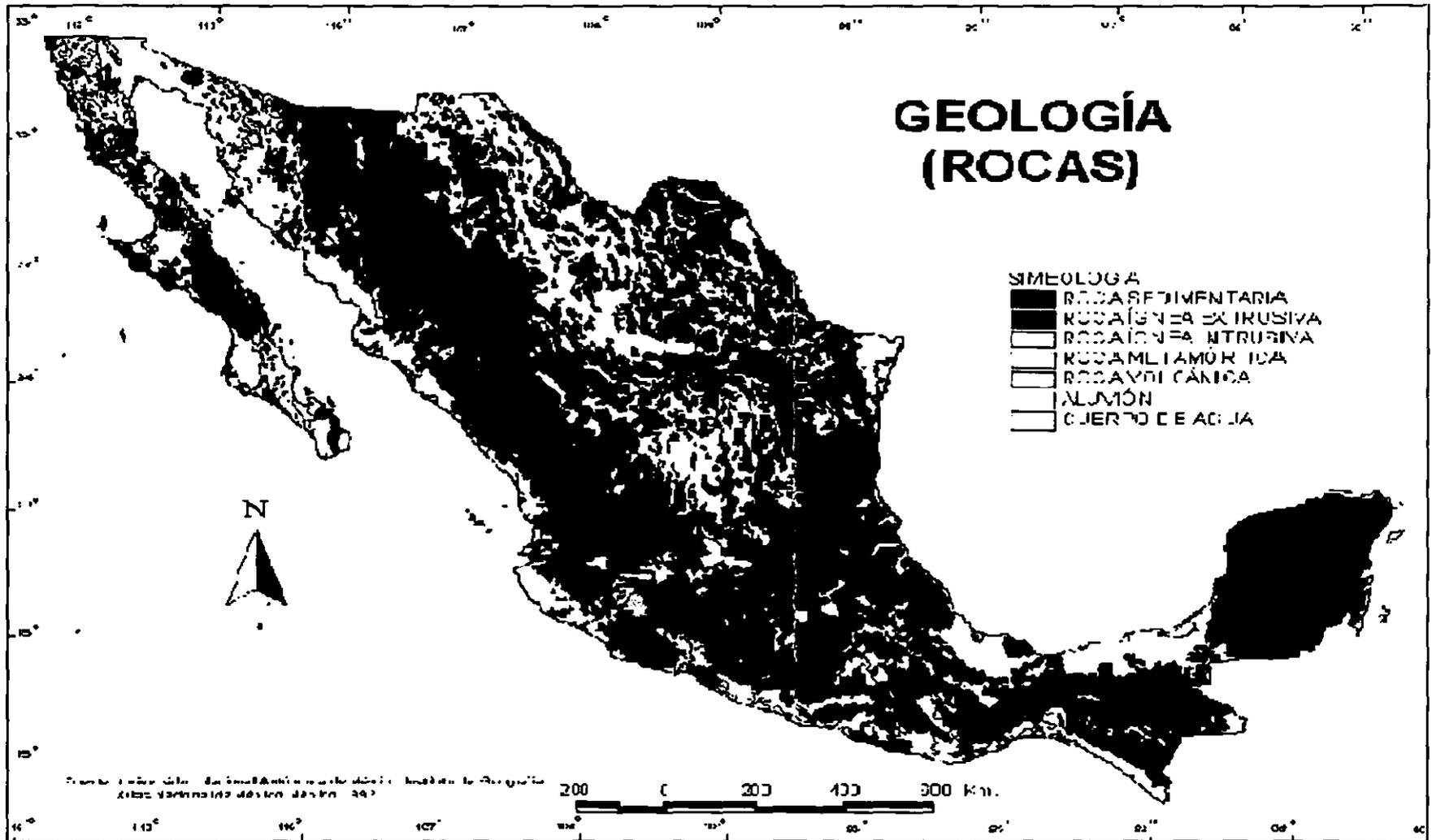
GEOMORFOLOGÍA

SIMBOLOGÍA

- Montañas
- Lomeríos
- Altiplanicies
- Depresiones
- Planicies bajas
- Margenes montañosos
- Valles



