



DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERA CIVIL

PRESENTA

MARÍA DEL ROSARIO NAVARRETE GATICA

DIRECTORA DE TESIS:

M.I ALBA BEATRIZ VÁZQUEZ GONZÁLEZ

UNAM
Facultad de Ingeniería
División de Ingeniería Civil, Topográfica y Geodésica
Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental

México, D.F. 2005



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.

AGRADEZCO

A DIOS

POR TODO LO QUE ME HA DADO, Y POR BRINDARME LA OPORTUNIDAD DE COMPARTIR CON MIS PADRES, EN VIDA, UNO MÁS DE MIS ANHELOS.

A MIS PADRES

TERESA Y JUAN. QUIENES ME HAN HEREDADO EL TESORO MÁS VALIOSO QUE PUEDA DÁRSELE A UN HIJO, AMOR. A QUIENES NUNCA PODRÉ PAGAR TODO LO QUE HAN HECHO POR MI, NI CON LAS RIQUEZAS MAS GRANDES DEL MUNDO. DESEO DE TODO CORAZÓN QUE MI TRIUNFO COMO MUJER Y PROFESIONISTA LO SIENTAN COMO EL SUYO PROPIO. GRACIAS, LOS AMO.

A MIS HERMANOS

TERESA Y JUAN. POR EL BUEN EJEMPLO QUE ME HAN DADO, POR EL AMOR Y APOYO QUE SIEMPRE HE TENIDO DE SU PARTE. GRACIAS POR ESTAR CUANDO MAS LO NECESITO. GRACIAS POR LO QUE HEMOS LOGRADO.

A MIS PROFESORES

POR CONFIAR EN MI Y BRINDARME SIEMPRE SU APOYO INCONDICIONAL.

A LA M en I ALBA BEATRIZ VÁZQUEZ GONZÁLEZ

POR SU PACIENCIA Y SU APOYO ACADÉMICO QUE ME HA BRINDADO PARA LA ELABORACIÓN DE ESTE TRABAJO, ASÍ COMO SU APOYO MORAL. GRACIAS POR COMPARTIR CONMIGO SUS VALIOSOS CONOCIMIENTOS.

A MIS SINODALES

POR EL TIEMPO DEDICADO Y POR SUS OBSERVACIONES PARA MEJORAR MI TRABAJO.

A LA U.N.A.M

EN ESPECIAL A LA FACULTAD DE INGENIERÍA, POR PERMITIRME SER UNOS MAS DE SUS MIEMBROS.

A MIS COMPAÑEROS Y AMIGOS

POR COMPARTIR CONMIGO MOMENTOS INOLVIDABLES.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
I. LEGISLACIÓN EN MATERIA DE RESIDUOS SÓLIDOS EN MÉXICO	
1.1 MARCO LEGAL ACTUAL EN MATERIA DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES	4
1.2 LEYES DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE ESTATAL	6
1.3 NORMAS RELATIVAS A LOS RESIDUOS SÓLIDOS	8
1.4 NORMA OFICIAL MEXICANA <i>NOM-083-ECOL-1996</i>	10
1.5 LEY GENERAL PARA LA PREVENCIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS	13
1.6 LEY DE RESIDUOS SÓLIDOS DEL DISTRITO FEDERAL	17
II. CICLO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES	
2.1 INTRODUCCIÓN	28
2.2 GENERACIÓN	29
2.3 ALMACENAMIENTO	34
2.4 RECOLECCIÓN	37
2.5 TRANSFERENCIA	41
2.6 TRATAMIENTO	44
2.7 DISPOSICIÓN FINAL	45
2.8 DISPOSICIÓN FINAL EN EL PAÍS	47
III. DISEÑO DEL RELLENO SANITARIO	
3.1 DEFINICIÓN DE RELLENO SANITARIO	49
3.2 TIPOS DE RELLENOS	49
3.3 SELECCIÓN DEL SITIO	52
3.4 SISTEMA PARA LA RECOLECCIÓN DE LIXIVIADOS O LÍQUIDOS PERCOLADOS	56
3.5 SISTEMA DE DRENAJE PLUVIAL	59
3.6 GEOMEMBRANA	61
3.7 ESTABILIDAD	64
3.8 VÍAS DE ACCESO	65
3.9 CONSIDERACIONES PARA EL MATERIAL DE CUBIERTA	65
3.10 SISTEMA DE VENTILACIÓN	67

ÍNDICE

IV. PROCESO DE LICITACIÓN, CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DEL RELLENO SANITARIO DE TLALNEPANTLA DE BAZ, ESTADO DE MÉXICO	
4.1 ANTECEDENTES	73
4.2 DIFUSIÓN DEL PROYECTO	74
4.3 LICITACIÓN	74
4.4 ESTUDIOS PREVIOS	75
4.5 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL PROYECTO	76
4.6 CONSTRUCCIÓN	77
4.7 OPERACIÓN	81
4.8 PROYECCIONES	84
4.9 TENDENCIAS	86
4.10 CLAUSURA, SANEAMIENTO Y REHABILITACIÓN DEL EXTIRADERO DE BASURA DE TLALNEPANTLA DE BAZ	87
V. INFRAESTRUCTURA, OPERACIÓN Y MONITOREO AMBIENTAL DEL RELLENO SANITARIO DE QUERÉTARO	
5.1 DATOS GENERALES	89
5.2 INFRAESTRUCTURA DEL RELLENO SANITARIO	89
5.3 MAQUINARIA, VEHÍCULOS Y EQUIPO	90
5.4 OPERACIÓN DEL RELLENO	90
5.5 MONITOREO AMBIENTAL	93
5.6 VIDA ÚTIL ORIGINAL	99
VI. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE RELLENOS SANITARIOS SOBRE MATERIAL CÁRSICO; EL CASO DE MÉRIDA, YUCATÁN	
6.1 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS	103
6.2 GEO - HIDROLOGÍA	107
6.3 GENERACIÓN DE RESIDUOS	107
6.4 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	108
6.5 CONSTRUCCIÓN DEL RELLENO SANITARIO	113
6.6 CONTROLES AMBIENTALES	119
CONCLUSIONES	120
BIBLIOGRAFÍA	123

INTRODUCCIÓN

Desde los días de la sociedad primitiva, los seres humanos y los animales han utilizado los recursos de la tierra para la supervivencia y la evacuación de residuos. En tiempos remotos, la evacuación de los residuos humanos y otros no planteaba un problema significativo, ya que la población era pequeña y la cantidad de terreno disponible para la asimilación de los residuos era grande. Aunque actualmente el énfasis se pone en la recuperación de los contenidos energéticos, y uso como fertilizantes de los residuos sólidos, el campesino en tiempos pasados probablemente hizo un intento más valiente en esta cuestión. Todavía se pueden ver indicadores del reciclaje en prácticas agrícolas que, aunque primitivas, son sensatas en muchos de los países en desarrollo, donde los agricultores reciclan los residuos sólidos para ser utilizados como combustible o fertilizantes. Los problemas de la evacuación de residuos pueden ser trazados desde los tiempos en los que los seres humanos comenzaron a congregarse en tribus, aldeas y comunidades, y la acumulación de residuos llegó a ser una consecuencia de la vida.

Los Residuos Sólidos Municipales (RSM), están compuestos por los residuos orgánicos e inorgánicos, que provienen de las actividades que se desarrollan en el ámbito doméstico, por los generados en servicios públicos, demoliciones, construcciones, establecimientos comerciales y de servicios, así como por los residuos industriales que no se derivan de sus procesos.

El efecto ambiental más evidente del manejo inadecuado de los RSM lo constituye el deterioro estético de las ciudades, así como del paisaje natural, tanto urbano como rural, con la consecuente devaluación, tanto de los predios donde se localizan los tiraderos como de las áreas vecinas por el abandono y la acumulación de basura, siendo éste uno de los efectos fácilmente observados por la población, sin embargo, de los efectos ambientales más serios, es la contaminación del suelo y cuerpos de agua, ocasionada por el vertimiento directo de los RSM, así como por la infiltración en el suelo del lixiviado (producto de la descomposición de la fracción orgánica contenida en los residuos y mezclada muchas veces con otros residuos de origen químico).

La generación de biogas, resultante de la descomposición de los residuos orgánicos representa no sólo un factor de riesgo en función de su toxicidad y de su explosividad en ciertas condiciones, sino que también aportan cantidades importantes de gases que contribuyen al efecto invernadero, entre los que se encuentran el dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4), que en exceso generan problemas ambientales tanto a la atmósfera, como al suelo y a los cuerpos de agua.

El depósito de los RSM en arroyos y canales o su abandono en las vías públicas, puede causar la erosión de suelos e impedir la recarga de acuíferos, la proliferación de fauna nociva transmisora de enfermedades, la modificación de las características naturales de los sistemas de arroyos, la disminución de los cauces y durante la época de lluvia se provoca la obstrucción de los sistemas de drenaje y alcantarillado.

México, al igual que muchos países del mundo, enfrenta grandes retos en el manejo de los residuos sólidos municipales debido al elevado índice de crecimiento demográfico e industrial del país pero de acuerdo con la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), se ha modificado de manera sustancial la cantidad y composición de los RSM en el país.

Debido a la situación actual del manejo de los residuos en el país, es evidente la necesidad de buscar soluciones adecuadas para solucionar esta problemática. Es imprescindible que la población en general, y los tres órdenes de gobierno, afronten racionalmente la gestión de los residuos sólidos municipales generados en las localidades, teniendo en cuenta, entre otras consideraciones: el nivel de educación ambiental de la comunidad, la capacidad de pago por la prestación del servicio de limpia, las implicaciones que acarrea la mezcla de éstos, el valor económico de algunos residuos con su probable mercado, la complementariedad de los sistemas de tratamiento, la disposición final, y el costo inherente a los procesos que conllevan la recolección, transporte, tratamiento y disposición final.

La disposición final es la última etapa del manejo integral de los residuos sólidos municipales y está íntimamente relacionada con la preservación del ambiente, así como de la salud de la población, por lo que se debe tratar y controlar mediante un sistema adecuado que minimice los impactos negativos hacia el ambiente y que preserve los espacios para otros usos de forma racional. Por tanto, al sitio de disposición final deberán de llegar solo los materiales que no tienen otras posibilidades de ser aprovechados en el reúso, reciclaje y compostaje.

El relleno sanitario es el método empleado para la correcta disposición de los residuos sólidos municipales. Como toda obra de ingeniería, éste tiene que ser planeado y diseñado previamente para asegurar su correcta construcción y operación. Los rellenos sanitarios han sido y continuarán siendo en el futuro próximo, elementos esenciales de los sistemas de manejo integral de los residuos sólidos, siempre y cuando se ubiquen en lugares apropiados, se diseñen, construyan y operen de manera segura y ambientalmente adecuada.

La política en materia de RSM, debe ser definida a través de la planeación democrática de los gobiernos municipales, estatales y federal, promoviendo la participación de la ciudadanía para hacer propuestas de políticas relacionadas con la gestión integral de los RSM.

Los objetivos de la política ambiental sobre los RSM tienen como finalidad prevenir los impactos negativos al ambiente y a la salud humana ocasionados por el manejo inadecuado de los mismos, siguiendo estos principios: evitar o minimizar su generación, separar en la fuente, recuperar y reaprovechar todos los materiales que sean técnicamente posibles y económicamente factibles y tratar adecuadamente los residuos restantes.

El desarrollo del presente trabajo tiene como finalidad presentar el ciclo de los residuos sólidos municipales, su problemática, la legislación nacional en la materia, y el diseño, construcción y operación de los rellenos sanitarios.

El capítulo I denominado “Legislación en materia de residuos sólidos en México”, incluye el marco legal bajo el cual se sustenta el manejo integral de los residuos sólidos municipales. El capítulo II “Ciclo de los residuos sólidos municipales”, desarrolla cada una de las partes del ciclo de los RSM indicando la problemática en nuestro país. El capítulo III “Diseño del relleno sanitario” presenta cada una de las condiciones necesarias para el diseño de este tipo de obras. Los capítulos IV, V y VI presentan casos estudio de rellenos sanitarios desde su diseño, construcción y operación.

I. LEGISLACIÓN EN MATERIA DE RESIDUOS SÓLIDOS EN MÉXICO

1.1 MARCO LEGAL ACTUAL EN MATERIA DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, establece que corresponde a los municipios la responsabilidad de prestar el servicio de limpia con el concurso del Estado. Generalmente esta atribución es ratificada por la Constitución Política de los Estados y sustentada en las Leyes Estatales de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, ver Cuadro 1.1. Este marco sirve de referencia para establecer los lineamientos generales de los Bandos de Policía y Buen Gobierno y de forma particular los reglamentos de limpia municipal.

Actualmente las metrópolis y la mayoría de los municipios de tamaño medio, cuentan con dichos reglamentos para establecer los compromisos de quien presta y recibe el servicio.

Cuadro 1.1 Atribuciones respecto de los servicios en materia de recolección, almacenamiento, transporte, reúso, reciclado, tratamiento y disposición final de residuos sólidos



Fuente: Minimización y manejo ambiental de los residuos sólidos (SEMARNAT)

El marco legal bajo el cual se sustenta el manejo integral de los residuos sólidos municipales (RSM) incluye leyes, reglamentos y normas de los tres órdenes de gobierno e involucra a un número considerable de instituciones las cuales buscan el bien común mediante la disminución o eliminación de los efectos nocivos que puede causar

el manejo inadecuado de los residuos sólidos municipales. En el Cuadro 1.2 se presenta el marco actual de la legislación en el ámbito de los residuos sólidos municipales.

Cuadro 1.2 Marco legal actual para el manejo de los residuos sólidos municipales

ORDENAMIENTO	DESCRIPCIÓN
Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos	Indica que los servicios públicos municipales deben ser prestados por los ayuntamientos, entre ellos el servicio de limpia (Artículo 115).
Ley General de Salud	Establece las disposiciones relacionadas al servicio público de limpia en donde se promueve y apoya el saneamiento básico, se establecen normas y medidas tendientes a la protección de la salud humana para aumentar su calidad de vida.
Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente	Plantea que los sistemas de manejo y disposición de residuos sólidos no peligrosos quedan sujetos a autorización y legislación estatal o en su caso, municipal; y la disposición final de los residuos sólidos no peligrosos, mediante rellenos sanitarios.
Normas Oficiales Mexicanas y Normas Mexicanas	Establecen la forma y procedimientos aplicables al manejo y disposición de los residuos sólidos no peligrosos.
Constitución Política Estatal	Dentro de los Artículos referentes a los municipios se hace referencia a las facultades que tienen los ayuntamientos para prestar el servicio de limpia pública.
Ley Estatal de Protección al Ambiente	Establece disposiciones de observancia obligatoria para cada estado, teniendo como objetivo la prevención, preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como los fundamentos para el manejo y disposición final de los residuos sólidos no peligrosos.
Ley Orgánica del Municipio Libre	Establecen las atribuciones de los ayuntamientos para nombrar las comisiones que atiendan los servicios públicos.
Bando de Policía y Buen Gobierno	Plantean el conjunto de normas y disposiciones que regulan el funcionamiento de la administración pública municipal.
Reglamento de Limpia	El reglamento regula específicamente los aspectos administrativos, técnicos, jurídicos y ambientales para la prestación del servicio de limpia pública.

Fuente: Minimización y manejo ambiental de los residuos sólidos (SEMARNAT)

En cuanto a las leyes, existe la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), la Ley Ambiental del Distrito Federal y las correspondientes leyes estatales en materia ambiental. Los señalamientos que marcan estas leyes en materia de disposición de RSM en general son muy escasos.

En la LGEEPA se establece principalmente la responsabilidad del manejo de los residuos sólidos por los estados, municipios y el gobierno del Distrito Federal. La Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales se encarga de expedir las normas a las que deberán sujetarse las diferentes entidades para el diseño, construcción y operación de las instalaciones destinadas a la disposición final de los RSM.

Para sustentar los reglamentos se expiden las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), cuya expedición es de competencia federal, caso que también se aplica al manejo de los residuos sólidos. Actualmente, sólo existen vigentes la NOM-083-ECOL-1996, que establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales, y el proyecto de norma NOM- 084-ECOL-1997, que establece los requisitos para el diseño, construcción, operación y monitoreo de un relleno sanitario.

Lo anterior indica que el Poder Legislativo Federal consideró procedente que, además de la intervención de las autoridades locales prevista en la Constitución, también debería participar el Gobierno Federal cuando se trata de proteger al ambiente, a través de la posibilidad de expedir reglas técnicas obligatorias relativas al manejo integral de residuos sólidos, que deben ser observadas en forma adicional a las que expidan las autoridades locales.

El gobierno federal a través de la Secretaría de Desarrollo Social realiza acciones para apoyar el fortalecimiento de los servicios municipales en materia de manejo integral de los residuos, en particular en lo que se refiere a la recolección, transferencia, tratamiento y disposición final, a fin de reducir sus efectos ambientales y minimizar los riesgos a la salud pública.

A la vez, dentro del contexto de la protección al ambiente en relación con el manejo de los residuos, también se concedió al Gobierno Federal la atribución de la regulación y el control de la generación, manejo y disposición final de residuos peligrosos para el ambiente y los ecosistemas.

1.2 LEYES DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE ESTATAL

Las leyes ambientales de las distintas entidades federativas muestran una diversidad en cantidad y tipo de señalamientos en materia de residuos sólidos, debido en parte a los distintos años en que fueron publicadas. Además, existe la necesidad de adecuarlas a las reformas más recientes de la LGEEPA.

Estadísticamente el 81% de las leyes estatales consideran la racionalización de la generación de los residuos sólidos, así como el aprovechamiento y reutilización de los mismos, el 72% establece que el manejo de los residuos sólidos debe considerar las condiciones necesarias para prevenir la contaminación y las afectaciones a la salud de la comunidad, el 59% establecen criterios para el manejo de los residuos sólidos y delegan la mayor parte de la responsabilidad a los municipios. Es interesante señalar que en sólo dos estados (Sinaloa y Baja California) mencionan el uso de rellenos sanitarios para disponer sus RSM.

En el Cuadro 1.3, se muestran las autoridades competentes en materia de residuos sólidos municipales:

Cuadro 1.3 Autoridades competentes en materia de residuos sólidos municipales

<i>AUTORIDAD COMPETENTE</i>	<i>ATRIBUCIONES</i>	<i>FUNDAMENTO LEGAL</i>
SEMARNAT	La expedición de las normas oficiales mexicanas y la vigilancia de su cumplimiento en las materias previstas en esta Ley.	Artículo 5 fracción V de la LGEEPA.
Poder Ejecutivo SEMARNAT	La regulación y el control de la generación, manejo y disposición final de residuos peligrosos para el ambiente y los ecosistemas.	Artículo 5 fracción VI de la LGEEPA
SEMARNAT	La vigilancia, en el ámbito de su competencia, del cumplimiento de esta Ley y los demás ordenamientos que de ella se deriven (normas oficiales mexicanas)	Artículo 5 fracción XIX de la LGEEPA
SEMARNAT	Suscribir convenios con el objeto de que los estados asuman el control de los residuos peligrosos considerados de baja peligrosidad, así como la realización de acciones para la vigilancia del cumplimiento de las disposiciones de esta Ley.	Artículo 11 fracciones II y VII de la LGEEPA
SEMARNAT	Expedir autorizaciones en materia de impacto ambiental para las instalaciones de tratamiento, confinamiento o eliminación de residuos peligrosos, así como residuos radiactivos.	Artículo 28 fracción IV de la LGEEPA
SEMARNAT	Integrar un inventario de residuos peligrosos de su competencia	Artículo 109 bis de la LGEEPA
SEMARNAT	Expedir las normas oficiales mexicanas a que deberán sujetarse los sitios, el diseño, la construcción y la operación de las instalaciones destinadas a la disposición final de residuos sólidos municipales.	Artículo 137 párrafo segundo de la LGEEPA
ESTADOS		
Poder Legislativo Poder Ejecutivo	La regulación de los sistemas de recolección, transporte, almacenamiento, manejo, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos e industriales que no estén considerados como peligrosos.	Artículo 7 fracción VI de la LGEEPA
Autoridad administrativa	La vigilancia del cumplimiento de las normas oficiales mexicanas expedidas por la federación, en las materias y supuestos a que se refiere la fracción VI de este artículo (antes mencionada)	Artículo 7 fracción XIII de la LGEEPA
Poder Ejecutivo Autoridad administrativa	Asumir mediante convenio con la SEMARNAT el control de los residuos peligrosos considerados de baja peligrosidad, así como la realización de acciones para la vigilancia del cumplimiento de las disposiciones de esta Ley.	Artículo 11 fracciones II y VII de la LGEEPA
Poder Ejecutivo Autoridad administrativa	Suscribir convenios, previo acuerdo con la federación, con el objeto de que los Municipios asuman el control de los residuos peligrosos considerados de baja peligrosidad, así como la realización de acciones para la vigilancia del cumplimiento de las disposiciones de esta Ley.	Artículo 11 fracciones II y VII de la LGEEPA

	MUNICIPIOS	
Autoridad Administrativa	<p>La aplicación de las disposiciones jurídicas relativas a la prevención y control de los efectos sobre el ambiente ocasionados por la generación, transporte, almacenamiento, manejo, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos e industriales que no estén considerados como peligrosos.</p> <p>La preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente en los centros de población, en relación con los efectos derivados del servicio de limpia, siempre y cuando no se trate de facultades otorgadas a la Federación o a los Estados en la presente Ley.</p> <p>La vigilancia del cumplimiento de las normas oficiales mexicanas expedidas por la federación, en las materias y supuestos a que se refiere la fracción IV de este artículo.</p>	<p>Artículo 8 fracción IV de la LGEEPA</p> <p>Artículo 8 fracción IX de la LGEEPA</p> <p>Artículo 8 fracción XII de la LGEEPA</p>
Ayuntamiento Autoridad administrativa	Asumir mediante convenio con el Estado, y previo acuerdo entre éste y la Federación, el control de los residuos peligrosos considerados de baja peligrosidad, así como la realización de acciones para la vigilancia del cumplimiento de las disposiciones de esta Ley	Artículo 11 fracciones II y VII de la LGEEPA
Autoridad administrativa	Autorizar, conforme a las leyes locales en la materia y a las normas oficiales mexicanas que resulten aplicables, el funcionamiento de los sistemas de recolección, almacenamiento, transporte, alojamiento, reúso, tratamiento y disposición final de residuos sólidos municipales.	Artículo 137 párrafo primero de la LGEEPA

Fuente: Minimización y manejo ambiental de los residuos sólidos (SEMARNAT)

1.3 NORMAS RELATIVAS A LOS RESIDUOS SÓLIDOS

Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) en materia de residuos sólidos previstas en la LGEEPA, aparecen enlistadas en el Cuadro 1.4; a la fecha sólo se ha emitido la Norma Oficial Mexicana NOM-083-ECOL-1996, que establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales, y se encuentra en desarrollo la relativa a la selección del sitio para la construcción, operación, monitoreo y clausura de los rellenos sanitarios.

Además, existen normas mexicanas relacionadas con la determinación de la generación y composición de los residuos sólidos municipales y aquellas sobre las determinaciones en laboratorio de diferentes componentes, estas normas están en revisión por el Instituto Nacional de Ecología. En el Cuadro 1.5 se presenta una lista de las normas oficiales mexicanas.

Cuadro 1.4 Normas oficiales mexicanas relativas a los residuos sólidos, previstas en la ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente

<i>NOM EN MATERIA DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES</i>	<i>LGEEPA</i>
Funcionamiento de Sistemas de Recolección de Residuos Sólidos Municipales;	137 párrafo primero
Funcionamiento de Sistemas de Almacenamiento de Residuos Sólidos Municipales;	137 párrafo primero
Funcionamiento de Sistemas de Transporte de Residuos Sólidos Municipales;	137 párrafo primero
Funcionamiento de Sistemas de Alojamiento de Residuos Sólidos Municipales;	137 párrafo primero
Funcionamiento de Sistemas de Reúso de Residuos Sólidos Municipales;	137 párrafo primero
Funcionamiento de Sistemas de Tratamiento de Residuos Sólidos Municipales;	137 párrafo primero
Funcionamiento de Sistemas de Disposición Final de Residuos Sólidos Municipales;	137 párrafo primero
Sitios para la Disposición Final de Residuos Sólidos Municipales; Diseño de Instalaciones Destinadas para la Disposición Final de Residuos Sólidos Municipales;	137 párrafo segundo
Diseño de Instalaciones Destinadas para la Disposición Final de los Residuos Sólidos Municipales;	137 párrafo segundo
Construcción de Instalaciones Destinadas para la Disposición Final de Residuos Sólidos Municipales;	137 párrafo segundo
Operación de Instalaciones Destinadas para la Disposición Final de Residuos Sólidos Municipales	137 párrafo segundo

Fuente: Minimización y manejo ambiental de los residuos sólidos (SEMARNAT)

Cuadro 1.5 Normas mexicanas aplicables a los residuos sólidos

<i>NMX - AA</i>	<i>ASPECTO QUE CUBREN</i>
16 - 1984	Determinación de humedad
18 - 1984	Determinación de cenizas
24 - 1984	Determinación de nitrógeno total
25 - 1984	Determinación de pH, método potenciométrico
92 - 1984	Determinación de azufre
15 - 1985	Cuarteo
19 - 1985	Peso volumétrico <i>in situ</i>
21 - 1985	Determinación de materia orgánica
22 - 1985	Selección y cuantificación de subproductos
33 - 1985	Determinación de poder calorífico
52 - 1985	Preparación de muestras en laboratorio para su análisis
61 - 1985	Generación per cápita de residuos sólidos municipales
67 - 1985	Determinación de la relación carbono/nitrógeno
68 - 1986	Determinación de hidrógeno
90 - 1986	Determinación de oxígeno

Fuente: Minimización y manejo ambiental de los residuos sólidos (SEMARNAT)

1.4 NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-083-ECOL-1996

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

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

Especificaciones

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

I. Aspectos generales

- Restricción por afectación a obras civiles o áreas naturales protegidas.
- Las distancias mínimas a aeropuertos son:
 - De 3 km cuando maniobren aviones de motor a turbina.
 - De 1.5 km cuando maniobren aviones de motor a pistón.

- Respetar el derecho de vía de autopistas, ferrocarriles, caminos principales y caminos secundarios.
- No se deben ubicar sitios dentro de áreas naturales protegidas.
- Se deben respetar los derechos de vía de obras públicas federales, tales como oleoductos, gasoductos, poliductos, torres de energía eléctrica, acueductos, etc.
- Debe estar alejado a una distancia mínima de 1.5 km, a partir del límite de la zona urbana de la población por servir, así como de poblaciones rurales de hasta 2500 habitantes. En caso de no cumplirse con esta restricción, se debe demostrar que no existirá afectación alguna a dichos centros de población.
- La localización de sitios de disposición final de residuos sólidos municipales, para aquellas localidades con una población de hasta 50,000 habitantes, o cuya recepción sea de 30 t/d, de estos residuos; se debe hacer considerando exclusivamente las especificaciones establecidas en los puntos III y IV de esta Norma Oficial Mexicana.

II. Aspectos hidrológicos

- Se debe localizar fuera de zonas de inundación con periodos de retorno de 100 años. En caso de no cumplir lo anterior, se debe demostrar que no exista la obstrucción del flujo en el área de inundación o posibilidad de deslaves o erosión que provoquen arrastre de los residuos sólidos.
- El sitio de disposición final de residuos sólidos municipales no se debe ubicar en zonas de pantanos, marismas y similares.
- La distancia de ubicación del sitio con respecto a cuerpos de agua superficiales con caudal continuo, debe ser de 1 km 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.

III. Aspectos geológicos

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

IV. Aspectos hidrogeológicos

- En caso de que el sitio para la disposición final de los residuos sólidos municipales esté sobre materiales fracturados, se debe garantizar que no exista

conexión con los acuíferos de forma natural y que el factor de tránsito de la infiltración (f) sea $\leq 3 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$.

- En caso de que el sitio para la disposición final de los residuos sólidos municipales esté sobre materiales granulares, se debe garantizar que el factor de tránsito de la infiltración (f) sea $\leq 3 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$.
- La distancia mínima del sitio a pozos para extracción de agua para uso doméstico, industrial, riego y ganadero tanto en operación como abandonados, debe estar a una distancia de la proyección horizontal por lo menos de 100 m de la mayor circunferencia del cono de abatimiento, siempre que la distancia resultante sea menor a 500 m , esta última será la distancia a respetar.

V. Consideraciones de selección

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

Procedimientos

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

I. Estudios geológicos

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

- *Estudio geológico regional.* Determinar el marco geológico regional con el fin de obtener su descripción estatigráfica, así como su geometría y distribución, considerando también la identificación de discontinuidades, tales como fallas y fracturas. Asimismo, se debe incluir todo tipo de información existente que ayude a un mejor conocimiento de las condiciones del sitio; esta información puede ser de corte litológicos de pozos de agua, exploración geotécnica, petrolera o de otra índole.
- *Estudio geológico local.* Determinar las unidades litológicas en el sitio, su geometría, distribución y presencia de fallas y fracturas. Asimismo, debe incluir estudios geofísicos para complementar la información sobre las unidades litológicas. El tipo de método a utilizar y el volumen de trabajo, debe garantizar el conocimiento tridimensional del comportamiento y distribución de los materiales en el subsuelo hasta una profundidad y distribución horizontal adecuada a las características geológicas e hidrogeológicas del área en que se ubica el sitio.

Si los resultados geológicos y geofísicos preliminares muestran que no existe conexión aparente entre las rocas fracturadas con acuíferos o que la distribución de unidades litológicas de baja permeabilidad es amplia, se debe realizar un mínimo de una perforación en la periferia del sitio.

II. Estudios hidrogeológicos

Los estudios hidrogeológicos deben considerar cinco etapas.

- *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.
- *Identificación del tipo de acuífero.* Identificar las unidades hidrogeológicas, extensión y geometría, tipo de acuífero (libre, confinado, semi-confinado) y relación entre las diferentes unidades hidrogeológicas que definen el sistema acuífero.
- *Determinación de parámetros hidráulicos* de las unidades hidrogeológicas, características físico-químicas del agua subterránea y características elementales de los estratos de 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.
- *Análisis del sistema de flujo.* Con base en la información geológica y de otros elementos hidrogeológicos, tales como zonas de freáticas, zonas de recarga y descarga, etc. se debe definir el sistema de flujo local y regional del área de estudio.
- *Evaluación del potencial de contaminación.* Se debe integrar toda la información obtenida, para determinar si el sitio es apto o si requiere obras de ingeniería.

Grado de concordancia con normas y recomendaciones internacionales. No hay normas equivalentes, las disposiciones de carácter técnico que existen en otros países, no reúnen los elementos y preceptos de orden técnico y jurídico que en esta Norma se integran y complementan de manera coherente, con base en los fundamentos técnicos y científicos reconocidos internacionalmente.

1.5 LEY GENERAL PARA LA PREVENCIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS (Publicada en el Diario Oficial el 8 de Octubre de 2003)

La presente Ley es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refiere a la protección al ambiente en materia de prevención y gestión integral de residuos, en el territorio nacional.

La SEMARNAT agrupará y subclasificará los residuos peligrosos, sólidos urbanos y de manejo especial en categorías, con el propósito de elaborar los inventarios correspondientes, y orientar la toma de decisiones basada en criterios de riesgo y en el manejo de los mismos. La subclasificación de los residuos deberá atender a la necesidad de:

- I. Proporcionar a los generadores o a quienes manejen o disponen finalmente de los residuos, indicaciones acerca del estado físico y propiedades o características inherentes, que permitan anticipar su comportamiento en el ambiente;
- II. Dar a conocer la relación existente entre las características físicas, químicas o biológicas inherentes a los residuos, y la posibilidad de que ocasionen o puedan ocasionar efectos adversos a la salud, al ambiente o a los bienes, en función de sus volúmenes, sus formas de manejo y la exposición que de éste se derive. Para tal efecto, se considerará la presencia en los residuos, de sustancias peligrosas o agentes infecciosos que puedan ser liberados durante su manejo y disposición final, así como la vulnerabilidad de los seres humanos o de los ecosistemas que puedan verse expuestos a ellos;
- III. Identificar las fuentes generadoras, los diferentes tipos de residuos, los distintos materiales que constituyen los residuos y los aspectos relacionados con los mercados de los materiales reciclables o reciclados, entre otros, para orientar a los responsables del manejo integral de residuos, e
- IV. Identificar las fuentes generadoras de los residuos cuya disposición final pueda provocar salinización e incrementos excesivos de carga orgánica en suelos y cuerpos de agua.

Los residuos sólidos urbanos podrán subclasificarse en orgánicos e inorgánicos con objeto de facilitar su separación primaria y secundaria, de conformidad con los Programas Estatales y Municipales para la Prevención y la Gestión Integral de los Residuos, así como con los ordenamientos legales aplicables.

Las entidades federativas y los municipios, en el ámbito de sus respectivas competencias, deberán elaborar e instrumentar los programas locales para la prevención y gestión integral de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, de conformidad con esta Ley, con el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos y demás disposiciones aplicables. Dichos programas deberán contener al menos lo siguiente:

- I. El diagnóstico básico para la gestión integral de residuos de su competencia, en el que se precise la capacidad y efectividad de la infraestructura disponible para satisfacer la demanda de servicios;
- II. La política local en materia de residuos sólidos urbanos y de manejo especial;
- III. La definición de objetivos y metas locales para la prevención de la generación y el mejoramiento de la gestión de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, así como las estrategias y plazos para su cumplimiento;
- IV. Los medios de financiamiento de las acciones consideradas en los programas;
- V. Los mecanismos para fomentar la vinculación entre los programas municipales correspondientes, a fin de crear sinergias, y
- VI. La asistencia técnica que en su caso brinde la Secretaría.

El gobierno Federal, los gobiernos de las entidades federativas y los municipios, en la esfera de su competencia, promoverá la participación de todos los sectores de la sociedad en la prevención de la generación, la valorización y gestión integral de residuos, para lo cual:

- I. Fomentará y apoyará la conformación, consolidación y operación de grupos intersectoriales interesados en participar en el diseño e instrumentación de políticas programas correspondientes, así como para prevenir la contaminación de sitios con materiales y residuos y llevar a cabo su remediación;
- II. Convocarán a los grupos sociales organizados a participar en proyectos destinados a generar la información necesaria para sustentar programas de gestión integral de residuos;
- III. Impulsarán la conciencia ecológica y la aplicación de la presente Ley, a través de la realización de acciones conjuntas con la comunidad para la prevención y gestión integral de los residuos.

Los tres órdenes de gobierno integrarán inventarios de tiraderos de residuos o sitios donde se han abandonado clandestinamente residuos de diferente índole en cada entidad, en los cuales se asienten datos acerca de su ubicación, el origen, características y otros elementos de información que sean útiles a las autoridades, para desarrollar medidas tendentes a evitar o reducir riesgos. La integración de inventarios se sustentará en criterios, métodos y sistemas informáticos, previamente acordados, estandarizados y difundidos.

La Secretaría, al reglamentar y normar la operación de los procesos de incineración y co-procesamiento de residuos permitidos para tal efecto, distinguirá aquellos en los cuales los residuos estén sujetos a un co-procesamiento con el objeto de valorizarlos mediante su empleo como combustible alternativo para la generación de energía, que puede ser aprovechada en la producción de bienes y servicios.

Deberán distinguirse los residuos que por sus características, volúmenes de generación y acumulación, problemas ambientales e impactos económicos y sociales que ocasiona su manejo inadecuado, pudieran ser objeto de co-procesamiento. A su vez, deberán establecerse restricciones a la incineración, o al co-procesamiento mediante combustión de residuos susceptibles de ser valorizados mediante otros procesos, cuando éstos estén disponibles, sean ambientales eficaces, tecnológica y económicamente factibles. En tales casos, deberán promoverse acciones que tiendan a fortalecer la infraestructura de valorización o de tratamiento de estos residuos, por otros medios.

Quienes resulten responsables de la contaminación de un sitio, así como de daños a la salud como consecuencia de ésta, estarán obligados a reparar el daño causado, conforme a las disposiciones legales correspondientes.

Las entidades federativas y los municipios, en el ámbito de sus respectivas competencias, con el propósito de promover la reducción de la generación, valorización y gestión integral de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, a fin de proteger la salud y prevenir y controlar la contaminación ambiental producida por su manejo, deberán llevar a cabo las siguientes acciones:

- I. El control y vigilancia del manejo integral de residuos en el ámbito de su competencia;
- II. Diseñar e instrumentar programas para incentivar a los grandes generadores de residuos a reducir su generación y someterlos a un manejo integral;

- III. Promover la suscripción de convenios con los grandes generadores de residuos, en el ámbito de su competencia, para que formulen e instrumenten los planes de manejo de los residuos que generen;
- IV. Integrar el registro de los grandes generadores de residuos en el ámbito de su competencia y de empresas prestadoras de servicios de manejo de esos residuos, así como la base de datos en la que se recabe la información respecto al tipo, volumen y forma de manejo de los residuos;
- V. Integrar la información relativa a la gestión integral de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, al Sistema Nacional de Información Ambiental y Recursos Naturales;
- VI. Elaborar, actualizar y difundir el diagnóstico básico para la gestión integral de residuos sólidos urbanos y de manejo especial;
- VII. Coordinarse con las autoridades federales, con otras entidades federativas o municipios, según proceda, y concertar con representantes de organismos privados y sociales, para alcanzar las finalidades a que se refiere esta Ley y para la instrumentación de planes de manejo de los distintos residuos que sean de su competencia;
- VIII. Establecer programas para mejorar el desempeño ambiental de las cadenas productivas que intervienen en la segregación, acopio y preparación de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial para su reciclaje;
- IX. Desarrollar guías y lineamientos para la segregación, recolección, acopio, almacenamiento, reciclaje, tratamiento y transporte de residuos;
- X. Organizar y promover actividades de comunicación, educación, capacitación, investigación y desarrollo tecnológico para prevenir la generación, valorizar y lograr el manejo integral de los residuos;
- XI. Promover la integración, operación y funcionamiento de organismos consultivos en los que participen representantes de los sectores industrial, comercial y de servicios, académico, de investigación y desarrollo tecnológico, asociaciones profesionales y de consumidores, y redes intersectoriales relacionados con el tema, para que tomen parte en los procesos destinados a clasificar los residuos, evaluar las tecnologías para su prevención valorización y tratamiento, planificar el desarrollo de la infraestructura para su manejo y desarrollar las propuestas técnicas de instrumentos normativos y de otra índole que ayuden a lograr los objetivos en la materia, y
- XII. Realizar las acciones necesarias para prevenir y controlar la contaminación por residuos susceptibles de provocar de salinización de suelos e incrementos excesivos de carga orgánica en suelos y cuerpos de agua.

Los municipios, de conformidad con las leyes estatales, llevarán a cabo las acciones necesarias para la prevención de la generación, valorización y la gestión integral de los residuos sólidos urbanos, considerando:

- I. Las obligaciones a las que se sujetarán los generadores de residuos sólidos urbanos;
- II. Los requisitos para la prestación de los servicios para el manejo integral de los residuos sólidos urbanos, y
- III. Los ingresos que deberán obtener por brindar el servicio de su manejo integral.

La legislación que expidan las entidades federativas, en relación con la generación, manejo y disposición final de residuos sólidos urbanos podrá contener las siguientes prohibiciones:

- I. Verter residuos en la vía pública, predios baldíos, barrancas, cañadas, ductos de drenaje y alcantarillado, cableado eléctrico o telefónico, de gas; en de cuerpos de agua; cavidades subterráneas; áreas naturales protegidas y zonas conservación ecológica; zonas rurales y lugares no autorizados por la legislación aplicable;
- II. Incinerar residuos a cielo abierto, y
- III. Abrir nuevos tiraderos a cielo abierto

Toda persona, grupo social, organización no gubernamental, asociación y sociedad podrá denunciar ante la Secretaría, todo hecho, acto u omisión que produzca o pueda producir desequilibrio ecológico, daños al ambiente, a los recursos naturales o a la salud en relación con las materias de esta Ley y demás ordenamientos que de ella emanen.

La tramitación de la denuncia popular a que se refiere este precepto, se llevará a cabo de conformidad con lo dispuesto en la Ley General del Equilibrio y la Protección al Ambiente.

1.6 LEY DE RESIDUOS SÓLIDOS DEL DISTRITO FEDERAL (Publicada en la Gaceta Oficial del Distrito Federal el 22 de abril de 2003)

La presente Ley es de observancia en el Distrito Federal, sus disposiciones son de orden público e interés social, y tiene por objeto regular la gestión integral de los residuos sólidos considerados como no peligrosos, así como la prestación del servicio público de limpia.

Son autoridades competentes para la aplicación de la presente Ley, y ejercerán las atribuciones de conformidad con la distribución de facultades que este ordenamiento, su reglamento y demás disposiciones jurídicas aplicables establecen:

- I. La o el Jefe de Gobierno del Distrito Federal;
- II. La Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal;
- III. La Secretaría de Obras y Servicios;
- IV. La Secretaría de Salud;
- V. La Procuraduría; y
- VI. Las delegaciones.

La Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal, en coordinación con la Secretaría de Obras y Servicios y con opinión de las delegaciones, formulará y evaluará el Programa de Gestión Integral de los Residuos Sólidos, mismo que integrará los

lineamientos, acciones y metas en materia de manejo integral de los residuos sólidos y la prestación del servicio público de limpieza con base en los siguientes criterios:

I. Adoptar medidas para la reducción de la generación de los residuos sólidos, su separación en la fuente de origen, su recolección y transporte separados, así como su adecuado aprovechamiento, tratamiento y disposición final;

II. Promover la reducción de la cantidad de los residuos sólidos que llegan a disposición final;

III. Adoptar medidas preventivas, considerando los costos y beneficios de la acción u omisión, cuando exista evidencia científica que compruebe que la liberación al ambiente de residuos sólidos pueden causar daños a la salud o al ambiente;

IV. Prevenir la liberación de los residuos sólidos que puedan causar daños al ambiente o a la salud humana y la transferencia de contaminantes de un medio a otro;

V. Prever la infraestructura necesaria para asegurar que los residuos sólidos se manejen de manera ambientalmente adecuada;

VI. Promover la cultura, educación y capacitación ambientales, así como la participación del sector social, privado y laboral, para el manejo integral de los residuos sólidos;

VII. Fomentar la responsabilidad compartida entre productores, distribuidores y consumidores en la reducción de la generación de los residuos sólidos y asumir el costo de su adecuado manejo;

VIII. Fomentar la participación activa de las personas, la sociedad civil organizada y el sector privado en el manejo de los residuos sólidos;

IX. Armonizar las políticas de ordenamiento territorial y ecológico con el manejo integral de los residuos sólidos, identificando áreas apropiadas para la ubicación de infraestructura;

X. Fomentar la generación, sistematización y difusión de información del manejo de los residuos sólidos para la toma de decisiones;

XI. Definir las estrategias sectoriales e intersectoriales para la minimización y prevención de la generación y el manejo de los residuos sólidos, conjugando las variables económicas, sociales, culturales, tecnológicas, sanitarias y ambientales en el marco de la sustentabilidad;

XII. Promover medidas para evitar el depósito, descarga, acopio y selección de los residuos sólidos en áreas o en condiciones no autorizadas;

XIII. Promover sistemas de reutilización, depósito, retorno u otros similares que reduzcan la generación de residuos, en el caso de productos o envases que después de

ser utilizados generen residuos en alto volumen o que originen impactos ambientales significativos;

XIV. Establecer las medidas adecuadas para reincorporar al ciclo productivo materiales o sustancias reutilizables o reciclables y para el desarrollo de mercados de subproductos para la valorización de los residuos sólidos;

XV. Fomentar el desarrollo uso de tecnologías, métodos, prácticas y procesos de producción y comercialización que favorezcan la minimización y valorización de los residuos sólidos;

XVI. Establecer acciones orientadas a recuperar los sitios contaminados por el manejo de los residuos sólidos;

XVII. Establecer las condiciones que deberán cumplirse para el cierre de estaciones de transferencia, plantas de selección y tratamiento y rellenos sanitarios, de manera que no existan suelos contaminados por el manejo de los residuos sólidos y medidas para monitorear dichos sitios, ulterior al cierre, con plazos no menores a diez años posteriores a su cierre;

XVIII. Evitar el manejo y disposición de residuos de manejo especial, líquidos o semisólidos, sin que hayan sido sometidos a procesos para deshidratarlos, neutralizarlos y estabilizarlos;

XIX. Evitar la disposición final de los residuos sólidos que sean incompatibles y puedan provocar reacciones que liberen gases, provoquen incendios o explosiones o que puedan solubilizar las sustancias potencialmente tóxicas contenidas en ellos; y

XX. Los demás que establezca el Reglamento y otros ordenamientos aplicables.

Toda persona que genere residuos sólidos tiene la propiedad y responsabilidad de su manejo hasta el momento en que son entregados al servicio de recolección, o depositados en los contenedores o sitios autorizados para tal efecto por la autoridad competente.

Para la prevención de la generación, valorización y manejo de los residuos sólidos, se incluirá en el reglamento las disposiciones para formular planes de manejo, guías y lineamientos para generadores de alto volumen de los residuos sólidos.

Las personas físicas o morales responsables de la producción, distribución o comercialización de bienes que, una vez terminada su vida útil, originen residuos sólidos en alto volumen o que produzcan desequilibrios significativos al medio ambiente, cumplirán, además de las obligaciones que se establezcan en el Reglamento, con las siguientes:

I. Instrumentar planes de manejo de los residuos sólidos en sus procesos de producción, prestación de servicios o en la utilización de envases y embalajes, así como su fabricación o diseño, comercialización o utilización que contribuyan a la minimización

de los residuos sólidos y promuevan la reducción de la generación en la fuente, su valorización o disposición final, que ocasionen el menor impacto ambiental posible;

II. Adoptar sistemas eficientes de recuperación o retorno de los residuos sólidos derivados de la comercialización de sus productos finales; y

III. Privilegiar el uso de envases y embalajes que una vez utilizados sean susceptibles de valorización mediante procesos de reúso y reciclaje.