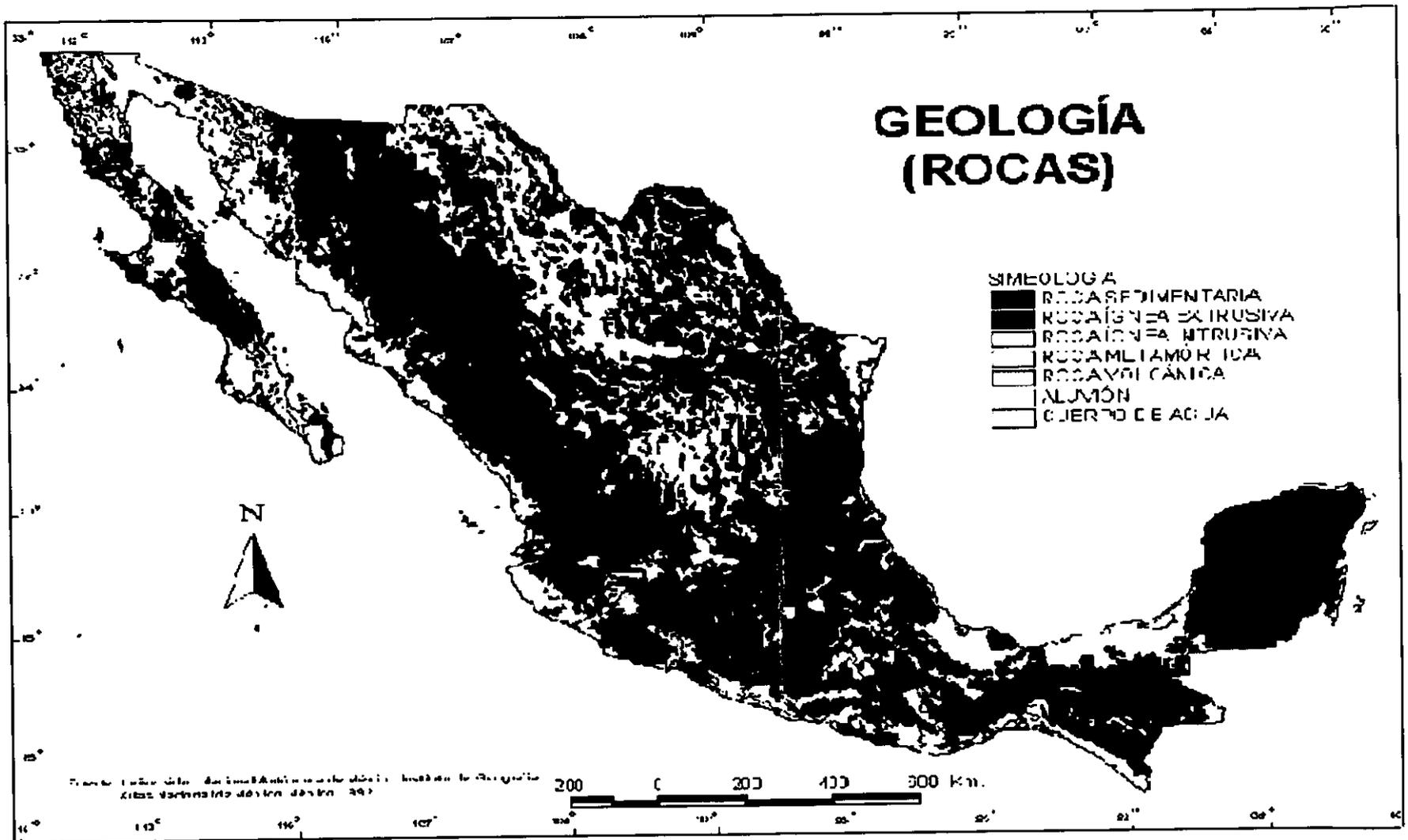
Fuente: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía.
Atlas Nacional de México, México, 1991.



GEOLOGÍA (ROCAS)

SIMBOLOGÍA

-  ROCA SEDIMENTARIA
-  ROCA ÍGNEA EXTRUSIVA
-  ROCA ÍGNEA INTRUSIVA
-  ROCA METAMÓRFICA
-  ROCA VOLCÁNICA
-  ALUVIÓN
-  CUERPO DE AGUA



GEOMORFOLOGÍA

SIMBOLOGÍA

-  Montañas
-  Lomeríos
-  Altiplanicies
-  Depresiones
-  Planicies bajas
-  Margenes montañosas
-  Valles