Es responsabilidad de toda persona, física o moral, en el Distrito Federal:

I. Separar, reducir y evitar la generación de los residuos sólidos;

II. Barrer diariamente las banquetas, andadores y pasillos y mantener limpios de residuos sólidos los frentes de sus viviendas o establecimientos industriales o mercantiles, así como los terrenos de su propiedad que no tengan construcción, a efecto de evitar contaminación y molestias a los vecinos;

III. Fomentar la reutilización y reciclaje de los residuos sólidos;

IV. Cumplir con las disposiciones específicas, criterios, normas y recomendaciones técnicas;

V. Almacenar los residuos sólidos con sujeción a las normas sanitarias y ambientales para evitar daño a terceros y facilitar la recolección;

VI. Poner en conocimiento de las autoridades competentes las infracciones que se estimen se hubieran cometido contra la normatividad de los residuos sólidos; y

VII. Las demás que establezcan los ordenamientos jurídicos aplicables.

Queda prohibido por cualquier motivo:

I. Arrojar o abandonar en la vía pública, áreas comunes, parques, barrancas, y en general en sitios no autorizados, residuos sólidos de cualquier especie;

II. Depositar animales muertos, residuos sólidos que despidan olores desagradables o aquellos provenientes de la construcción en los contenedores instalados en la vía pública para el arrojamiento temporal de residuos sólidos de los transeúntes;

III. Quemar a cielo abierto o en lugares no autorizados, cualquier tipo de los residuos sólidos;

IV. Arrojar o abandonar en lotes baldíos, a cielo abierto o en cuerpos de aguas superficiales o subterráneas, sistemas de drenaje, alcantarillado o en fuentes públicas, residuos sólidos de cualquier especie;

V. Peparar residuos sólidos de los recipientes instalados en la vía pública y dentro de los sitios de disposición final y sus alrededores;

- VI. Instalar contenedores de los residuos sólidos en lugares no autorizados;
- VII. Fijar propaganda comercial o política en el equipamiento urbano destinado a la recolección de los residuos sólidos, así como fijar en los recipientes u otro mobiliario urbano destinado al depósito y recolección colores alusivos a algún partido político;
- VIII. Fomentar o crear basureros clandestinos;
- IX. Confinar residuos sólidos fuera de los sitios destinados para dicho fin en parques, áreas verdes, áreas de valor ambiental, áreas naturales protegidas, zonas rurales o áreas de conservación ecológica;
- X. Tratar térmicamente los residuos sólidos recolectados, sin considerar las disposiciones jurídicas aplicables;
- XI. Diluir o mezclar residuos sólidos o industriales peligrosos en cualquier líquido y su vertimiento al sistema de alcantarillado, a cualquier cuerpo de agua o sobre suelos con o sin cubierta vegetal;
- XII. Mezclar residuos peligrosos con residuos sólidos e industriales no peligrosos; y
- XIII. Confinar o depositar en sitios de disposición final residuos en estado líquido o con contenidos líquidos que excedan los máximos permitidos por las normas oficiales mexicanas o las normas ambientales del Distrito Federal.

Las violaciones a lo establecido en este artículo se sancionarán de conformidad con lo dispuesto en esta Ley, sin perjuicio de lo establecido en la Ley de Justicia Cívica del Distrito Federal y demás ordenamientos jurídicos aplicables.

La Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal elaborará y mantendrá actualizado, en los términos del reglamento, un inventario que contenga la clasificación de los residuos sólidos y sus tipos de fuentes generadoras, con la finalidad de:

- I. Orientar la toma de decisiones tendientes a la prevención, control y minimización de dicha generación;
- II. Proporcionar a quien genere, recolecte, trate o disponga finalmente los residuos sólidos, indicadores acerca de su estado físico y propiedades o características inherentes que permitan anticipar su comportamiento en el ambiente;
- III. Dar a conocer la relación existente entre las características físicas, químicas o biológicas inherentes a los residuos sólidos, y la probabilidad de que ocasionen o puedan ocasionar efectos adversos a la salud humana, al ambiente o a los bienes en función de sus volúmenes, sus formas de manejo y la exposición que de éste se derive; y
- IV. Identificar las fuentes generadoras, los diferentes tipos de los residuos sólidos, los distintos materiales que los constituyen y los aspectos relacionados con su valorización.

La categorización de los residuos sólidos que deberá contener dicho inventario podrá considerar las características físicas, químicas o biológicas que los hacen:

I. Inertes;

II. Fermentables;

III. De alto valor calorífico y capaces de combustión;

IV. Volátiles;

V. Solubles en distintos medios;

VI. Capaces de salinizar suelos;

VII. Capaces de provocar incrementos excesivos de la carga orgánica en cuerpos de agua y el crecimiento excesivo de especies acuáticas que ponga en riesgo la supervivencia de otras;

VIII. Persistentes; y

IX. Bioacumulables.

Para los efectos de esta Ley, los residuos sólidos se clasifican en:

I. Residuos urbanos; y

II. Residuos de manejo especial considerados como no peligrosos y sean competencia del Distrito Federal.

Son residuos urbanos: Los generados en casa habitación, unidad habitacional o similares que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques, los provenientes de cualquier otra actividad que genere residuos sólidos con características domiciliarias y los resultantes de la limpieza de las vías públicas y áreas comunes, siempre que no estén considerados por esta Ley como residuos de manejo especial, así como los residuos provenientes de las actividades de limpieza y cuidado de áreas verdes a las que se refiere la Ley Ambiental.

Todo generador de residuos sólidos debe separarlos en orgánicos e inorgánicos, dentro de sus domicilios, empresas, establecimientos mercantiles, industriales y de servicios, instituciones públicas y privadas, centros educativos y dependencias gubernamentales y similares.

Estos residuos sólidos, deben depositarse en contenedores separados para su recolección por el servicio público de limpia, con el fin de facilitar su aprovechamiento, tratamiento y disposición final, o bien, llevar aquellos residuos sólidos valorizables directamente a los establecimientos de reutilización y reciclaje.

Los recipientes y contenedores que las autoridades dispongan en la vía pública deberán ser diferenciados para residuos urbanos en orgánicos e inorgánicos.

La prestación del servicio de limpia en el Distrito Federal constituye un servicio público que estará a cargo de la Administración Pública del Distrito Federal, a través de la Secretaría de Obras y Servicios y las Delegaciones, en los términos de esta Ley y demás ordenamientos jurídicos aplicables.

El servicio público de limpia comprende:

I. El barrido de vías públicas, áreas comunes y vialidades, así como la recolección de los residuos sólidos; y

II. La transferencia, aprovechamiento, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos.

Todo generador de los residuos sólidos tiene la obligación de entregarlos al servicio de limpia.

El servicio de recolección domiciliaria en casa habitación, unidades habitacionales y demás edificaciones destinadas a vivienda, así como los establecimientos mercantiles considerados como contribuyentes de ingresos menores, se realizará de manera gratuita.

Los establecimientos mercantiles y de servicios distintos a los establecidos en el párrafo anterior, empresas, fábricas, tianguis, mercados sobre ruedas autorizados, mercados públicos, centros de abasto, concentraciones comerciales, industrias y similares, así como las dependencias y entidades federales, que generen residuos sólidos en alto volumen, deberán pagar las tarifas correspondientes por los servicios de recolección y recepción de residuos sólidos que establece el Código Financiero del Distrito Federal.

Los camiones recolectores de los residuos sólidos, así como los destinados para la transferencia de dichos residuos a las plantas de selección y tratamiento o a los sitios de disposición final, deberán disponer de contenedores seleccionados conforme a la separación selectiva que esta Ley establece.

Las delegaciones dispondrán contenedores para el depósito de los residuos sólidos de manera separada conforme a lo establecido en la presente Ley, en aquellos sitios que por su difícil accesibilidad o por su demanda así lo requiera, procediendo a su recolección.

Los contenedores de residuos urbanos deberán mantenerse dentro del predio de la persona que lo habita o del establecimiento de que se trate y sólo se sacarán a la vía pública o áreas comunes el tiempo necesario para su recolección el día y hora señalados por el servicio público de limpia. Dichos contenedores deberán satisfacer las necesidades de servicio del inmueble, y cumplir con las condiciones de seguridad e higiene, de conformidad con la Ley de Salud para el Distrito Federal y demás ordenamientos aplicables.

La Secretaría de Obras y Servicios diseñará el sistema de transferencia, selección y tratamiento de los residuos sólidos, procurando la construcción y operación en número suficiente en cada delegación conforme a la cantidad de residuos que se generan en cada demarcación territorial, contando con el personal suficiente para su manejo.

El ingreso de personas o vehículos a las estaciones de transferencia y plantas de selección y tratamiento de los residuos sólidos tienen acceso restringido conforme a lo que el Reglamento y las normas ambientales establezcan y no podrán convertirse en centros de almacenamiento permanente.

Para la operación y mantenimiento de las estaciones de transferencia y plantas de selección y tratamiento, así como centros de composteo, se deberá contar con:

- I. Personal previamente capacitado para reconocer la peligrosidad y riesgo de los residuos que manejan y darles un manejo seguro y ambientalmente adecuado;
- II. Programa de preparación y respuesta a emergencias y contingencias que involucren a los residuos sólidos urbanos;
- III. Bitácora en la cual se registren los residuos que se reciben, indicando tipo, peso o volumen, destino y fecha de entrada y salida de los mismos;
- IV. Área para segregar y almacenar temporalmente los residuos, por tiempos acordes con lo que establezcan las disposiciones respectivas; y
- V. Los demás requisitos que determine el Reglamento y normas aplicables.

Las plantas de selección y tratamiento de los residuos sólidos deberán contar con la infraestructura necesaria para la realización del trabajo especializado para el depósito de dichos residuos de acuerdo a sus características y conforme separación clasificada de los residuos sólidos que esta Ley establece.

Asimismo, deberán contar con básculas y sistemas para llevar el control de los residuos depositados, así como con un sistema adecuado de control de ruidos, olores y emisión de partículas que garantice un adecuado manejo de los residuos sólidos y minimicen los impactos al ambiente y a la salud humana.

Los residuos sólidos que no puedan ser tratados por medio de los procesos establecidos por esta Ley, deberán ser enviados a los sitios de disposición final.

La selección de los sitios para disposición final, así como la construcción y operación de las instalaciones deberá sujetarse a lo estipulado en las normas oficiales mexicanas y demás ordenamientos jurídicos aplicables.

Los sitios de disposición final tendrán un acceso restringido a materiales reutilizables o reciclables y deberá recibir un menor porcentaje de residuos orgánicos. Además, emplearán mecanismos para instalar sistemas de extracción de biogas y tratamiento de lixiviados para su recolección.

Queda prohibida la selección o pepena de los residuos sólidos en los sitios destinados para relleno sanitario.

La Secretaría de Obras y Servicios deberá establecer programas de capacitación periódica a los trabajadores que laboren en los sitios de disposición final.

Los rellenos sanitarios que hayan cumplido su vida útil se destinarán únicamente como parques, jardines, centros de educación ambiental o sitios para el fomento de la recreación y la cultura.

Las autoridades fomentarán programas para que los establecimientos de mayoristas, tiendas de departamentos y centros comerciales se cuente con espacios y servicios destinados a la recepción de materiales y subproductos de los residuos sólidos valorizables.

Todo establecimiento mercantil, industrial y de servicios que se dedique a la reutilización o reciclaje de los residuos sólidos deberán:

- I. Obtener autorización de las autoridades competentes;
- II. Ubicarse en lugares que reúnan los criterios que establezca la normatividad aplicable;
- III. Instrumentar un plan de manejo aprobado por la Secretaría para la operación segura y ambientalmente adecuada de los residuos sólidos que valorice;

Los residuos sólidos que hayan sido seleccionados y remitidos a los mercados de valorización y que por sus características no puedan ser procesados, deberán enviarse para su disposición final.

La Secretaría de Obras y Servicios diseñará, construirá, operará y mantendrá centros de composteo o de procesamiento de residuos urbanos orgánicos, de conformidad con lo que establece el Programa de Gestión Integral de los Residuos Sólidos y el Programa de Prestación del Servicio de Limpia correspondiente.

Las delegaciones podrán encargarse de las actividades señaladas en el párrafo anterior, procurando que la composta producida se utilice, preferentemente, en parques, jardines, áreas verdes, áreas de valor ambiental, áreas naturales protegidas y otras que requieran ser regeneradas.

La composta que no pueda ser aprovechada deberá ser enviada a los rellenos sanitarios para su disposición final.

Es responsabilidad de toda persona que genere y maneje residuos sólidos, hacerlo de manera que no implique daños a la salud humana ni al ambiente.

Cuando la generación, manejo y disposición final de los residuos sólidos produzca contaminación del suelo, independientemente de las sanciones penales o administrativas que procedan, quien preste el servicio esta obligado a:

I. Llevar a cabo las acciones necesarias para restaurar y recuperar las condiciones del suelo, de acuerdo a lo establecido en las disposiciones jurídicas aplicables; y

II. En caso de que la recuperación o restauración no fueran factibles, a indemnizar por los daños causados a terceros o al ambiente de conformidad con la legislación aplicable.

Las autoridades competentes podrán aplicar las siguientes medidas de seguridad cuando las operaciones y procesos empleados durante la recolección, transporte, transferencia, tratamiento, o disposición final representen riesgos significativos para la salud humana o el ambiente:

I. Asegurar los materiales, residuos o sustancias contaminantes, vehículos, utensilios e instrumentos directamente relacionados con la conducta a que da lugar la imposición de la medida de seguridad, según lo previsto en el párrafo primero de este artículo;

II. Asegurar, aislar, suspender o retirar temporalmente en forma parcial o total, según corresponda, los bienes, equipos y actividades que generen riesgo significativo o daño;

III. Clausurar temporal, parcial o totalmente las instalaciones en que se manejen o se preste el servicio correspondiente que den lugar a los supuestos a que se refiere el primer párrafo de este artículo; y

IV. Suspender las actividades, en tanto no se mitiguen los daños causados.

Las sanciones administrativas podrán ser:

I. Amonestación;

II. Multa;

III. Arresto; y

IV. Las demás que señalen las leyes o reglamentos.

En la imposición de sanciones se tomarán en cuenta los siguientes criterios:

I. La trascendencia social, sanitaria o ambiental y el perjuicio causado por la infracción cometida;

II. El ánimo de lucro ilícito y la cuantía del beneficio obtenido en la comisión de la infracción;

III. El carácter intencional o negligente de la acción u omisión constitutiva de la infracción; y

IV. La reincidencia en la comisión de infracciones, la gravedad de la conducta y la intención con la cual fue cometida.

Toda persona, grupos sociales, organizaciones no gubernamentales, asociaciones y sociedades podrán denunciar ante la Procuraduría todo hecho, acto u omisión que produzca o pueda producir desequilibrio ecológico o daños al ambiente o a los recursos naturales derivados del manejo inadecuado de los residuos sólidos, o contravenga las disposiciones de la presente Ley y de los demás ordenamientos que regulen materias relacionadas con la misma.

II. CICLO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES

2.1 INTRODUCCIÓN

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

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

Es por esto, que hoy en día una de las prioridades de atención de los tres órdenes de gobierno, la constituye el manejo y disposición final de RSM. Dicho manejo no puede abordarse exclusivamente desde el punto de vista técnico, por tratarse de una problemática compleja, íntimamente relacionada con la forma de administración de los recursos, de la capacidad administrativa de los organismos responsables de su gestión y de la forma en que transcurre el desarrollo económico y social del país. Asimismo, el problema que representan los residuos sólidos, está influido por la creciente industrialización que enfrenta el país, lo cual repercute en los patrones locales de producción y consumo.

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

Desarrollo de la gestión de residuos sólidos. La gestión de residuos sólidos puede ser definida como la disciplina asociada al control de la generación, almacenamiento, recolección, transferencia y transporte, procesamiento y evacuación de residuos sólidos de una forma que armoniza con los mejores principios de la salud pública, de la economía, de la ingeniería, de la conservación, de la estética, y de otras consideraciones ambientales, y que también responde a las expectativas públicas.

2.2 GENERACIÓN

Generación de residuos. La generación de residuos abarca las actividades en las que los materiales son identificados sin ningún valor adicional, y son tirados o recogidos juntos para la evacuación. La generación de residuos es, de momento, una actividad poco controlable.

Producción Per cápita (PPC). La producción de residuos sólidos domésticos es una variable que depende básicamente del tamaño de la población y de sus características socioeconómicas. Una variable necesaria para dimensionar el sitio de disposición final es la llamada Producción per cápita (PPC). Este parámetro asocia el tamaño de la población, la cantidad de residuos y el tiempo; siendo la unidad de expresión el kilogramo por habitante por día [*kg/hab/d*].

Estimación teórica de Producción per cápita (PPC). La producción per cápita es un parámetro que evoluciona en la medida que los elementos que la definen varían. La producción per cápita varía de una población a otra, de acuerdo principalmente a su grado de urbanización, su densidad poblacional y su nivel de consumo o nivel socioeconómico. Otros elementos, como los periodos estacionales y las actividades predominantes también afectan la producción per cápita. Es posible efectuar una estimación teórica de la producción per cápita en función de las estadísticas de recolección y utilizando la ecuación 2.1.

$$P_R = \frac{N_V \cdot N_J \cdot C_P \cdot D_N}{POBLACIÓN} \quad \dots \text{ecuación 2.1}$$

Donde:

- P_R = Producción total de residuos sólidos por día
- N_V = Número de vehículos en operación
- N_J = Número de viajes por vehículo
- C_P = Capacidad útil estimada por vehículo en m^3
- D_N = Densidad de los residuos en el vehículo

Fuente: <http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/residuos.html>

Estadísticas de generación. Si bien la generación per cápita de RSM en nuestro país, es inferior a la generación de otros países del mundo como se muestra en el Cuadro 2.1, su volumen diario sobrepasa las capacidades instaladas de los municipios.

Cuadro 2.1 Tasa de generación per cápita en diferentes países

PAÍS	GENERACIÓN PER CÁPITA [kg/hab/d]
E.U.A.	1.970
Canadá	1.900
Finlandia	1.690
Holanda	1.300
Suiza	1.200
Japón	1.120
México	0.853

Fuente: <http://www.fundacion-ica.org.mx>

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

La tendencia de incremento de generación se estima que puede variar de 1 a 3% anual dependiendo de la localidad.

La composición de los residuos sólidos municipales (RSM) no es homogénea en todo el territorio nacional (Cuadros 2.2a y 2.2b), sino que responde a la distribución de hábitos de consumo y poder adquisitivo de la población. Así, la composición en el sur del país (estados como Chiapas y Tabasco) tiene mayores contenidos de residuos de jardinería, mientras que en las zonas urbanas este mismo producto aparece en menor proporción.

Cuadro 2.2a Composición de los residuos en México por zona geográfica (valores en %)

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

Fuente: <http://www.fundacion-ica.org.mx>

Cuadro 2.2b Generación en México de residuos sólidos municipales por composición

(Miles de toneladas)	1999	2000	2001	2002
Composición				
Total	30952.0	30732.0	31488.6	32173.0
Papel, cartón, productos de papel	4354.9	4324.1	4430.4	4526.8
Textiles	461.2	457.9	469.2	479.4
Plásticos	1355.7	1346.1	1379.2	1409.2
Vidrios	1826.2	1813.2	1857.8	1898.2
Metales	897.0	891.0	913.0	933.0
Aluminio	495.2	491.7	503.8	514.8
Ferrosos	249.2	247.4	253.5	259.0
Otros ferrosos	153.2	152.1	155.9	159.3
Basura de comida, de jardines y materiales orgánicos similares	16218.8	16104.1	16500.0	16859.0
Otro tipo de basura (residuos finos, pañal desechable, etc.)	5837.5	5796.2	5938.7	6067.9

Fuente: <http://www.fundacion-ica.org.mx>

El Cuadro 2.3 presenta la generación de RSM por entidad federativa para el periodo 1999-2002.

Cuadro 2.3 Generación de residuos sólidos municipales por entidad federativa, 1999-2002

(Miles de toneladas) Entidad federativa	1999	2000	2001	2002
Aguascalientes	276.0	275.8	285.3	293.4
Baja California	843.6	941.0	985.2	1 027.4
Baja California Sur	127.5	134.9	140.4	145.7
Campeche	234.8	189.6	191.8	193.3
Coahuila de Zaragoza	683.4	683.3	700.6	715.8
Colima	148.1	153.0	158.3	163.3
Chiapas	882.1	883.0	909.4	933.4
Chihuahua	950.1	993.8	1 029.3	1 062.5
Distrito Federal	4 350.7	4 350.7	4 350.7	4 350.7
Durango	416.3	399.7	406.7	412.6
Guanajuato	1 377.4	1 371.3	1 406.5	1 437.0
Guerrero	816.4	765.0	783.3	799.2
Hidalgo	510.4	510.7	523.7	535.5
Jalisco	2 258.8	2 168.2	2 221.0	2 267.1
México	5 091.1	4 972.7	5 148.3	5 310.9
Michoacán de Ocampo	974.6	963.6	982.0	997.5
Morelos	447.8	458.8	471.7	483.2
Nayarit	238.9	229.6	234.2	238.1
Nuevo León	1 485.6	1 497.0	1 540.1	1 579.0
Oaxaca	681.9	685.1	702.5	720.5
Puebla	1 322.2	1 347.7	1 386.6	1 422.7
Querétaro de Arteaga	389.9	416.0	431.9	446.6
Quintana Roo	245.6	269.2	285.1	301.2
San Luis Potosí	593.6	579.4	592.7	604.4
Sinaloa	798.0	759.4	776.3	790.7
Sonora	657.9	660.4	675.8	689.2
Tabasco	522.1	521.3	536.2	549.5
Tamaulipas	817.8	850.5	877.8	902.7
Tlaxcala	219.3	229.8	236.7	243.4
Veracruz de Ignacio de la Llave	1 826.4	1 724.4	1 754.3	1 779.6
Yucatán	435.6	437.9	449.2	459.5
Zacatecas	328.6	310.6	314.7	318.0

Fuente: SEDESOL. Dirección de Residuos Sólidos Municipales

Composición de los residuos sólidos. *Composición* es el término utilizado para describir los componentes individuales que constituyen el flujo de residuos sólidos y su distribución relativa, usualmente basada en porcentajes por peso. La información sobre la composición de los residuos sólidos es importante para evaluar las necesidades de equipo, los sistemas y los programas y planes de gestión. Es necesario distinguir claramente a qué etapa de la gestión de residuos corresponden los valores de composición. Los factores de que depende la composición de los residuos son relativamente similares a los que definen el nivel de generación de los mismos.

Variaciones estacionales en la generación de residuos. La cantidad y calidad de los residuos sólidos puede variar en forma significativa a través del año. Comúnmente en climas templados, la cantidad media diaria, semanal y mensual de residuos está sobre la media anual durante los meses de verano. Esto es atribuible en parte al aumento de la basura orgánica (por hábitos y disponibilidad para consumo), además de las probables actividades de mejoramiento urbano comúnmente realizadas en esta época. En lugares donde la generación de residuos industriales representa un porcentaje importante del total, el patrón de generación queda determinado por el tipo de industrias presentes.

Características de los residuos

Humedad. Es una característica importante para los procesos a que puede ser sometida la basura. Se determina generalmente de la siguiente forma: Tomar una muestra representativa, de 1 a 2 kg, se calienta a 80°C durante 24 h, se pesa y se expresa en humedad. La ecuación 2.2 permite el cálculo de la humedad.

$$\text{Humedad} = \frac{\text{Peso}_{\text{Inicial}} - \text{Peso}_{\text{Final}}}{\text{Peso}_{\text{Inicial}}} \cdot 100 \% \quad \dots \text{ ecuación 2.2}$$

Se expresa en porcentaje

Si el denominador es $\text{Peso}_{\text{Inicial}}$, se habla de humedad en base húmeda

Si el denominador es $\text{Peso}_{\text{Final}}$, se habla de humedad en base seca

Fuente: <http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/residuos.html>

Densidad. La densidad de los sólidos depende de su constitución y humedad, porque este valor se debe medir para tener un valor más real. Se deben distinguir valores en distintas etapas del manejo.

Densidad suelta: Generalmente se asocia con la densidad en el origen. Depende de la composición de los residuos.

Densidad de transporte: Depende de si el camión es compactador o no y del tipo de residuos transportados.

Densidad del residuo dispuesto en relleno: Se debe distinguir entre la densidad recién dispuesta la basura y la densidad después de asentado y estabilizado el sitio.

Calor específico. Se define como la cantidad de calor que puede entregar un cuerpo. Se mide en unidades de energía por masa, [*cal/g*], [*kcal/kg*]. Se mide utilizando un calorímetro.

También se puede conocer a través de un cálculo teórico, el cual consiste en buscar valores típicos de calor específico por componentes y se combina con el conocimiento de la composición de los residuos.

2.3 ALMACENAMIENTO

Debido a que los residuos generados no se pueden eliminar de inmediato, se requiere de un tiempo, un depósito y un lugar adecuado para almacenarlos mientras se espera a que sean evacuados o retirados.

El almacenamiento apropiado de los residuos tiene una influencia positiva en el manejo de los mismos. Por lo contrario, el almacenamiento inadecuado tiene efectos negativos dentro del sistema de generación integral de residuos sólidos municipales, debido a lo siguiente:

- El uso de recipientes de capacidad inadecuada (muy grandes o muy pequeños)
- El material utilizado en la fabricación de los recipientes es inadecuado
- No se separan los subproductos presentes en los residuos por uso y destino (residuos orgánicos, reciclables y restantes /sanitarios)

Lo anterior propicia que:

- Se incremente el tiempo de recolección
- Se provoquen lesiones al personal del servicio de recolección
- Se afecte la salud de la población al proliferar fauna nociva
- Existan limitaciones para impulsar el reúso, reciclaje y tratamiento de los subproductos generados

Una consideración importante en el almacenamiento *in situ* de residuos son los efectos del mismo almacenamiento sobre las características de los residuos que son almacenados. Estos efectos de almacenamiento incluyen:

- Descomposición microbiológica
- Absorción de fluidos
- Contaminación de los componentes de los residuos

Descomposición microbológica. Cuando se coloca comida y otros residuos en contenedores de almacenamiento *in situ*, casi inmediatamente comienzan a sufrir descomposición microbológica (a menudo llamada *putrefacción*), como resultado del crecimiento de bacterias y hongos, si se dejan los residuos en contenedores de almacenamiento durante largos períodos de tiempo, las moscas empiezan a reproducirse y pueden desarrollarse compuestos olorosos.

Absorción de fluidos. Como los componentes que conforman los residuos sólidos tienen diferentes contenidos iniciales de humedad, se produce un equilibrio mientras los residuos permanecen almacenados *in situ* en contenedores. Cuando los residuos mezclados son almacenados juntos, el papel absorbe la humedad de los residuos de comida y de los recortes frescos de jardín.

El grado de absorción que se produce depende del tiempo durante el que los residuos permanecen almacenados hasta su recolección. Si se dejan los residuos durante más de una semana en contenedores cerrados, la humedad se distribuirá a través de los residuos. Si no se utilizan tapas a prueba de agua, los residuos también absorberán el agua de lluvia que entra en los contenedores parcialmente cubiertos. La saturación de los residuos hasta su capacidad de campo es un hecho común en las zonas tropicales donde llueve la mayoría de los días.

Contaminación de los componentes de los residuos. Quizás el efecto más grave del almacenamiento *in situ* de los residuos es la contaminación que produce. Se pueden contaminar los componentes más importantes de los residuos con pequeñas cantidades de residuos, tales como aceite de motor, productos de limpieza de la casa y pinturas. El efecto de esta contaminación es que se reduce el valor de los componentes individuales para el reciclaje. Aunque la contaminación que se produce durante el almacenamiento *in situ* disminuye el valor de los componentes individuales de los residuos, también se puede argumentar que esta contaminación es beneficiosa respecto a la evacuación de estos residuos en un relleno. Es decir, se reducen considerablemente las concentraciones de los contaminantes individuales cuando los componentes de residuos contaminados son extendidos y compactados para su vertido.

- **Tipos de contenedores**

En gran parte, los tipos y las capacidades de los contenedores utilizados dependen de las características y tipos de residuos sólidos que hay que recoger, del tipo de sistema de recolección utilizando, de la frecuencia de la recolección, y del espacio disponible para poner los contenedores.

Viviendas de baja altura con servicio manual de recolección de residuos en acera. Como los residuos sólidos se recogen manualmente en la acera para la mayoría de las viviendas residenciales aisladas y de baja altura, los contenedores deben ser suficientemente ligeros como para ser manipulados por un solo recogedor cuando están llenos. Generalmente el límite de peso superior debería estar entre 18 y 30 *kg*.

Viviendas de baja altura con servicio mecanizado de recolección en acera. Cuando se utilizan sistemas mecanizados de recolección, el contenedor utilizado para el almacenamiento *in situ* de residuos es una parte integral del sistema de recolección.

Bloques de viviendas de baja y mediana altura. En complejos de viviendas de baja altura se han utilizado varios contenedores de almacenamiento. Los dos tipos más comunes:

- contenedores individuales de plástico o metal galvanizado
- grandes contenedores portátiles o fijos

Cuando los bloques de viviendas están agrupados, los contenedores asignados a cada vivienda a menudo se localizan en una zona común. En la mayoría de los casos los contenedores se equipan con ruedas o rodillos para que se puedan mover fácilmente en el momento de ser vaciados en los vehículos de recolección o en los equipos *in situ* de procesamiento. Los contenedores utilizados para los materiales reciclables dependen de los tipos de residuos que son separados y del tipo de sistema de recolección de residuos utilizados.

Lugares para almacenamiento de contenedores.

Los lugares para el almacenamiento de contenedores dependen del tipo de vivienda o instalación comercial e industrial, del espacio disponible, y del acceso a los servicios de recolección.

Viviendas residenciales. Para la recolección en viviendas aisladas, normalmente, se colocan los contenedores utilizados:

- al lado o cerca de la casa
- en callejones
- dentro o al lado del garaje

Instalaciones comerciales e industriales. La localización de los contenedores en instalaciones de comercio e industria ya existentes depende espacio disponible, y de las condiciones de acceso-servicio.

Salud pública y estética. Aunque los residuos sólidos domésticos representan una proporción relativamente pequeña de los residuos totales generados, quizás son los más importantes, puesto que se generan en zonas con un espacio limitado para el almacenamiento.

Por esta razón pueden tener impactos importantes sobre la salud pública y la estética. Normalmente la higiene correcta implica el uso de contenedores con tapas ajustadas, lavar los contenedores y la zona de almacenamiento periódicamente, y la separación periódica de los materiales biodegradables, lo que es de especial importancia en zonas de clima templado.

Las condiciones estéticas están relacionadas con la producción de olores y con las condiciones repugnantes que pueden desarrollarse cuando no se presta la atención adecuada al mantenimiento de las condiciones de higiene.

2.4 RECOLECCIÓN

El término *recolección*, incluye no solamente la toma de los residuos sólidos de diversos orígenes, sino también el transporte de estos residuos hasta el lugar donde los vehículos de recolección se vacían. La descarga del vehículo recolector también se considera como parte de la operación.

La recolección es la etapa más importante en términos de costos dentro de la gestión de los residuos, esta la realizan en general cuadrillas de hombres con equipos que consisten en camiones de diversas características.

Diseño básico de cuadrilla

El diseño óptimo es una combinación de aspectos económicos y sanitarios, véase Figura 2.1

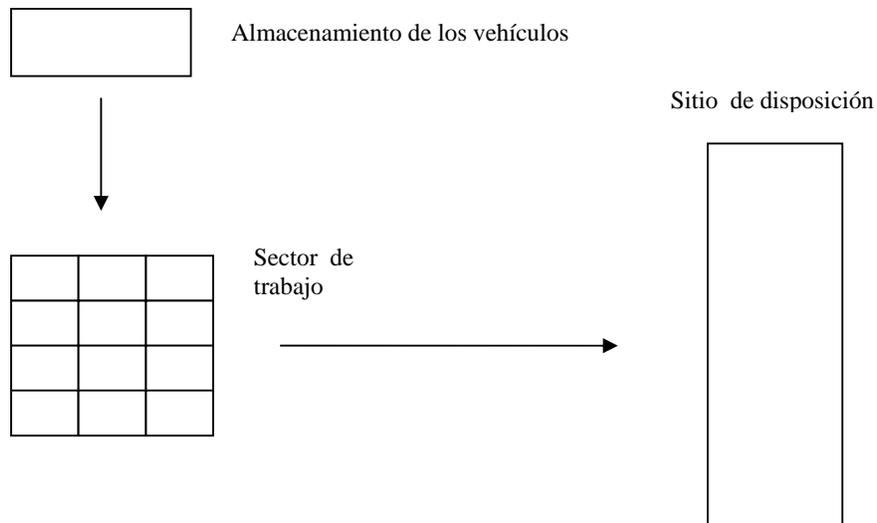


Figura 2.1 Movimiento de vehículos de recolección

Fuente: <http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/residuos.html>

Los datos básicos para el diseño se muestran en el Cuadro 2.4

Cuadro 2.4 Datos básicos para el diseño de una cuadrilla

Descripción	Unidad	Nombre
Capacidad de camión	<i>t</i>	C
Frecuencia de recolección	<i>Veces por semana</i>	f
Número de recolección	<i>No. de hombres</i>	a
Rendimiento de recolección	<i>Hombres * min / t</i>	R
Tiempo disponible (jornada de trabajo)	<i>min</i>	Td
Distancia a disposición final	<i>km</i>	d
Tiempo en sitio de disposición final	<i>min</i>	Ts
Tiempo fuera ruta cíclicos	<i>min</i>	Tfc
Tiempo fuera ruta no cíclicos	<i>min</i>	Tfnc
Velocidades	<i>km/h km/min</i>	v

Fuente: <http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/residuos.html>

Los datos básicos de diseño pueden determinarse utilizando las ecuaciones que se presentan a continuación:

$$N^{\circ} \text{ Viajes} = \frac{Td}{\text{Tiempo 1 ciclo}} \quad \dots \text{ ecuación 2.3}$$

$$N^{\circ} \text{ Viajes} = \frac{Td - Tfnc}{T_{\text{recolección}} + T_{\text{transporte}} + T_{\text{disposición}} + Tfc} \quad \dots \text{ ecuación 2.4}$$

$$T_{\text{recolección}} = \frac{C \cdot R}{a} \quad \dots \text{ ecuación 2.5}$$

$$T_{\text{transporte}} = \frac{d}{v} \quad \dots \text{ ecuación 2.6}$$

$$T_{\text{disposición}} = Ts \quad \dots \text{ ecuación 2.7}$$

$$N^{\circ} \text{ camiones} = \frac{\text{Producción Total Residuos}}{N^{\circ} \text{ Viajes} \cdot C} \quad \dots \text{ ecuación 2.8}$$

Fuente: <http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/residuos.html>

El sistema de recolección más satisfactorio que pueda proporcionarse a la población resultará después de un estudio cuidadoso en donde inciden numerosos factores como:

- Tipo de residuo producido y cantidad
- Característica topográfica de la ciudad
- Clima
- Zonificación urbana
- Frecuencia de recolección
- Tipo de equipo
- Extensión del recorrido
- Localización de la basura
- Organización de las cuadrillas
- Rendimiento de las cuadrillas
- Responsabilidades

El punto de recolección más adecuado es la recolección en la acera, porque reduce el tiempo necesario para cada servicio. La recolección de residuos se realiza generalmente de día en las zonas residenciales y durante la noche en las zonas comerciales de las grandes ciudades, para evitar problemas con el tráfico.

Los principales tipos de servicios de recolección utilizados actualmente para los residuos, no seleccionados y separados, se presentan a continuación.

Recolección de residuos no seleccionados. La recolección de residuos de viviendas aisladas en bloques de viviendas de mediana altura, viviendas elevadas y de instalaciones comerciales/industriales se presenta a continuación.

De viviendas aisladas de baja altura. Entre los servicios de recolección domésticos más comunes para las viviendas aisladas de baja altura, se encuentran:

- *De acera.* En el cual el propietario de la casa es el responsable de colocar en la acera los contenedores que hay que vaciar el día de recolección y devolverlos vacíos a su lugar de almacenamiento hasta el siguiente día de servicio.
- *De campaneó.* En este, el propietario es el responsable de sacar los contenedores en el momento en el que el servicio de recolección pasa.

De bloques de viviendas de baja y mediana altura. El servicio de recolección en acera es común para la mayoría de los bloques de viviendas de baja y mediana altura. Cuando se utilizan grandes contenedores, se vacían los contenedores mecánicamente utilizando vehículos de recolección equipados con mecanismos de descarga.

De bloques de viviendas elevadas. Normalmente se utilizan grandes contenedores para recoger residuos de bloques de viviendas elevadas.

De instalaciones comerciales/industriales. Para recolectar los residuos de instalaciones comerciales e industriales se utilizan medios manuales y mecánicos, para evitar la congestión de tráfico.

Recolección de residuos sólidos en el país. La cobertura en población servida promedio a nivel nacional se estima en 83%. Para las zonas metropolitanas se ha calculado en 95%, mientras que para ciudades medias entre el 75 y 85%. En áreas urbanas pequeñas se ubica entre el 60 y 80%. Los métodos más utilizados son: el de campaneo o de sacar los residuos, parada en esquina y el de acera. La recolección por lo general se realiza en dos turnos y ocupa entre 2 y 5 trabajadores por camión incluyendo chofer, macheteros y voluntarios (pre-pepenadores), esto depende de factores como la generación por zona o sector, la concentración urbana, el grado de dificultad de la ruta así como las condiciones climáticas y topográficas de la localidad y sobre todo de las actividades de pre-pepena. En promedio cada machetero (personal destinado a actividades exclusivas de recolección), recolecta entre 3 a 6.9 *t/turno*. Los equipos más utilizados son los camiones compactadores con capacidad de 13 a 15.3 *m³*, con los cuales se recolectan de 5.8 a 6.9 *t/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 *t/viaje*, con capacidad de carga y potencia subutilizadas, ya que puede ser de 9 a 12 *t*; y consecuentemente mayores costos de consumos y operación, así como, mayor esfuerzo de los macheteros y por lo tanto baja eficiencia. La mayoría de los camiones tienen un ámbito de operación entre 8 y 12 años, lo cual sobrepasa la vida útil de los mismos (estimada en siete años). En general el 25% de la flotilla de camiones se encuentra en buen estado, el 50% en regulares condiciones y el resto en muy malas condiciones de operación. La falta de mantenimiento preventivo en muchos municipios del país mantiene en condiciones críticas el parque vehicular. En la gran mayoría de los municipios es recurrente la pre-pepena de materiales de mayor valor comercial, tales como el aluminio, vidrio y cartón, además del cobro informal ("propina") al usuario. Los costos de recolección representan el 95% de los costos totales del servicio cuando este no incluye los procesos de transferencia o disposición final controlada. El Cuadro 2.5 presenta la distribución de costos en las etapas del ciclo de residuos sólidos.

Cuadro 2.5 Porcentajes de distribución de los costos en los diferentes procesos

	Tiradero a cielo abierto	Relleno sanitario	Relleno sanitario con transferencia	
			México	EUA
			México	EUA
Recolección Barrido	95%	82%	53%	64%
Transferencia	0	0	29%	14%
Disposición Final	5%	18%	18%	22%
Total	100%	100%	100%	100%

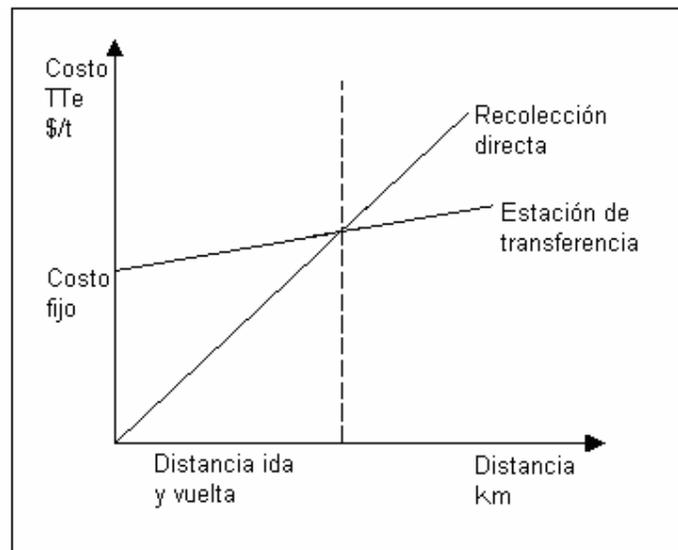
Fuente: <http://www.fundacion-ica.org.mx>

2.5 TRANSFERENCIA

El transporte de los residuos se vuelve antieconómico si los residuos son trasladados a distancias muy grandes.

El uso de estaciones de transferencia se ha constituido en una alternativa económica para áreas urbanas donde se generan grandes cantidades de residuos y en que las distancias a los centros de procesos de residuos son importantes. Se aplica el término estación de transferencia a las instalaciones en donde se hace el traslado de basura de un vehículo recolector a otro vehículo con mucha mayor capacidad de carga. Este segundo vehículo, o transporte suplementario, es el que traslada los residuos hasta su destino final. Se puede utilizar vehículos por carreteras, barco o tren.

El análisis económico simplificado se presenta en la Gráfica 2.1.



Gráfica 2.1 Análisis económico

Fuente: <http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/residuos.html>

Expresado el costo en términos de $[\$/t/km]$ se tienen las siguientes expresiones del tipo:

$$\text{Recolección Directa} = C_1 \cdot D$$

$$\text{Estación} = C_2 \cdot D + K$$

en donde:

$$C_1 \text{ y } C_2 = \text{Constantes respectivas, en } \frac{\$}{t \cdot km}$$

D = Distancia en *km*

K = Constante, equivalente a costos fijos, \$

Ventajas de una estación de transferencia: Economía, el vehículo de recolección prolonga su vida útil, utilización de menos personal.

Desventajas: Oposición para la localización, difícil ampliación y menos flexibilidad.

Componentes mínimos de una estación de transferencia:

- Entrada con zona de amortiguamiento
- Báscula
- Plataforma de recepción
- Pozo de almacenamiento
- Equipo para mover residuos a los transfers
- Equipos de compactación, generalmente compactadores estacionarios
- Sistema de captación y tratamiento de aguas
- Oficinas, etc.

Tipos de estaciones de transferencia. Se utilizan las estaciones de transferencia para transferir residuos sólidos desde los vehículos de recolección y otros vehículos pequeños a equipos de transporte más grandes. Según el método utilizado para cargar los vehículos de transporte, se pueden clasificar las estaciones de transferencia en tres tipos generales:

- Carga directa
- Almacenamiento y carga
- Combinadas carga directa y descarga-carga

Las estaciones de transferencia pueden clasificarse también según su capacidad de rendimiento (cantidad de material que se puede transferir y transportar) de la forma siguiente:

- Bajo, menos de 100 *t/d*
- Medio, entre 100 y 500 *t/d*
- Alto, más de 500 *t/d*

Estaciones de transferencia de carga directa. En las estaciones de transferencia de carga directa los residuos en vehículos de recolección se vacían directamente en el vehículo utilizado para transportarlos a un lugar de evacuación final, o en instalaciones para compactar residuos en vehículos de transporte o en balas de residuos que se transportan al lugar de evacuación. Estas se pueden clasificar en:

- Estación de transferencia de carga directa de gran capacidad sin compactación
- Estaciones de transferencia de carga directa de gran capacidad con compactadoras
- Estaciones de transferencia carga directa con capacidad media y pequeña con compactadora

- Estaciones de transferencia de carga directa de baja capacidad utilizadas en zonas rurales

Estación de transferencia de almacenamiento y carga. En este tipo de estación, se vacían los residuos directamente en una fosa de almacenamiento desde la cual son cargados en vehículos de transporte mediante diversos tipos de equipamientos auxiliares. La diferencia entre estaciones de transferencia de carga directa, y de almacenamiento y carga consiste en que estas últimas están diseñadas con capacidad para almacenar residuos (normalmente de 1 a 3 *d*) y su clasificación puede ser:

- Estación de transferencia de almacenamiento y carga de gran capacidad sin compactación.
- Estación de transferencia de almacenamiento-carga de capacidad media con instalaciones de procesamiento y compactación.

Estación de transferencia combinada de carga directa y descarga-carga. Normalmente son instalaciones polivalentes que sirven a una gama más amplia de usuarios que una instalación de una sola función.

Requisitos ambientales de las estaciones de transferencia. Mediante una correcta construcción y operación se pueden minimizar los impactos ambientales de las estaciones de transferencia. La mayoría de las estaciones de transferencia están cerradas y construidas con materiales de fácil mantenimiento y limpieza. Para eliminar emisiones accidentales, las instalaciones cerradas deberían tener equipamiento para tratar el aire que crea una presión negativa dentro de la instalación. En la mayoría de los casos, se utiliza una construcción a prueba de fuegos para las estaciones de transferencia de carga directa con zonas de carga abierta. Hay que dar una atención especial al problema de vuelo de papeles. Frecuentemente se utilizan pantallas contra el viento u otras barreras. La mejor forma de mantener las condiciones sanitarias globales de una estación de transferencia consiste en controlar la operación continuamente. Se deberían recoger inmediatamente los residuos sólidos caídos, o en cualquier caso no se deberían dejar acumular durante más de 1 o 2 *h*.

Localización de estaciones de transferencia.

Preferentemente, las estaciones de transferencia deberían localizarse:

- Tan cerca como sea posible del centro de gravedad de las zonas individuales de producción de residuos sólidos que se van a servir
- Con fácil acceso a carreteras arteriales importantes, así como cerca de medios de transporte secundarios o suplementarios
- Donde haya una mínima objeción ambiental a las operaciones de transferencia
- Donde la construcción y el almacenamiento sea lo más económico posible

Estaciones de transferencia en el país. Las grandes distancias que existen entre los centros geográficos de las poblaciones a los sitios de disposición final, han obligado a los municipios al uso creciente de estaciones de transferencia. Esta situación comienza a presentarse con mayor frecuencia en las poblaciones medias del país que presentan actividades económicas importantes, ya que esto trae de igual forma el crecimiento de

los asentamientos humanos en las periferias de las ciudades y con ello la difícil tarea de localizar sitios para disposición final cercanos al centro de población.

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

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

Las capacidades de las cajas de transferencia varían de 40 a 70 m^3 , por lo que en ellas se puede transportar entre 10 y 30 *t* de residuos si se considera un peso volumétrico de 250 kg/m^3 . 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., Tapatitlán, Jal., San Luis Potosí, SLP, Cd. del Carmen, Camp., Guadalupe, NL, y el DF, cuentan con este tipo de instalaciones.

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

2.6 TRATAMIENTO

Al proceso de transformación física, química o biológica de los residuos sólidos municipales que procura obtener beneficios sanitarios o económicos, reduciendo o eliminando sus efectos nocivos al hombre y al medio ambiente se le denomina tratamiento de los residuos sólidos municipales. Básicamente existen tres tipos de tratamiento:

- Mecánico
- Biológico y
- Térmico

Tratamiento biológico. El tratamiento biológico se enfoca básicamente a los residuos orgánicos, como los alimentos y los residuos de jardín.

La fracción orgánica varía significativamente entre zonas geográficas y estaciones del año. El seleccionar los residuos orgánicos dentro de una estrategia integral tiene varios beneficios, el más importante consiste en la reducción de los volúmenes generados y la estabilización de los materiales, además, se pueden transformar en un producto útil (composta) o en alimento para animales, se incrementa el valor de los otros residuos y se reduce la cantidad de biogas y lixiviado generado en los rellenos sanitarios.

Tratamiento térmico. El procesamiento térmico de los residuos sólidos puede definirse como la conversión de los residuos sólidos en productos de conversión gaseosos, líquidos o sólidos, con la simultánea o subsiguiente emisión de energía en forma de calor.

Tratamiento de residuos sólidos en nuestro país. Los procesos de incineración y producción de composta en el ámbito municipal en nuestro país no han tenido el resultado esperado. Cuatro municipios han comprado plantas para producir composta (Guadalajara, Monterrey, Oaxaca y D.F.) y han cesado sus operaciones por falta de mercado, altos costos de operación y mala calidad del producto terminado. No obstante, algunas compañías siguen experimentando para mejorar el proceso, incluyendo únicamente residuos de jardinería y lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales.

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

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

En el Cuadro 2.6 se muestra las tendencias mundiales de los diferentes procesos de tratamiento y la disposición final en el mundo.

Cuadro 2.6 Tendencias mundiales de diferentes tratamientos (valores en %)

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

Fuente: <http://www.fundacion-ica.org.mx>

2.7 DISPOSICIÓN FINAL

La disposición final es la última etapa del manejo integral de los residuos sólidos municipales y está íntimamente relacionada con la preservación del ambiente, así como de la salud de la población. Después que el residuo ha sido tratado se encuentra listo para su disposición. La forma y tipo del residuo determina en gran parte donde será permitida la disposición.

Un limitado grupo de residuos puede ser dispuesto por inyección a pozos profundos y en descargas submarinas a océanos, muchos residuos gaseosos son dispuestos en la atmósfera.

No obstante, que se tiene la plena conciencia de la importancia que reviste el mantener una adecuada disposición final de los residuos sólidos municipales, en la actualidad aún prevalece la práctica del “tiradero a cielo abierto” en la mayoría de las ciudades de nuestro país. Tal práctica consiste en el depósito incontrolado de residuos sólidos directamente en el suelo, provocando la contaminación del aire, agua y suelo, así como generando problemas de salud pública y marginación social. El Cuadro 2.7 es una comparación de las prácticas de disposición final.

Dentro de las alternativas viables para la disposición final de los residuos sólidos municipales, y conforme a las condiciones actuales del país, se cuenta con el método de relleno sanitario.

El relleno sanitario es el método empleado para la correcta disposición de los residuos, por lo que como toda obra de ingeniería éste tiene que ser planeado y diseñado previamente para asegurar su correcta construcción y operación.

Cuadro 2.7 Comparación de las prácticas de disposición final

CLASIFICACIÓN	TIRADERO A CIELO ABIERTO	RELLENO SANITARIO
CONTROL	NO	SI
DISEÑO	NO	SI
INFORMACIÓN DEL RESIDUO	NO	SI
LÍMITES	NO	SI
IMPERMEABILIZACIÓN Y RECUBRIMIENTO	NO	SI
EXISTENCIA DE PROTECCIÓN	NO	SI

Fuente: <http://www.fundacion-ica.org.mx>

Los beneficios que ofrece un relleno sanitario son:

- Resuelve el problema ambiental de la disposición final de los residuos sólidos municipales.
- Fomenta la participación de la comunidad en la solución integral de sus problemas sanitarios y ambientales.
- Contribuye al desarrollo socioeconómico de la localidad, mediante la generación de empleos.
- Contribuyen a mejorar la salud y el ecosistema, mediante la creación de áreas verdes para la recreación. Mejoramiento del paisaje y la calidad ambiental.

2.8 DISPOSICIÓN FINAL EN EL PAÍS

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

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

En la frontera norte del país, se estima una generación de 199,000 *t/mes*, de las cuales se recolecta aproximadamente el 73%. De esta generación, solo el 67.9% se deposita en rellenos sanitarios como son: Tijuana, Nogales, Cd. Juárez, y Nuevo Laredo entre otros, lo que significa que 64,000 *t/mes*, permanecen en tiraderos a cielo abierto.

Las 84,200 *t/d* de basura que se producen en el país, requerirían 112,250 *m³/d* para depositarlas. Esto da una idea de la necesidad de terreno y de la importancia de diseñar estrategias para su manejo integral, que incluyan acciones como la de reducir la cantidad de basura desde la fuente.

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

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

En el Cuadro 2.8 se presentan algunos municipios que cuentan con rellenos sanitarios con eficientes sistemas de administración y operación.

Cuadro 2.8 Municipios del país que cuentan con rellenos sanitarios

LOCALIDAD
1.- Aguascalientes, Ags.
2.- Tijuana, B.C.
3.- Piedras Negras, Coah.
4.- Sabinas, Coah.
5.- Saltillo, Coah.
6.- Armería, Col.
7.- Cd. Juárez, Chih.
8.- Chihuahua, Chih.
9.- Ojinaga, Chih.
10.- Durango, Dgo.
11.- Bordo poniente, D.F.
12.- Tlalnepantla, Méx.
13.- Cautla-Oaxtepec, Mor.
14.- ZM de Monterrey, N.L.
15.- Linares, N.L.
16.- Puebla, Pue.
17.- Cancún, Q.Roo.
18.- Tequixquiapan, Qro.
19.- Querétaro, Qro.
20.- San Juan Del Río, Qro.
21.- San Luis Potosí, S.L.P.
22.- Culiacán, Sin.
23.- Los Mochis, Sin.
24.- Puerto Peñasco, Son.
25.- Agua Prieta, Son.
26.- Hermosillo, Son.
27.- Nogales, Son.
28.- Cd. Victoria, Tam.
29.- Matamoros, Tam.
30.- Nuevo Laredo, Tam.
31.- Río Bravo, Tam.
32.- Calpulalpan, Tlax.
33.- Acuamanala Miguel Hidalgo, Tlax.
34.- Santa Ana Chiautempan, Tlax.
35.- Tlaxcala, Tlax.
36.- Orizaba, Ver.
37.- Mérida, Yuc.

Fuente: <http://www.fundacion-ica.org.mx>

III. DISEÑO DEL RELLENO SANITARIO

3.1 DEFINICIÓN DE RELLENO SANITARIO

Un relleno sanitario es una obra de ingeniería destinada a la disposición final de los residuos sólidos municipales, los cuales se disponen en el suelo, en condiciones controladas para minimizar los efectos adversos sobre el medio ambiente y el riesgo para la salud de la población.

Esta obra de ingeniería consiste en preparar un terreno, colocando los residuos y extendiéndolos en capas bien compactadas, reduciendo su volumen al mínimo y cubriendo los residuos así depositados con una capa de suelo con la frecuencia necesaria, por lo menos al final de cada jornada. Es un sistema de tratamiento y, a la vez disposición final de residuos sólidos en donde se establecen condiciones para que la actividad microbiana sea de tipo anaerobio (ausencia de oxígeno).

Requerimientos generales de los rellenos sanitarios

- El sitio debe tener espacio suficiente para almacenar los residuos generados por el área servida en el plazo definido por el diseño. Debe ser diseñado y operado de forma tal que la salud de la población y las condiciones ambientales sean garantizadas.
- Debe minimizarse el riesgo de fuego, derrames y otros accidentes operacionales en los alrededores.
- El acceso al sitio debe minimizar el impacto en el flujo vehicular.

3.2 TIPOS DE RELLENOS

El parámetro básico de diseño de un relleno es el volumen. El volumen de residuos que puede ser dispuesto en un relleno sanitario depende del área disponible, la profundidad a la cual los residuos serán depositados, y el espesor de material de cobertura y residuo. Debido a que la tasa de generación de residuos es usualmente definida en unidades másicas un parámetro adicional que afecta la capacidad del relleno es la densidad in situ de la basura y el material de cobertura.

Método de trinchera o zanja

Este método se utiliza en regiones planas y consiste en excavar periódicamente zanjas de dos a tres metros de profundidad, con el apoyo de una retroexcavadora o tractor oruga. Existen incluso experiencias de excavación de trincheras de hasta 7 m de profundidad para relleno sanitario.

La tierra se extrae y se coloca a un lado de la zanja para utilizarla como material de cobertura. Los desechos sólidos se depositan y acomodan dentro de la trinchera para luego compactarlos y cubrirlos con tierra.

La excavación de zanjas exige condiciones favorables tanto en lo que respecta a la profundidad del nivel freático como al tipo de suelo. Los terrenos con nivel freático alto o muy próximo a la superficie no son apropiados por el riesgo de contaminar el acuífero. Los terrenos rocosos tampoco lo son debido a las dificultades de excavación. La Figura 3.1 presenta un esquema detallado del método de trinchera.

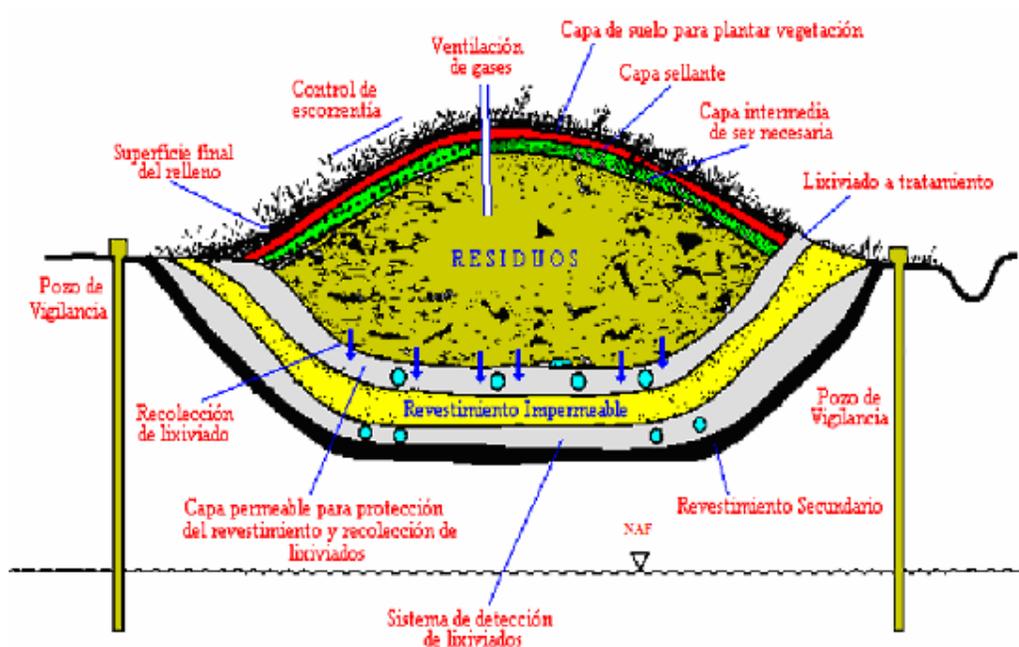


Figura 3.1 Método de Trinchera

Fuente: <http://www.cepis.org>

Método de área

Este método se lleva a cabo en áreas relativamente planas, donde no sea posible excavar fosas o trincheras para enterrar las basuras, estas pueden depositarse directamente sobre el suelo original, elevando el nivel algunos metros. En estos casos, el material de cobertura deberá ser importado de otros sitios o, de ser posible, extraído de la capa superficial. En ambas condiciones, las primeras celdas se construyen estableciendo una pendiente suave para evitar deslizamientos y lograr una mayor estabilidad a medida que se eleva el terreno. Se adapta también para rellenar depresiones naturales o canteras abandonadas de algunos metros de profundidad. El material de cobertura se excava en las laderas del terreno, o en su defecto se debe procurar lo más cerca posible para evitar el encarecimiento de los costos de transporte. La operación de descarga y construcción de las celdas debe iniciarse desde el fondo hacia arriba, como se muestra en la Figura 3.2.

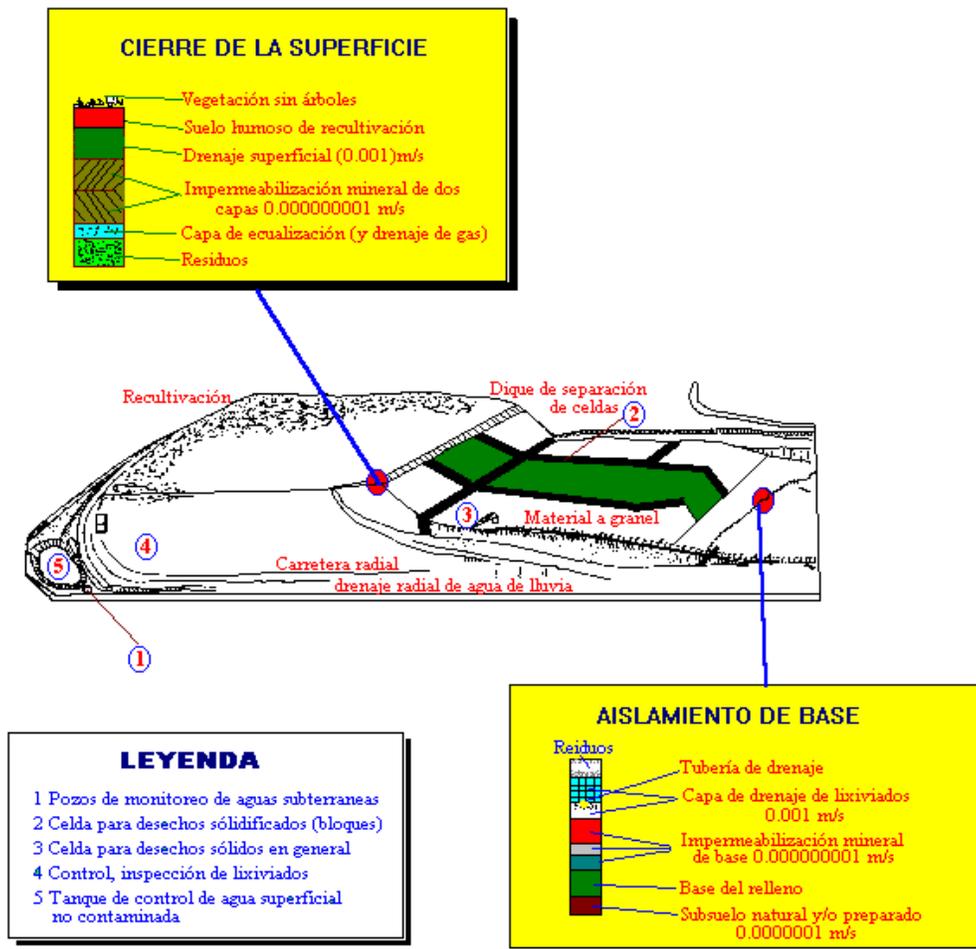


Figura 3.2 Método de área

Fuente: <http://www.cepis.org>

Clasificación de rellenos sanitarios según la clase de residuo sólido depositado

- *Tradicional con residuos sólidos urbanos seleccionados:* No acepta ningún tipo de residuo de origen industrial, ni tampoco lodos.
- *Tradicional con residuos sólidos urbanos no seleccionados:* Acepta además de los residuos típicos urbanos, industriales no peligrosos y lodos previamente acondicionados
- *Rellenos para residuos triturados:* Recibe exclusivamente residuos triturados, aumenta vida útil del relleno y disminuye el material de cobertura.
- *Rellenos de seguridad:* Recibe residuos que por sus características deben ser confinados con estrictas medidas de seguridad.
- *Relleno para residuos específicos:* Son rellenos que se construyen para recibir residuos específicos.
- *Rellenos para residuos de construcción:* Son rellenos que se hacen con materiales inertes y que son residuos de la construcción de viviendas u otra.

3.3 SELECCIÓN DEL SITIO

Un relleno sanitario debe cumplir algunas condiciones de diseño como son: de localización, geotécnicos y algo muy importante, ser aceptado por el público.

Usualmente se indica un radio de proyecto que será la distancia máxima que el sistema de recolección utilizará para acarrear los residuos, el radio dependerá de los recursos con que se cuente para el acarreo de los residuos, este es uno de los costos más altos en la operación del relleno, por eso es esencial mantener el costo tan bajo como sea posible, se debe empezar con un radio pequeño y agrandarlo si es necesario.

El costo de la operación del relleno sanitario y el costo del acarreo se tienen en cuenta mientras se desarrolla la región de acceso de servicio óptima.

Si más de un generador está envuelto (varias poblaciones dentro de un municipio) entonces se tiene un compromiso de tener una localización aceptable para todos los generadores de basura, y se usa el centro. Un sitio del relleno puede ser propiedad de un individuo, una compañía, o un cuerpo público (municipio).

La aceptación del público es crucial, debe informarse a los ciudadanos que serán afectados lo más pronto posible con respecto al proceso de selección de sitio, los criterios de localización deberán analizarse.

El Cuadro 3.1, presenta los factores a considerar en la selección de sitios para rellenos sanitarios.

Cuadro 3.1 Principales factores involucrados en la selección de sitios para rellenos sanitarios

<i>Crterios</i>	<i>Detalle</i>
Factibilidad técnica	<ol style="list-style-type: none"> 1. Volumen y morfología del sitio 2. Distancia a centro generador 3. Fuera de zonas de exclusión
Riesgo ambiental	<ol style="list-style-type: none"> 1. Contaminación de aguas subterráneas 2. Contaminación del suelo 3. Calidad del aire 4. Transporte de materiales
Aspectos económicos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Efectos en aspectos de propiedades 2. Costos de construcción y operación 3. Impacto en la industria local 4. Planes de compensación
Aspectos sociales	<ol style="list-style-type: none"> 1. Equidad en la selección del sitio 2. Efecto en la imagen de la comunidad 3. Paisaje y estética 4. Alteración de actuales y futuros usos de suelo
Aspectos políticos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Elecciones locales 2. Intereses de inversión de grupos locales 3. Responsabilidades de manejo del sitio 4. Control local

Fuente: <http://www.fortunecity.es/expertos/residuos.html>

Zonas de exclusión. Se entenderá como zona de exclusión cualquier zona, que por alguna característica, tanto humana, social, ecológica, política o económica no pueda ser considerada para la habilitación de un relleno sanitario. Los casos más típicos son los siguientes:

- *Distancias mínimas:* La distancia mínima del sitio de disposición a la residencia más cercana, pozo de suministro de agua, fuente de agua potable, hotel, restaurante, procesador de alimentos, colegios, iglesias o parques públicos debe ser a lo mínimo de 1.5 km.
- *Distancias a aeropuertos:* La distancia entre el aeropuerto comercial y el punto seleccionado es importante si en el relleno sanitario van a recibirse residuos de alimentos (tanto domiciliarios como de algún proceso industrial), pues estos pueden atraer pájaros en un radio de varios km. Si la operación del residuo es apropiada el problema puede ser aminorado. Se recomiendan distancias de 3 km, sin embargo, este valor puede ser reducido si es justificado.

- *Distancias a cursos de agua superficial:* La distancia entre el relleno sanitario y el curso de agua superficial más cercano debe ser a lo mínimo de 1 km. *Este parámetro dependerá fundamentalmente de las condiciones hidrogeológicas del sitio.*
- *Distancias a áreas inestables:* El sitio seleccionado debe estar a un mínimo de 100 m de áreas inestables (por ejemplo área de derrumbes) para asegurar la estabilidad estructural del sitio.
- *Distancias a áreas de exclusión:* El sitio debe estar localizado fuera de los límites de cualquiera área de exclusión delimitada por la autoridad correspondiente.

Investigación geotécnica. El propósito de este tipo de investigación, es principalmente obtener datos para estudiar los diferentes estratos del suelo en el sitio y preparar un mapa del agua subterránea.

Se necesita coleccionar muestras del suelo para determinar una estratigrafía del mismo. Las propiedades mecánicas (fuerza y características de consolidación) no son una gran preocupación en investigación del subsuelo para el relleno, aunque las características de consolidación deben estudiarse cuidadosamente. Se debe de estudiar la permeabilidad horizontal y vertical también.

Pueden existir diferencias de opinión con respecto al número total de perforaciones necesarias para definir la estratigrafía del suelo y el agua que condicione al sitio.

En la ausencia de requisitos específicos con respecto al número de perforaciones pueden seguirse las siguientes recomendaciones:

- Las perforaciones deben distribuirse de manera semejante que cubra una área por lo menos del 25% más grande que los límites propuestos.
- Deben hacerse 5 perforaciones por las primeras 2 ha por lo menos, y 2 perforaciones adicionales por cada hectárea adicional. Las perforaciones deben estar bien distribuidas sobre el área entera.
- Las perforaciones deben extenderse 7.5 m por lo menos debajo de la base propuesta del relleno.

Las perforaciones ayudan a identificar el tipo de suelo y profundidad del lecho de roca, y la profundidad y espesor del nivel del agua. En algunos sitios el lecho de roca o el acuífero pueden ser demasiado profundos, como se muestra en la Figura 3.3.

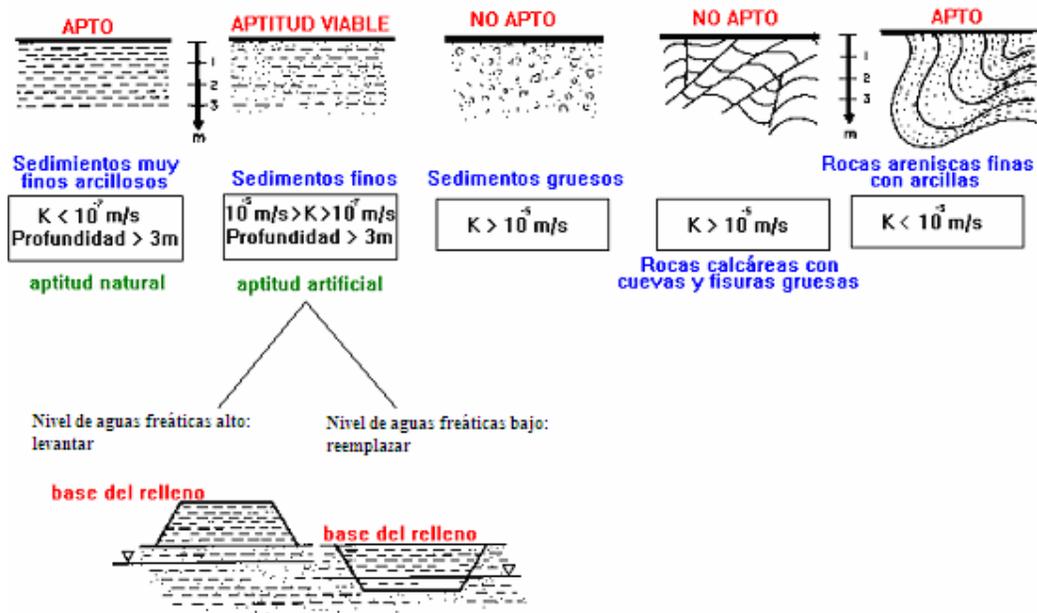


Figura 3.3 Aptitud de los diferentes tipos de suelos para la instalación de rellenos sanitarios

Fuente: <http://www.cepis.org>

Investigación de riesgo sísmico. Deben hacerse algunas investigaciones en el sitio sobre el impacto sísmico, los dos mecanismos que pueden causar daño a los rellenos son:

- el movimiento fuerte de la tierra y
- el desplazamiento debajo de la tierra

Para evitar erogaciones innecesarias en la investigación, así como disminuir el tiempo involucrado, se sugieren las siguientes consideraciones:

- revisión de los datos sísmicos publicados
- revisión de datos de exploración de superficie para determinar si existe alguna falla
- un estudio del reconocimiento geológico del área
- revisión de la región sismológica y la historia geológica
- pruebas de fallas recientes

Usualmente los primeros cuatro puntos son necesarios para recabar la información necesaria para saber si existe alguna falla, el paso 5 solo se utiliza cuando realmente se sabe que existe una falla.

El diseño del sitio de disposición final debe desarrollarse basado en el informe de investigación del subsuelo y el tipo de residuo.

3.4 SISTEMA PARA LA RECOLECCIÓN DE LIXIVIADOS O LÍQUIDOS PERCOLADOS

Los residuos, especialmente los orgánicos, al ser compactados por maquinaria pesada liberan agua y líquidos orgánicos, contenidos en su interior. Este líquido escurre hacia la base de la celda. La basura, que actúa en cierta medida como una esponja, recupera lentamente parte de estos líquidos al cesar la presión de la maquinaria, pero parte de él permanece en la base de la celda. Por otra parte, la descomposición anaerobia rápidamente comienza a actuar en un relleno sanitario, produciendo cambios en la materia orgánica, primero de sólidos a líquido y luego de líquido a gas, pero es la fase de licuefacción la que ayuda a incrementar el contenido de líquido en el relleno, y a la vez su potencial contaminante. En ese momento se puede considerar que los residuos están completamente saturados y cualquier agua, ya sea subterránea o superficial, que se infiltre en el relleno, lixiviará a través de los desechos arrastrando consigo sólidos en suspensión, y compuestos orgánicos en solución. Esta mezcla heterogénea, de un elevado potencial contaminante, es lo que se denomina lixiviados o líquidos percolados. El Cuadro 3.2 muestra la composición de los lixiviados en un relleno sanitario municipal.

Cuadro 3.2 Composición de líquidos percolados de un relleno sanitario con desechos domésticos

Componentes	Intervalo [mg/l]
Cloruros	100 - 400
Cobre	0 - 9
Fierro	50 - 600
Flúor	0 - 1
Cadmio	0 - 17
Cromo (VI)	2
Plomo	2
Sodio	200 - 2000
Sulfatos	100 - 1500
Nitratos	5.0 - 40
Dureza (CaCO ₃)	300 - 10000
DBO	2000 - 30000
DQO	3000 - 45000
pH	5.3 - 8.5

Fuente: <http://www.fortunecity.es/expertos/residuos.html>

Drenaje de lixiviados. Se requiere de un drenaje de lixiviados a través de un mecanismo de infiltración extendido sobre la superficie de la base del relleno. Debe consistir de piedras o arena con grava no soluble, preferiblemente mayor de 35 mm, y el espesor de la capa no debe ser menor de 30 cm. Asimismo, se deben instalar tuberías perforadas de drenaje de diámetro igual o mayor de 30 cm. Las tuberías deben estar en pendiente a una distancia equidistante de 10 m.

En la Figura 3.4 se presentan dos alternativas de drenaje de fondo.

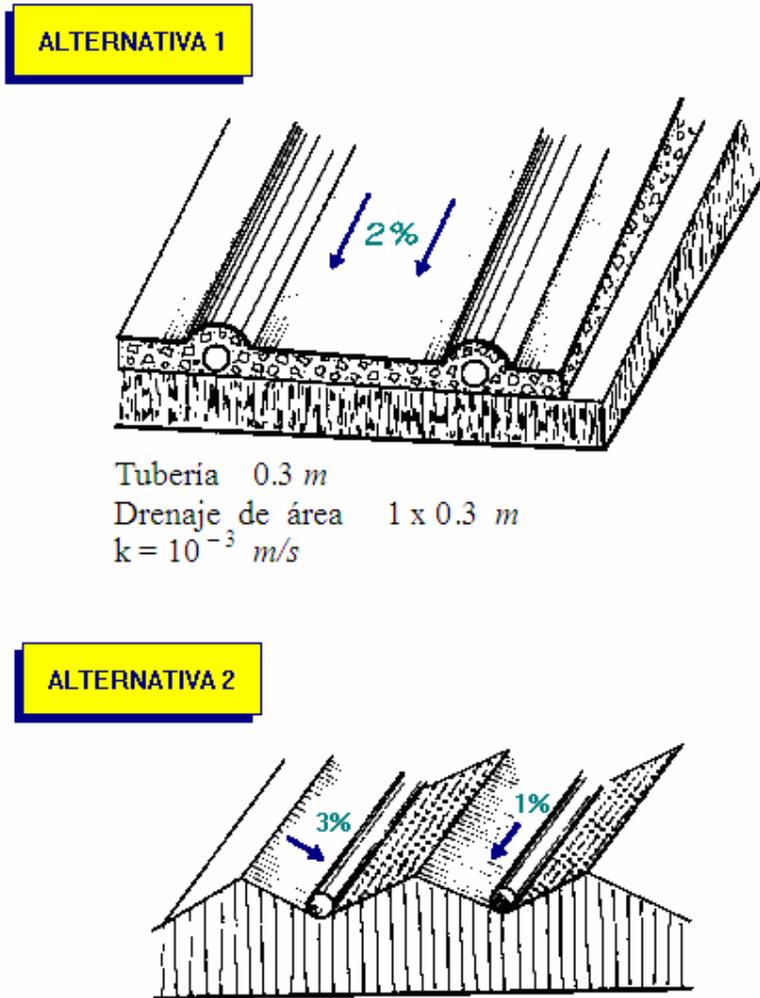


Figura 3.4 Drenaje de lixiviados

Fuente: <http://www.cepis.org>

La primera alternativa de la Figura 3.4 consta de una pendiente de 2% sobre toda la base del relleno, encima de la cual se instala la capa de drenaje con las tuberías corriendo paralelamente a la pendiente. La segunda requiere tan sólo una pendiente de 1% sobre toda la base del relleno. En este caso las tuberías se instalan sobre una superficie ondulada. Las tuberías se deben colocar en el punto más bajo de los cauces y deben

tener una pendiente de 3% hacia ellas. La selección de una de estas opciones dependerá principalmente de la pendiente del terreno.

Normalmente se usan dos tipos de tuberías, PVC y HDPE. Estas tuberías son consideradas como tubería flexible.

Asimismo, sobre la capa de drenaje se debe instalar una membrana mineral o sintética (es decir una geomembrana) que prevenga el ingreso de material suspendido y la consecuente saturación de la capa de drenaje.

El drenaje de los lixiviados al exterior del relleno debe instalarse en el punto más bajo del relleno. En este punto se debe instalar un sistema de triple seguridad (incluyendo material sintético) tal como se puede observar en la Figura 3.5.

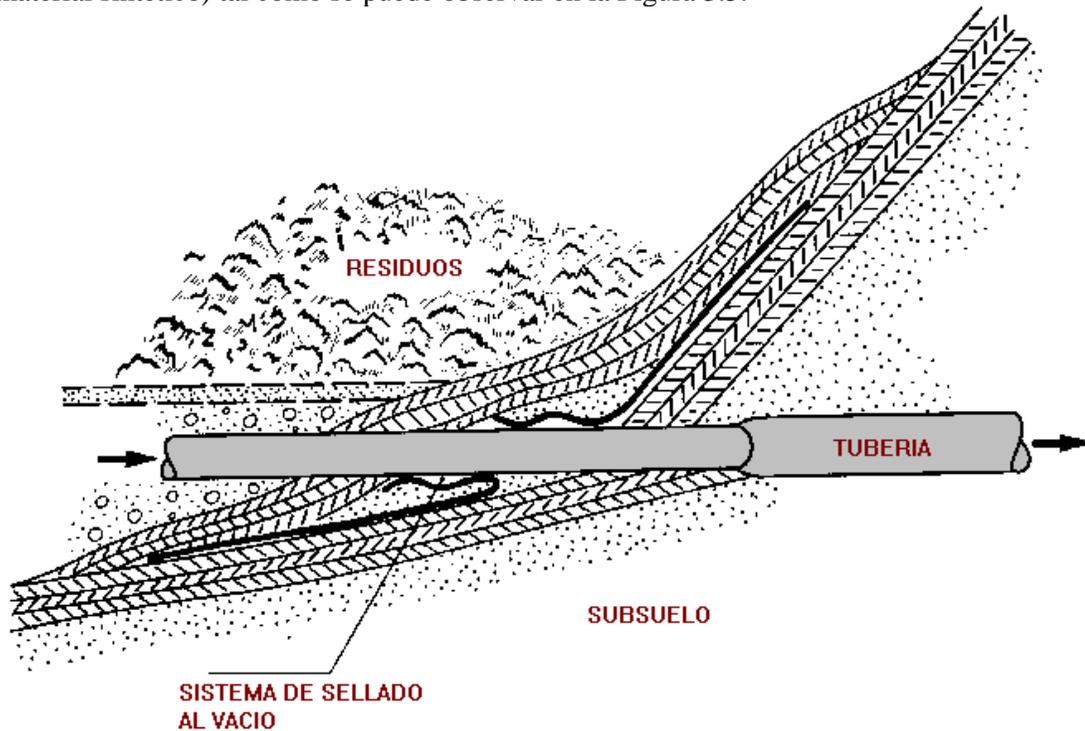


Figura 3.5 Drenaje de lixiviados al exterior del relleno

Fuente: <http://www.cepis.org>

Sistema de colección de lixiviados. El sistema de colección de lixiviados consiste en tuberías, una bomba de colección de lixiviados, estación de bombeo, y un tanque de almacenamiento.

El tanque de almacenamiento no es necesario para un sitio en el que los lixiviados se descargan directamente al drenaje.

Un sistema de colección de lixiviados puede fallar debido al mal funcionamiento de uno o más de los elementos del sistema. La tubería puede fallar debido a que pueden existir algunos crecimientos de organismos biológicos dentro de esta misma y así estorbar el paso de los lixiviados, y también puede fallar debido a que puede ser

aplastada por el peso de la maquinaria o por un diseño defectuoso; por lo tanto, se recomienda usar tubería de plástico debido a que esta se considera flexible.

En el caso de un diseño defectuoso podemos decir que en general, los lixiviados fluyen en una proporción de $0.5 - 1.0 \text{ cm}^3/\text{min}$, sin embargo, en algunos rellenos el flujo puede ser significativamente más alto, el tamaño de la tubería de colección puede ser insuficiente para manejar tales situaciones eficazmente.

La capacidad de la bomba debe calcularse cuidadosamente para las funciones apropiadas, se debe de escoger una bomba de succión ya que debe notarse que la densidad de los lixiviados es más alta que el agua, se usan bombas sumergibles normalmente automáticas en una estación de bombeo.

Si la estación de bombeo se construye fuera del relleno se debe de encajonar en arcilla o ser cubierta por membrana sintética para minimizar el potencial de goteo de los lixiviados en el suelo.

El volumen máximo de lixiviados esperado por un día debe usarse para estimar la capacidad del almacenamiento y la proporción de bombeado.

Los tanques de almacenamiento de lixiviados deben tener bastante volumen para contener los lixiviados por un periodo normalmente de 1 a 3 *d* durante la máxima producción de lixiviados en la estación. El volumen del tanque dependerá también de la frecuencia de bombeo de los lixiviados. Existen tanques de pared doble y de pared sencilla, los de pared sencilla, deben de ser supervisados por lo menos una vez al mes, para evitar que existan fugas y estas contaminen el suelo.

También pueden usarse tanques metálicos y no metálicos, los metálicos, deben protegerse de la corrosión, los tanques debe cubrirse con material conveniente para que los lixiviados no dañen el tanque.

3.5 SISTEMA DE DRENAJE PLUVIAL

Sobre las capas de impermeabilización, se debe colocar una de drenaje superficial para la captación de las aguas de lluvia de un espesor igual o mayor de 30 *cm* constituido de grava/arena con una permeabilidad (*K*) mayor o igual a $1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$. Esta capa debe estar conectada a un canal superficial perimetral de captación y recolección de las aguas superficiales.

Es importante estudiar la precipitación pluvial del lugar para prever las características de los drenajes y las obras que se vayan a necesitar a fin de atenuar la producción de lixiviado. Así, se evitará también la contaminación de las aguas, y se logrará definir las áreas de operación e instalaciones para los trabajadores. Las aguas de lluvias que caen sobre las áreas vecinas al relleno sanitario muchas veces escurren hasta éste, causando serias dificultades de operación. Interceptar y desviar el escurrimiento del agua de lluvias fuera del relleno sanitario, contribuye significativamente a reducir el volumen del líquido percolado y también a mejorar las condiciones de la operación.

Por lo tanto, es necesario construir *un canal en tierra o suelo-cemento* de forma trapezoidal, como el mostrado en la Figura 3.6, y dimensionarlo de acuerdo con las condiciones de precipitación local, área tributaria, características del suelo, vegetación y topografía.

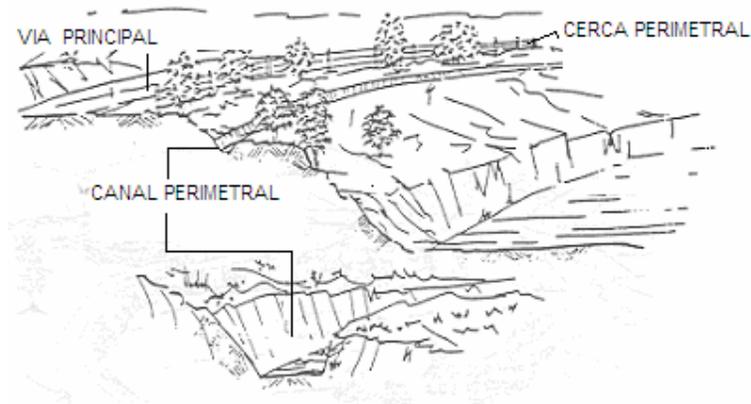


Figura 3.6 Sistema de drenaje pluvial

Fuente: <http://www.cepis.org>

Para una pequeña cuenca se recomienda usar un canal con las dimensiones que presenta la Figura 3.7. No obstante, si así lo estima el ingeniero y si debido a las características del lugar se requiere de mayor precisión, se puede calcular el caudal aportante mediante el *método racional* y las dimensiones del canal.

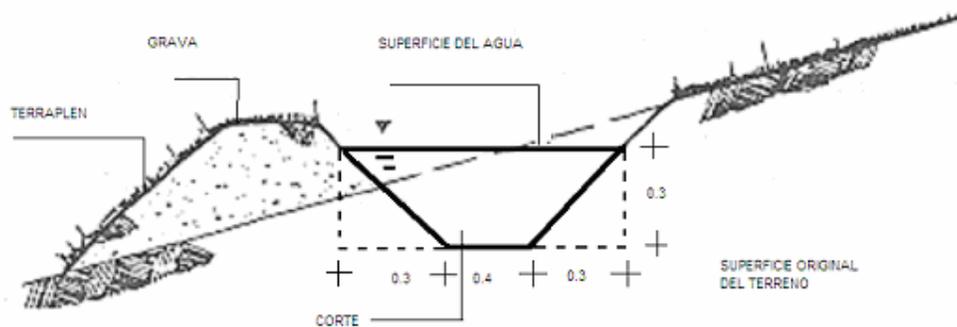


Figura 3.7 Propuesta de la sección transversal del canal trapezoidal

Fuente: <http://www.cepis.org>

El canal debe ser trazado por la curva de nivel máximo a que llegará el relleno, y deberá garantizar una velocidad máxima promedio (0.5 m/s) que no provoque erosión excesiva.

3.6 GEOMEMBRANA

Teniendo en consideración las características de los componentes en los líquidos percolados, es indiscutible que estos pueden contaminar las aguas y los suelos con los cuales entran en contacto.

Es necesario evitar todo tipo de contacto entre líquidos percolados, el agua y suelos subterráneos, pero, para tal efecto, habría que cuidar muchos aspectos que encarecerían la obra en tal forma que sería imposible de realizar. Sin embargo, llevar este contacto a un nivel mínimo de modo que las características del nivel de aguas freáticas no sufran grandes variaciones y que el uso actual o eventual de ella no sea afectado, es perfectamente posible.

Ahora bien, no hacer nada al suponer que los contaminantes serán diluidos en las aguas subterráneas es un error, que puede causar un gran daño, ya que una vez que las aguas y suelos han sido contaminados será muy difícil revertirlas a las condiciones originales. El escurrimiento de las aguas subterráneas, por lo general, es laminar, lo que hace que la dispersión del contaminante sea por difusión y no por dilución, y como el flujo de las aguas freáticas y las tasas de difusión son bajas, hacen que configure una zona de contaminación bastante peligrosa.

Los contaminantes de origen orgánico son los más abundantes en los líquidos percolados, pero ellos van perdiendo esa característica en el transcurso del tiempo. Por otra parte, es un hecho comprobado que gran parte de ellos quedan retenidos al tener que pasar por un medio arcilloso, contribuyendo en gran medida a aumentar la impermeabilidad del medio.

El uso de arcilla como medio impermeabilizante es bastante común en América, se presenta a continuación el procedimiento para colocar el material y lograr esta condición impermeabilizante.

Sobre el terreno emparejado se colocan 0.6 m de material arcilloso, homogéneo, sin contenido orgánico, con no menos de 40% de su peso seco que pase la malla ASTM N° 200. Este material se coloca en capas de 0.2 o 0.3 m , cada capa se compacta con rodillo pata de cabra o similar hasta obtener una densidad seca no inferior a 90% de la densidad seca máxima. El coeficiente de permeabilidad en el laboratorio para el material arcilloso no será superior a $K=10^{-6} \text{ cm/s}$.

La capa de arcilla compactada, se mantiene permanentemente húmeda para evitar su agrietamiento, hasta que sea cubierta con basura, por lo que es recomendable lograr esta impermeabilidad solo con la extensión necesaria para ejecutar con comodidad el relleno sanitario.

Últimamente se ha empleado bastante la arcilla en espesores de 20 a 30 *cm* con polietileno de alta densidad entre medios, el espesor de este polietileno oscila entre 1 y 2 *mm*.

Otras geomembranas ampliamente usadas son el polietileno cloro sulfonado (Hypalon) y el polivinil clorado (PVC). En ocasiones las geomembranas son usadas con geotextiles (tejidos esponjosos) con el fin de protegerlas de desgarramientos y/o punzonamientos, veáse las Figuras 3.8 y 3.9.

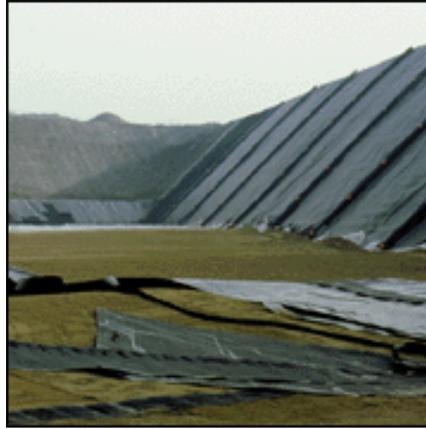


Figura 3.8 Relleno doblemente sellado

Fuente: <http://www.tenax.com>



Figura 3.9 Geotextiles

Fuente: <http://www.tenax.com>

La geomalla y el geotextil funcionan conjuntamente como una capa que conduce el lixiviado hacia el sistema de recolección del lixiviado. El Cuadro 3.3 muestra los ensayos de rendimiento utilizados para medir las propiedades de las geomembranas.

Cuadro 3.3 Ensayos de rendimiento utilizados para medir las propiedades de las geomembranas sintéticas, y los valores típicos para estas propiedades

<i>Ensayo</i>	<i>Método de ensayo</i>	<i>Valores típicos</i>
Categoría de resistencia		
Propiedades de tensión	ASTM D638, tipo IV, pesa 5 cm/min	
Resistencia a la tracción		16.548 kN/m ²
Resistencia a la tracción en rotura		27.580 kN/m ²
Alargamiento elástico		15%
Alargamiento en rotura		700%
Tenacidad		
Iniciación de resistencia a la rotura	ASTM D1004 molde C	20 kg
Resistencia a la perforación	FTMS 101B, método 2031	104 kg
Fragilidad a baja temperatura	ASTM D746, procedimiento B	- 69°C
Durabilidad		
Porcentaje de negro de carbono	ASTM D1603	2%
Dispersión de negro de carbono	ASTM D3015	A-1
Envejecimiento acelerado con calor	ASTM D 573, D1349	Cambio escaso de resistencia después de un mes a 110°C
Resistencia Química		
Resistencia a mezclas de residuos químicos	Método EPA 9090	Cambio en la resistencia a la tracción del 10% durante 120 días.
Resistencia a reactivos químicos puros	ASTM D543	Cambio en la resistencia a la tracción del 10% durante 7 días.
Resistencia a la rotura bajo tensión		
Resistencia a la rotura bajo tensión ambiental	ASTM D 1693, condición C	1.5 h

Fuente: Gestión integral de residuos sólidos. George Tchobanoglous. Volumen I.

3.7 ESTABILIDAD

Cuando inicialmente se colocan residuos sólidos en un relleno se comportan de una forma similar a otros materiales de relleno. El ángulo nominal de reposo para el material residual colocado en un relleno es aproximadamente de 1.5 a 1. Como los residuos sólidos tienen tendencia a deslizarse cuando la pendiente es demasiado inclinada, las pendientes utilizadas para las porciones ya llenas de un relleno varían de 2.5/1 a 4/1, siendo la más común 3/1. Como consecuencia de los problemas planteados con el deslizamiento ocasionado por el asentamiento, se han construido terrazas en muchos de los rellenos donde la altura total del relleno excede de 15 m. Como se muestra en la Figura 3.10 las terrazas ayudan a mantener la estabilidad de la pendiente y también se utilizan para la puesta en obra de conductos para el drenaje del agua superficial y para la localización de tuberías para la recuperación del gas del relleno.

Por lo general, no se recomienda la construcción de instalaciones permanentes sobre los rellenos llenos por las características de asentamiento diferencial, por la distinta capacidad de carga de los niveles superiores del relleno, y por los problemas potenciales que pueden resultar de la migración del gas, incluso cuando se usan instalaciones para la recolección del gas. Cuando se conoce el uso final del relleno antes de empezarlo, es posible controlar la colocación de ciertos materiales durante su funcionamiento. Por ejemplo, se pueden colocar materiales relativamente inertes, como residuos de construcción y demolición, en aquellos lugares donde se van a localizar edificios y/o otras instalaciones físicas en el futuro.

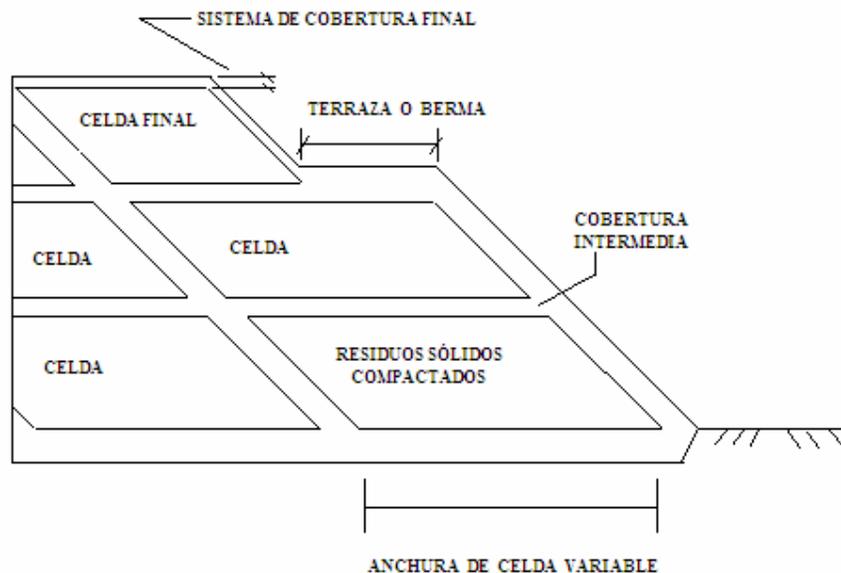


Figura 3.10 Terrazas en un relleno sanitario

Fuente: Gestión integral de residuos sólidos. George Tchobanoglous. Volumen I. (Modificado por la autora)

Asentamiento de rellenos sanitarios. Mientras se descompone el material orgánico y se pierde peso en forma de componentes gaseosos y lixiviados, se produce el asentamiento del relleno. También se produce el asentamiento como resultado de la sobrecarga producida por la adición de niveles, y por la entrada y salida de agua del relleno. El asentamiento produce rupturas en la superficie y en la cobertura del relleno, y rupturas y desplazamientos en las instalaciones para la recolección de gas. También interfiere en el uso final del relleno después de la clausura.

Una vez colocados en un relleno, los componentes orgánicos de los residuos se descompondrán, ocasionando la pérdida de hasta el 40% del total de la masa original. La pérdida de masa provoca una pérdida de volumen, que puede ser rellenada con nuevos residuos. Normalmente el volumen perdido se rellena cuando se coloca el segundo nivel encima del primero. Se perderá peso y volumen después de cerrar el relleno sanitario.

3.8 VÍAS DE ACCESO

Al relleno sanitario se debe llegar por una vía pública de acceso, la que debe ser una vía principal de uso permanente y que reúna las condiciones aceptables de diseño. Es necesario destacar que el tiempo empleado en el acarreo de residuos hasta y desde el sitio del relleno sanitario, es más importante que la distancia.

Durante la planeación del relleno sanitario, se deben estudiar cuidadosamente los caminos de acceso interno dentro del recinto del relleno, ya que por el permanente desplazamiento de estas rutas, aumenta la posibilidad de originar serios trastornos en épocas lluviosas.

Para entregar los desechos en el frente de trabajo, se acepta como vía interna un camino de 6 m de ancho en terracería bien compactada y con un adecuado drenaje, la cual debe mantenerse en buenas condiciones durante todo el año. La pendiente máxima podrá ser de 7 a 10%, según el estado de los vehículos y si remontan la pendiente cargados o vacíos.

Aunque se acepte el hecho de que en un relleno sanitario las vías de acceso al sitio de operación y control del mismo pueden ser rústicas, hechas en tierra, piedra y restos de demoliciones, estas vías deben mantenerse en buen estado y drenadas.

3.9 CONSIDERACIONES PARA EL MATERIAL DE CUBIERTA

Este es el instrumento de seguridad a largo plazo más importante para la minimización de la infiltración de aguas de lluvia dentro del relleno y para minimizar la generación de lixiviados después del cierre completo del relleno. El uso de arcilla como medio impermeabilizante es bastante común.

Una de las diferencias fundamentales entre un relleno sanitario y un basurero a cielo abierto es la utilización de material de cobertura para separar adecuadamente las basuras del ambiente exterior y confinarlas al final de cada jornada diaria.

En el caso que exista la posibilidad de generación de gases en el relleno, se debe instalar un sistema de captación de gases. Para esto, se cubre el relleno con una capa de por lo menos 30 *cm* de piedras/gravas o escombros de construcción con diámetros de 100 *mm*, antes de la capa de impermeabilización. Esta capa, tiene como función equilibrar el relleno ante la compactación diferencial y por lo tanto protegerá a las capas impermeables superiores.

Sobre la capa anterior, se deben instalar tres capas de impermeabilización. La primera capa forma al mismo tiempo el recubrimiento espontáneo después de finalizada la celda del relleno. Debido a la compactación, esta capa no podrá tener la misma calidad que la segunda capa, la que se construye después de disminuir la compactación en el relleno (2 a 3 años). La impermeabilización superficial debe tener una inclinación mayor de 3%.

Sobre las capas de impermeabilización, se debe colocar una de drenaje superficial para la captación de las aguas de lluvia. Finalmente, se debe cubrir el relleno con una capa de suelo humoso con un espesor mayor o igual a 30 *cm*.

No importa la calidad del material de cobertura para un relleno sanitario. Se recomienda simplemente aprovechar la tierra que se encuentre más accesible, puesto que el objetivo fundamental es el cubrimiento de los desechos.

En cuanto a la cantidad de material de cobertura necesario, debe emplearse 1 m^3 de tierra por cada 4 a 5 m^3 de desechos sólidos, es decir, entre 20 y 25%.

Es recomendable efectuar la cobertura final de 0.4 - 0.6 *m* en dos etapas, cada una de 0.2 a 0.3 *m*, con un intervalo de un mes aproximadamente para tratar de cubrir los asentamientos que se produzcan en la primera capa.

El área debe ser cultivada con plantas de raíces superficiales, por ejemplo grama. Debe evitarse la plantación de árboles ya que éstos dañarán el sistema de aislamiento superficial del relleno. Asimismo, debe asegurarse que el área del relleno sea utilizado para fines que no requieran construcción u otras actividades que puedan dañar el sistema de impermeabilización del mismo.

Los rellenos sanitarios adecuadamente operados y mantenidos aseguran el control de los problemas de salud pública, contaminación del agua y aire. Por ejemplo, el control de insectos, incendios y roedores se hace a través de compactar y cubrir los residuos con suelo. Las profundidades recomendadas para la cubierta dependen de los periodos de exposición y se muestran en el Cuadro 3.4.

Cuadro 3.4 Profundidades recomendadas

Tipo de Cubierta	Profundidad mínima en [m]	Tiempo de exposición en [d]
Diaria	0.15	Menor a 7
Intermedia	0.30	De 7 a 365
Final	0.60	Mayor a 365

Fuente: Impacto Ambiental. Facultad de Ingeniería. UNAM. IMTA.

El cubrimiento diario de los desechos sólidos con tierra es de vital importancia para el éxito del relleno sanitario, debido a que cumple las siguientes funciones:

- Prevenir la presencia y proliferación de moscas y aves
- Impedir la entrada y proliferación de roedores
- Evitar incendios y presencia de humos
- Minimizar los malos olores
- Disminuir la entrada del agua de lluvias a la basura
- Orientar los gases hacia las chimeneas para evacuarlos del relleno sanitario
- Dar una apariencia estética aceptable al relleno sanitario
- Servir como base para las vías de acceso internas
- Permitir el crecimiento de vegetación

3.10 SISTEMA DE VENTILACIÓN

Al ser inseparable la producción de gases de la descomposición anaerobia de la basura, es inminente la necesidad de recuperarlos y disponerlos o mejor aún, aprovecharlos.

En los rellenos sanitarios tradicionales, la recuperación de los gases es el paso previo a su combustión controlada en quemadores dispuestos a propósito. Sin embargo, por la demanda y los altos costos de la energía se estudiaron las condiciones óptimas para la producción de gas metano. Los rellenos sanitarios operados bajo estas condiciones reciben el nombre de rellenos controlados.

Hay tres opciones principales para el tratamiento del gas de relleno:

- Recuperarlo y quemarlo en una chimenea de venteo dentro del sitio.
- Usarlo esencialmente tal como sale. Se aplica sólo deshidratación y compresión para aplicaciones directas de combustión en procesos de generación de vapor para posibles aplicaciones en generación de electricidad.
- Purificarlo al eliminar la humedad, el CO₂ y el H₂S para venderlo como combustible de bajo poder calorífico.

Una predicción preliminar de la producción de gas del relleno y su potencial de extracción se puede desarrollar mediante una evaluación del sitio. También se incluyen dentro de esta evaluación sus asentamientos geográficos, historia operacional y la cantidad y composición de la basura depositada.

Para una estimación más precisa se requieren de pruebas de campo, sobre todo de extracción de gas. Las pruebas de extracción de corta duración (varias horas o varios días) permiten conocer, en principio, las distribuciones de presión y composición de gas en los alrededores de un pozo de extracción. Dado que el volumen del relleno puede estar constituido hasta por un 50% de huecos, las pruebas a corto plazo no reflejan la tasa de extracción sostenible de gas, ya que, no es posible distinguir entre el gas que se produce en el tiempo de extracción y el gas que ya estaba almacenado en los huecos desde el principio de la extracción. Las pruebas a largo plazo deben durar el tiempo suficiente para extraer un volumen de gas que, por lo menos, duplique el volumen de los huecos del relleno. El objetivo de estas pruebas es refinar y verificar los estimados de producción de gas obtenidos de las pruebas a corto plazo.

La velocidad de extracción estimada en algunos rellenos de prueba es de 0.015 m^3 de gas por cada 0.30 m de espesor de capa de basura. La composición del gas seco en un relleno bien controlado puede ser como se muestra en el Cuadro 3.5.

Cuadro 3.5 Composición del gas seco en un relleno controlado

Metano	De 45 a 70%
CO ₂	De 30 a 45%
Nitrógeno	De 0.5 a 5%
H ₂ S	De 0.001 a 0.002%

Fuente: Procesamiento de la basura urbana. Rodolfo Trejo Vázquez.

Se presentan a continuación los parámetros para una óptima generación de metano:

- *Temperatura:* usualmente de 20 a 40°C (intervalo mesofílico), aunque puede trabajarse también en intervalo termofílico (de 50 a 60°C).
- *Ausencia de aire:* la captación del gas se hace a 30 m de profundidad aunque, a nivel piloto, las captaciones se hacen entre 3 y 12 m .
- *pH:* entre 6.7 y 7.0
- *Humedad:* 60% para digestión anaerobia. Si la humedad es inferior al 20% la biodegradación se reduce notablemente. En cambio, si es superior al 60% se presentan problemas de lixiviados.
- *Nutrientes:* (nitrógeno), debe haber suficiente para permitir el crecimiento bacteriano.
- El *drenaje* de gases está constituido por un sistema de ventilación en piedra o tubería perforada de concreto o PVC (revestida en piedra), que funcionará a manera de chimeneas o ventilas, las cuales atraviesan en sentido vertical todo el relleno desde el fondo hasta la superficie. Estas chimeneas se construyen verticalmente a medida que avanza el relleno, procurando siempre una buena compactación a su alrededor; se recomienda instalarlas cada 20 ó 50 m , con un diámetro entre 0.3 y 0.5 m cada una, en cuanto al diámetro es recomendable que la tubería tenga cierta longitud en la parte inferior y aproximadamente la mitad en la superior.

La Figura 3.11 ilustra la manera de construir las chimeneas o ventilas de gases.

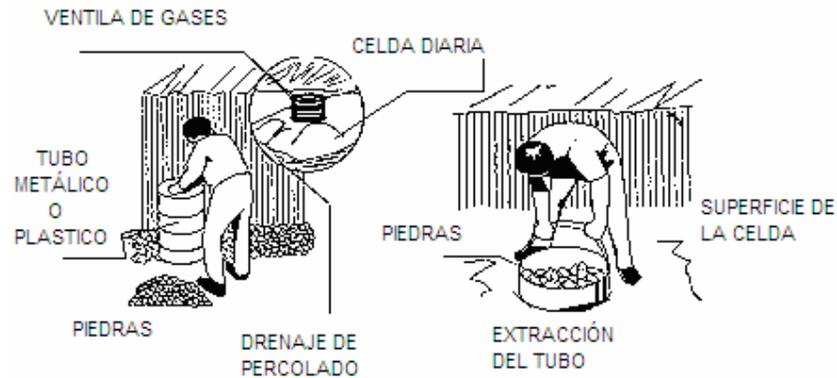


Figura 3.11 Construcción de ventilas de gases

Fuente: <http://www.cepis.org> (Modificada por la autora)

Se deben interconectar los drenes, a fin de lograr una mayor eficiencia en el drenaje de líquidos y gases en el relleno sanitario, véase Figura 3.12

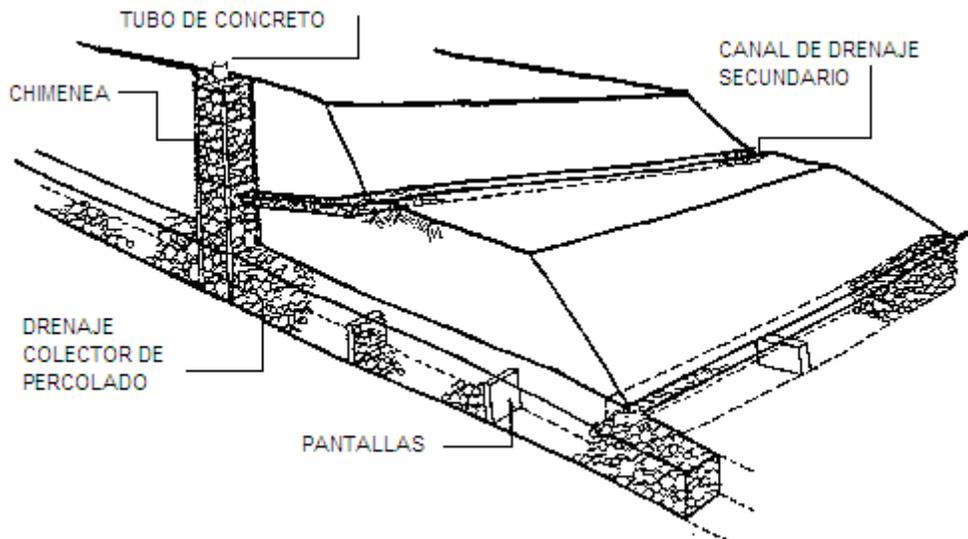


Figura 3.12 Drenaje de líquidos y gases en el relleno sanitario

Fuente: <http://www.cepis.org> (Modificada por la autora)

Luego de tenerse prevista la conclusión de la última celda, se colocan dos tubos de concreto: el primero, perforado para facilitar la captación y salida de gases; además, para que los desechos sólidos o la tierra de cobertura no obstruyan los orificios del tubo, se reviste con piedra o cascajo a manera de camisa de protección. El segundo tubo, en cambio, no será perforado, a fin de coleccionar el gas y quemarlo, eliminando los olores producidos por otros gases. Las Figuras 3.13 y 3.14 muestran este procedimiento.

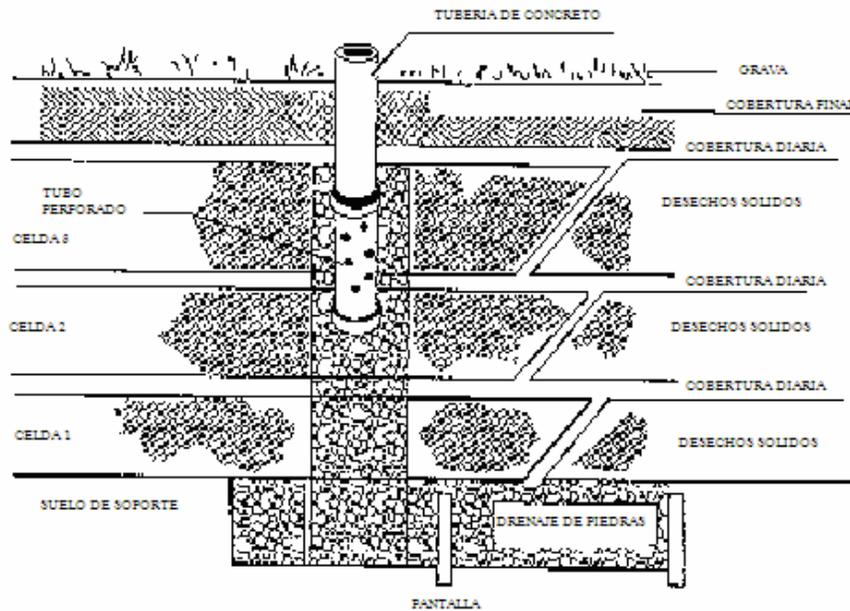


Figura 3.13 Detalle constructivo del filtro para drenaje de gases

Fuente: <http://www.cepis.org> (Modificada por la autora)

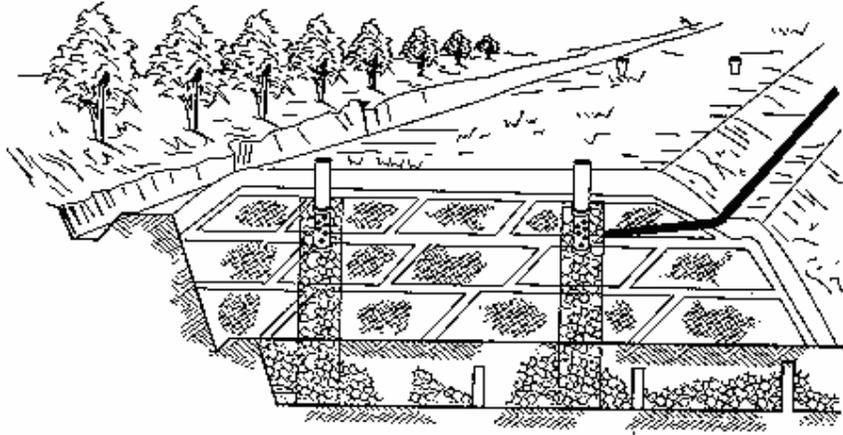


Figura 3.14 Distribución de las chimeneas en el relleno

Fuente: <http://www.cepis.org> (Modificada por la autora)

Todas las pruebas muestran que un aumento de temperatura o humedad acelera la producción de gas. En un relleno controlado es importante producir internamente un máximo de caminos para el gas, impermeabilizar la superficie libre para impedir la difusión al y del exterior, y crear puntos de concentración de gas con presiones un poco menores a la del ambiente.

En el relleno controlado hay un sinnúmero de puntos, en los que se genera gas, con una actividad más o menos intensa dependiendo de la velocidad de degradación de los materiales en cada punto. Como consecuencia de la producción de gases, en un determinado punto del relleno se origina una sobrepresión y se dan valores hasta de 10 *cm* de agua. Los gases fluyen de estos sitios a los de baja presión, lo que origina movimientos de gases dentro del relleno.

La experimentación en la extracción de gases de rellenos controlados ha aportado las siguientes características:

- Antes de la extracción de gas en un relleno hay zonas de presión positiva y otras de presión negativa (vacío), cuya posición varía continuamente así como su tamaño y valor.
- Una zona de vacío aparente, creada alrededor de una zona de extracción de gas, se modifica constantemente en posición y forma como consecuencia de una serie de factores sinérgicos tales como: la presión barométrica, velocidad de producción de gas, velocidad de extracción de gas, volumen de gas presente en el relleno, movimiento de líquidos dentro del relleno, caminos preferidos por el gas en su movimiento, precipitación, percolación de líquidos y otros.
- Las condiciones geométricas son de gran influencia en la formación de zonas de vacío y de flujo de gas en el relleno.

Hasta ahora los gases producidos en el relleno han sido utilizados en:

- *Venteo en el propio relleno.* En este caso no se necesita ninguna purificación.
- *Como combustible complementario* para generar vapor y/o electricidad. En este caso las especificaciones de los equipos usados y la proporción de combustible complementario empleado determinan el grado de purificación.
- *Como gas de recarga* para una red de distribución de gas natural. En este caso el gas debe estar dentro de las especificaciones de gas natural. La dificultad más grande en este caso es alcanzar el poder calorífico específico.
- *Como combustible único* en vehículos automotores. En este uso también se presentan problemas serios con respecto al corto alcance de los vehículos, producido por la limitada capacidad de almacenamiento.

Cuando se pretende recuperar los gases en un relleno tradicional, su sistema de ventilación presenta una incompatibilidad básica con el sistema de recuperación debido a que este último requiere de medidas que impidan que el gas de relleno se mezcle con aire.

IV. PROCESO DE LICITACIÓN, CONSTRUCCION Y OPERACIÓN DEL RELLENO SANITARIO DE TLALNEPANTLA DE BAZ, ESTADO DE MÉXICO

4.1 ANTECEDENTES

El continuo crecimiento de las ciudades y el desarrollo tecnológico, industrial, de servicios y por ende económico, proporciona a la población en general un mejor nivel de vida; sin embargo, estos mismos factores tienen como contraparte la concentración desordenada de los centros de población, una mayor demanda de servicios y seguridad pública, e instituciones educativas, entre otros.

Uno de los más grandes retos a los que se enfrentan las autoridades municipales, consiste en la procuración de servicios de calidad demandados por la población.

Por otro lado, todas las actividades que realiza el hombre producen residuos que requieren ser manejados pronta y adecuadamente por lo que uno de los servicios de más demanda al interior de una población es el relativo a la recolección, transporte, tratamiento y disposición final de residuos sólidos. Por lo que el adecuado funcionamiento de este sistema de servicio depende:

- Imagen del entorno, y
- Salud pública principalmente.

En contraparte, un déficit del servicio provocaría:

- Aspecto desagradable en el paisaje por dispersión de residuos.
- Malos olores.
- Proliferación de fauna nociva como ratas, cucarachas, moscas, etc., toda ella se constituye en vector para la transmisión de enfermedades a los pobladores de las comunidades cercanas a los sitios de disposición final o de las ciudades con aseo público deficiente.
- Contaminación del suelo y aguas subterráneas en los sitios de disposición final, así como la recurrencia de incendios con todas sus consecuencias.
- Aunado a todo lo anterior es importante mencionar el surgimiento de grupos de poder que se disputan el control de la recuperación y comercialización de subproductos, conocida como pepena.

4.2 DIFUSIÓN DEL PROYECTO

En el año de 1997, el municipio de Tlalnepantla de Baz, Estado de México, contaba con un tiradero a cielo abierto para la disposición final de sus residuos; sin embargo este sitio no cumplía con los requerimientos de las autoridades municipales para garantizar su adecuado funcionamiento.

La situación que predominaba en el tiradero a cielo abierto provocaba inconformidad por parte de los habitantes de la zona, así mismo las pérdidas económicas por parte de las autoridades por una mala operación eran elevadas, por lo que el municipio concibió la idea de clausurar y reintegrar el tiradero al entorno, mitigando en la medida de lo posible los daños al ambiente.

Para lograr un adecuado manejo y disposición de los residuos sólidos generados en la zona fue necesario construir un relleno sanitario que cubriera con los requisitos marcados en la Norma Oficial Mexicana NOM-083-ECOL-1996, que establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales; incluyendo restricciones por afectación a obras civiles y áreas naturales protegidas, distancias mínimas a aeropuertos, caminos, ferrocarriles, aspectos hidrológicos, geológicos, hidrogeológicos y aplicación de tecnologías y sistemas equivalentes.

Con esta idea adecuadamente estructurada, las autoridades del municipio se encargaron de dar difusión al proyecto de Clausura y Saneamiento del extiradero así como la Construcción y Operación del Relleno Sanitario en las colonias vecinas para obtener aceptación por parte de los habitantes y evitar conflictos tanto sociales como políticos; sin embargo, hubo pequeños grupos al interior de las comunidades más cercanas que, atendiendo intereses políticos ajenos a las bondades del proyecto, se resistían y a su vez incitaban a los vecinos a mostrar una actitud de rechazo, negando toda posibilidad de diálogo.

Pese a ello, los trabajos de clausura del tiradero, así como de construcción y operación del relleno sanitario, pudieron iniciar, dejando sin argumentos válidos de rechazo a los citados grupos, al demostrar con hechos su conveniencia para la mejora del entorno y la salud pública.

4.3 LICITACIÓN

El 23 de abril de ese mismo año, el H. Ayuntamiento de Tlalnepantla de Baz emite la Convocatoria de Licitación Pública número DSPM-01-97 concerniente a la adjudicación del contrato de servicios para sanear, clausurar y rehabilitar el actual tiradero a cielo abierto, así como construir y operar el nuevo relleno sanitario.

En atención a la convocatoria acudieron cuatro grandes empresas con amplia experiencia en el manejo de residuos, presentando sus ofertas el día 23 de mayo.

Para la evaluación minuciosa de las propuestas se nombró una Comisión Revisora y un Comité de Evaluación, integrado por Regidores, Síndicos, Directores y demás funcionarios del Municipio de Tlalnepantla, de asociaciones civiles como la Cámara Nacional de Comercio, Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción y la Asociación de Industriales de Tlalnepantla, así como de representantes vecinales, quienes el día 12 de junio emitieron y validaron el dictamen en el que se adjudicó a Mexicana de Medio Ambiente, S.A. de C.V. el contrato de obra pública número DSPM-01-97 para la ejecución de los trabajos.

Con fecha 16 de junio, el Ayuntamiento del Municipio de Tlalnepantla de Baz, emitió la resolución que contiene el fallo.

Como un último paso en esta etapa, el día 23 de junio se firmó el Contrato Administrativo de Concesión para la Prestación del Servicio de Operación y Disposición Final de los Residuos Sólidos en el Municipio de Tlalnepantla.

4.4 ESTUDIOS PREVIOS

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

Geología regional y local. Se realizó un levantamiento geológico, con una superficie de aproximadamente $450,000 m^2$, la cual se vació en una base topográfica escala 1:1000.

Se efectuaron reconocimientos geológicos regionales para observar los diferentes tipos de roca, contactos litológicos, así como los principales sistemas de fallas y fracturas.

Mediante el análisis de la litología y las pruebas de permeabilidad de los materiales, se identificaron las relaciones entre las principales unidades hidrogeológicas en la zona y con ello se estableció el marco hidrogeológico para el sitio y se analizó su posible comportamiento ante el emplazamiento de un relleno sanitario.

De lo anterior se concluye que la permeabilidad de las rocas ígneas basales tiende a ser baja, aún en los horizontes fracturados, por el relleno ocurrido durante el depósito de los materiales tobáceos. El sistema en su conjunto, cuenta con permeabilidad pobre, según se demostró por medio de la exploración geofísica y las pruebas de permeabilidad realizadas a diferentes niveles.

En general el área se considera tectónicamente estable. Con respecto a la susceptibilidad sísmica, el sitio se encuentra más expuesto a efectos microsísmicos.

Geofísica. Se efectuaron 21 sondeos eléctricos verticales (SEV) en 7 secciones, separados de 50 a 90 m con aberturas interelectrónicas AB de 500 m con el propósito de establecer la continuidad lateral y vertical de las unidades litológicas en el subsuelo y para tratar de definir el contacto entre las tobas y las andesitas.

También se realizó exploración sísmica de refracción, por medio de dos tendidos cortos para la obtención de módulos dinámicos.

Los resultados que se obtuvieron de los estudios geofísicos, tanto de secciones como de sondeos profundos exploratorios, muestran un comportamiento sísmico y eléctrico similar a las capas geológicas exploradas directamente mediante pozos.

Con los resultados de geofísica, su correlación con la información de geología superficial y de pruebas mecánicas mediante pozos, se concluyó que en caso de realizar excavaciones, los taludes de éstas permanecerán estables, siempre y cuando se les proporcione una pendiente de 0.25:1.

Mecánica de suelos. Los estudios adicionales de geología y geofísica correlacionados con los resultados de la mecánica de suelos indican que las rocas de tipo tobáceo presentes en el sitio del proyecto son de características favorables, como: pobre permeabilidad, suficiente resistencia mecánica, facilidad de corte y remoción.

Debido a que no se detectó la presencia del nivel freático por lo menos hasta una profundidad de 50 m, se descarta la posibilidad de que el relleno sanitario contamine acuíferos en la zona del proyecto.

Geohidrología. Según este estudio se determinó que no hay acuíferos someros presentes, cuando menos hasta una profundidad de 50 m. En caso de que el acuífero regional se encontrase bajo el terreno del sitio, éste se encontraría a una profundidad mayor de 80 m y estará cubierto por capas de material granular mal clasificado con abundante arcilla; cubierta cuya capacidad de infiltración le confieren condición de acuitardo. Por ello, se considera que el terreno presenta características favorables para el desarrollo del proyecto en lo relativo a condiciones del subsuelo y protección a masas de aguas subterránea.

Manifestación de impacto ambiental. De esta evaluación se concluyó que el impacto global del proyecto es positivo con un valor resultante de +4, implica que la puesta en operación del relleno sanitario es ambientalmente favorable de manera significativa, ya que está orientado a la solución de un importante problema ambiental que está actualmente afectando zonas territoriales, masas de agua, atmósfera y salud de la población.

4.5 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL PROYECTO

Ubicación. Zona Norte del Área Metropolitana de la Ciudad de México. En la margen occidental de la Autopista México-Querétaro, al N-NW del asentamiento irregular La Providencia, zona de Barrientos, Municipio de Tlalnepantla de Baz, Estado de México.

Área total. El área del terreno cedido en usufructo para la construcción y operación del relleno sanitario es de 28.27 ha, bajo resguardo para rehabilitación y saneamiento del extiradero es de 16.34 ha, integradas físicamente como una parcela.

Demanda del servicio. En este lugar depositan sus residuos el Municipio de Tlalnepantla de Baz y algunos usuarios particulares que aportan hasta el 12% del total, a razón de 800 t diarias los 365 días del año, con horario de las 6:00 a las 22:00 h como se muestra en la Figura 4.1, la población total atendida de 1'100,000 habitantes.

El proyecto contempla una producción inicial de 800 t/d y un incremento anual del 1%, durante los veinte años que durará la concesión.

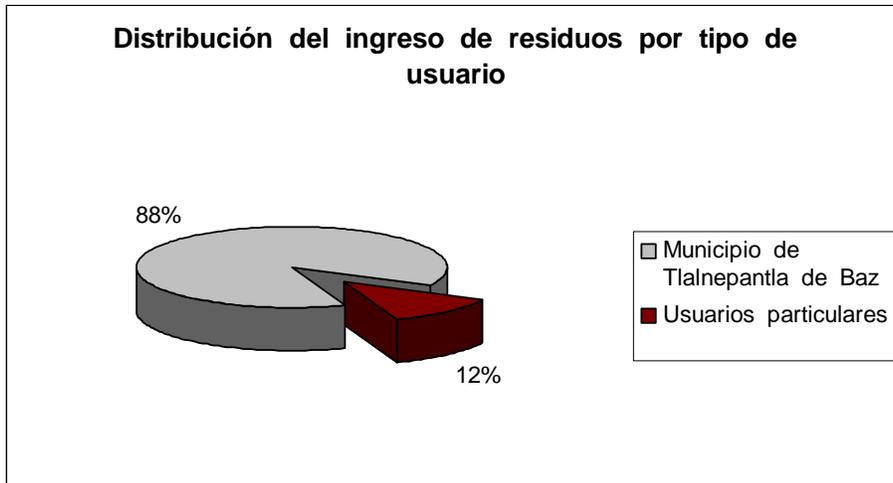


Figura 4.1 Distribución del ingreso de residuos por tipo de usuario

Fuente: <http://www.fundacion-ica.org.mx>

Alcances. Clausura, construcción y operación del relleno sanitario, servicio exclusivo de disposición final de residuos sólidos municipales y clausura, rehabilitación y saneamiento del antiguo tiradero a cielo abierto. La totalidad de las inversiones a lo largo de la concesión son hechas por la empresa concesionaria con recuperación de la misma mediante un esquema tarifario por tonelada de residuos confinados en el sitio.

Supervisión. La empresa concesionaria se encarga de diseñar, construir y operar mientras que el H. Ayuntamiento a través de la Dirección de Ecología supervisa que los trabajos ejecutados se apeguen estrictamente a la normativa oficial aplicable, así como a la oferta con la que se obtuvo el contrato, como mínimo.

4.6 CONSTRUCCIÓN

La construcción se retrasó debido a la falta de acuerdos entre las partes vendedora y compradora del terreno, pudiéndose iniciar hasta el día 5 de enero de 1998. Los trabajos en esta etapa fueron:

- Trazo de construcciones
- Construcción de oficinas administrativas, taller, almacén, regaderas y vestidores (Figura 4.2)



Figura 4.2 Vista general de las oficinas administrativas y cobertizo

Fuente: <http://www.fundacion-ica.org.mx>

- Infraestructura de la báscula camionera del tipo eliminadora de fosa de cimentación, computarizada, con capacidad de 70 t y 23 m de longitud
- Infraestructura para almacenamiento de diesel y colocación de tanque de acero con capacidad de 12,000 L, incluyendo la construcción del dique de seguridad por derrames accidentales
- Estacionamiento para vehículos y camiones recolectores
- Caseta de vigilancia
- Cerca perimetral a base de malla ciclónica y tres hilos superiores de alambre de púas, en 2,800 m
- Portón de acceso (Figura 4.3)



Figura 4.3 Portón de acceso

Fuente: <http://www.fundacion-ica.org.mx>

- Caminos de acceso principal y secundarios totalmente pavimentados en aproximadamente 2 km
- Forestación de la zona de amortiguamiento perimetral a partir de árboles trueno
- Camino perimetral, pavimentado con material recuperado, longitud 800 m con 2,000 m de terracería

- Instalación eléctrica, hidráulica, sanitaria y de gas L.P. para servicio de regaderas
- Drenes para captación y conducción de agua pluvial, destinados mayoritariamente al desvío del agua de lluvia antes de su ingreso a la parcela
- Laguna de almacenamiento de lixiviados (Figura 4.4), con capacidad para $4,000.0 m^3$, totalmente impermeabilizada mediante la colocación de las siguientes capas:
 - *Geotextil*. Para protección de la membrana plástica en su contacto con el terreno natural.
 - *Primera Geomembrana de polietileno de alta densidad*, virgen en 1 mm de espesor. Es el material que proporciona la impermeabilidad del conjunto y retiene cualquier posible fuga de la segunda geomembrana.
 - *Geored 140*. Proporciona una separación y protección adicional entre las dos membranas plásticas en caso de ruptura de la que se encuentra al exterior.
 - *Segunda Geomembrana de polietileno de alta densidad*, virgen en 1 mm de espesor. Es el material que proporciona la impermeabilidad del conjunto.



Figura 4.4 Laguna de lixiviados y zona de servicios administrativos

Fuente: <http://www.fundacion-ica.org.mx>

Como medida de seguridad se aisló esta zona mediante una malla ciclónica de 2 m de altura, y para mejorar aún más su estética, se plantó bambú en todo su perímetro.

Preparación de la celda 1

Es la parte en la que la atención de la supervisión es acaparada durante más tiempo, este trabajo estuvo integrado por:

- *Trazo y nivelación.* Se marcó físicamente en el terreno lo que se había diseñado en los planos del proyecto, el área total de la primera celda fue de 7 ha, de las cuales se prepararon sólo 4 en una primera fase.
- *Excavación.* Con la intención de obtener material de cobertura de buena calidad, así como prolongar la vida útil del sitio, se hizo una excavación de 3 m de profundidad. El material producto del corte se almacenó en un banco cercano a la zona futura de operación para facilitar su posterior extracción para la cobertura diaria de residuos.
- *Afine de las superficies.* Esta actividad se hizo mediante una motoconformadora en las superficies horizontales y manualmente en los taludes; independientemente de cómo se afinaron, se inspeccionaron minuciosamente en recorridos a pie quitando exclusivamente a mano las pequeñas salientes o imperfecciones que pudiesen dañar la membrana.
- *Excavación de drenes de captación y conducción de lixiviados.* Una vez que se terminó de afinar la celda se procedió a trazar los drenes y a excavarlos con ayuda de la cuchilla de la motoconformadora; de esta forma las dimensiones mínimas prácticas de estos son: 1.5 m de ancho por 0.4 m de profundidad.
- *Colocación de geotextil.* El material empleado se colocó en taludes y en aquellas zonas donde el afine fue exclusivamente manual. Su función es proteger la membrana plástica de las imperfecciones del terreno sobre el que se coloca. Debido a las grandes alturas de taludes que se tienen en este relleno sanitario, la impermeabilización vertical se hace progresivamente de abajo hacia arriba, en franjas de 7 a 8 m de altura, de tal forma que los residuos recibidos en la operación diaria sean los que le den el soporte necesario al sistema; mientras esto sucede, los materiales se fijan a la pared mediante clavos y rondanas de hule que evitan rasgaduras.
- *Colocación de geomembrana.* Al igual que el afine, la colocación de geomembrana fue una etapa crítica. En superficies horizontales se hizo de la siguiente forma: sobre el terreno perfectamente fino y libre de cualquier objeto punzocortante, se tendió un paño de membrana del largo requerido, a un costado se colocó otro con un traslape sobre el anterior de aproximadamente 10 cm, la unión entre ambos paños se hizo por termofusión a 415°C y a una velocidad de 1 m/min aproximadamente. Las máquinas de unión empleadas tienen contacto continuo sobre el área de traslape en dos puntos equidistantes, que al final del trabajo forman una vena. En los taludes, los paños de geomembrana son de largo variable, siempre y cuando no excedan los 10 m, y con un ancho de 6.86 m; se colocan verticalmente con ayuda de poleas y escaleras para finalmente anclarles a la pared mediante clavos. En estos casos las uniones se hacen por medio de aplicación directa de aire a 600°C de temperatura.
- *Protección mecánica de la geomembrana.* La membrana de polietileno es un material que puede ser fácilmente dañado por el tránsito de la maquinaria pesada. Para evitarlo fue necesario protegerla mecánicamente de la siguiente forma: en superficies horizontales, se logró colocando una capa de tepetate

producto de las excavaciones en dos espesores de 20 *cm* cada una, compactadas al 90% Proctor. Es de suma importancia que el material empleado esté libre de rocas y, delimitar los drenes de captación y conducción de lixiviados con costales para evitar su azolve. Si se trata de superficies de taludes, la protección es a partir de llantas de desecho, apiladas horizontalmente; cuando no alcanzan se recurre a materiales suaves igualmente de desecho; o bien, costales rellenos de tepetate, siendo esta última opción la menos recomendable por su alto costo en materiales y mano de obra.

- *Drenes de captación y conducción de lixiviados.* Esta es la última tarea en la fase de construcción y se ejecutó como sigue:
 - Durante la colocación de la protección mecánica se tendió una hilera de costales rellenos de tepetate a tres hiladas de cada lado de los drenes, quedando perfectamente delimitados por ellos. Posteriormente, se barrió con agua a presión y/o aire la geomembrana de la superficie del dren y se colocó un paño de geotextil en toda su longitud. Inmediatamente se vació manualmente una cama de boleto de 4 *plg* de diámetro como mínimo libre de finos, finalmente se remató vaciando rocas de origen ígneo de la misma granulometría indicada para el boleto, libre de finos y cuyos cantos pudieron o no, tener aristas. En tanto los drenes quedaban inmersos en la masa de residuos, se cubrieron temporalmente con plásticos para evitar el ingreso de azolve a su interior. Concluido todo esto el relleno sanitario estuvo listo para iniciar operaciones el primero de abril de 1998.

4.7 OPERACIÓN

La operación en el Relleno Sanitario de Tlalnepantla de Baz inicia diariamente a las 6:00 *h* y termina a las 22:00 *h* durante los 365 días del año.

Ingreso. Los trabajos de operación comienzan con el ingreso de los vehículos al área de báscula donde se registran y pesan todos aquellos usuarios autorizados por la Dirección de Ecología del H. Ayuntamiento:

En esta etapa se registra:

- Hora de entrada
- Hora de salida
- Peso a la entrada
- Peso a la salida

Descarga. Ya en el frente de vertido los acomodadores de la empresa concesionaria le indican al conductor del camión el sitio donde debe depositar los residuos. Posteriormente, la unidad sale del frente de vertido y toma el camino señalado como salida para dirigirse directamente a la báscula.

Extendido y compactación. Esta actividad se desarrolla inmediatamente después de que algunos vehículos recolectores han vaciado sus residuos en el frente de vertido. Consiste básicamente en empujarlos con la hoja topadora de la maquinaria, la cual al ir avanzando sobre el talud de basura (con pendiente 4:1) comienza a elevar la cuchilla para perder bajo ésta una capa de aproximadamente 60 cm de residuos, que debido al efecto de las repetidas ocasiones en que se realiza esta actividad se compactan de manera inicial (Figura 4.5).



Figura 4.5 Vista del frente de vertido

Fuente: <http://www.fundacion-ica.org.mx>

Los trabajos de extender y compactar los residuos se circunscriben a un frente de vertido de 35 m de largo para dentro de él poder atender hasta 8 vehículos a la vez, pudiendo avanzar en dirección transversal al frente, la longitud necesaria según el ingreso de residuos.

La altura de la celda de proyecto es de 5 m conformada como sigue:

En temporada de lluvias:

- 4.5 m de residuos
- 0.5 m de material de cobertura

En temporada de estiaje:

- 4.75 m de residuos
- 0.25 m de material de cobertura

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

- Tractor y compactador
- Tractor y cargador
- Compactador y cargador

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

La cobertura de residuos se realiza con los trenes de rodaje de la maquinaria totalmente libres de residuos.

Particularidades de la cobertura en temporada de lluvias. Durante toda la temporada de lluvias se habilita cerca del área de operación prevista, un banco de material provisional el cual se bandeja y cubre con lonas para evitar que se moje. Sólo cuando las lluvias no permiten el acceso hasta el banco de material convencional, los requerimientos se cubren con el que se obtiene de este banco provisional, reponiendo el material extraído tan pronto como las lluvias lo permiten.

Si algún día la lluvia no permite cubrir con tepetate los residuos, éstos se cubren con lonas en la corona del talud para evitar la infiltración de agua a la masa, procediendo a su cobertura definitiva tan pronto como las condiciones climatológicas lo permitan, aún en jornada nocturna.

En caso de que la intensidad de la lluvia no permita el acceso de los camiones recolectores al frente de vertido; o bien, que éste resulte riesgoso por posibles derrumbes, deslizamientos, superficies de rodamiento resbaladizas, etc., la operación se cambiará inmediatamente a la celda de emergencia cuya localización depende del momento operativo del relleno.

Remate de la cobertura en bermas. Cuando ya se han concluido los trabajos de cobertura de residuos se procede a dar el remate final a la berma resultante, el cual consiste en un peralte en su parte externa de 40 *cm* mientras que en su parte interna es de 0 *cm*. Lo anterior forma una cuña que obliga a las aguas de lluvia a escurrir a lo largo del pie de los taludes sin desbordar por lugares no deseados.

Actividades complementarias. Colocación de pozos de biogas. En el plano de ubicación de pozos de biogas se detallan las coordenadas X,Y y Z de cada una de estas estructuras, las cuales son replanteadas en la celda donde se comenzará el vertido de residuos. Los pozos se fabrican a partir de tambos limpios de lámina que se perforan al tres bolillo en sus paredes, quedando listos para sobreponer y asegurar. Cada pozo se desplanta sobre una cama de basura de 2 *m* de altura, desde la primera plataforma de vertido. Una vez desplantado se llena su interior con boleto mayor a 4 *plg* de diámetro.

Colocación de malla de papeleo. La malla de papeleo se usa para interceptar los materiales que son arrastrados por el viento y está formada por tres secciones de 30 *m* cada una. Para instalarla se usan postes extremos sujetos por tirantes anclados al piso e intermedios sobre los que se fija mediante ganchos. Su ubicación depende de la dirección de viento (generalmente N-S).

Papeleo manual. Esta actividad consiste en levantar manualmente todos los papeles, bolsas, etc., que son arrastrados por el viento fuera del frente de vertido.

Extracción de llantas. Entre los residuos que ingresan al relleno sanitario es común encontrar llantas de desecho, las cuales no pueden ser debidamente compactadas ocasionando problemas en la operación diaria, por otro lado, éstas sirven de manera continua para la protección de la geomembrana en los taludes, así que se pone especial cuidado de extraerlas y almacenarlas adecuadamente para su uso posterior.

Control diario de niveles de relleno y cobertura. Para mantener una altura uniforme en las terrazas del relleno así como las pendientes adecuadas para la conducción de las aguas pluviales, es necesario un control diario de los niveles de relleno y cobertura en todo el frente de vertido.

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

Dren de captación de lixiviados en celda diaria. Estos drenes sirven para permitir el tránsito de lixiviados de una plataforma superior a otra subyacente, por lo que se construyen a partir de que la primera plataforma ha sido terminada.

Se perforan diariamente a todo lo largo del frente de vertido, exactamente al pie del talud de la basura. La perforación rompe la capa de cobertura del piso sobre el que se está trabajando hasta llegar a la basura de la celda inferior y el material producto del corte se aloja sobre el talud que durante ese día recibirá residuos.

Reportes de actividades. Todas las actividades que se realizan para la operación del relleno sanitario se deben reportar diariamente al jefe del servicio vía supervisores de área en los formatos correspondientes, que son:

- Reporte diario de maquinaria
- Reporte diario de camiones
- Reporte diario de personal

4.8 PROYECCIONES

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

Otra actividad imprescindible para la planeación del proyecto es el seguimiento topográfico, de cuyos registros se desprende el valor de la densidad alcanzada. Con estas dos herramientas, se construyen los planos constructivos en los que claramente se indica la secuencia de operación así como los tiempos de utilización en cada zona (Figuras 4.6 a 4.10).

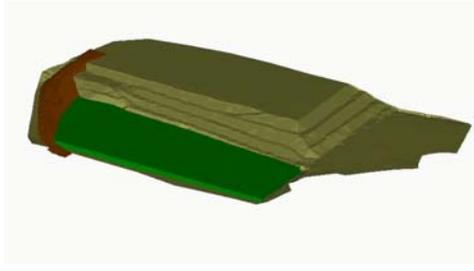


Figura 4.6 Proyección de la plataforma 1 en la celda 1

Fuente: <http://www.fundacion-ica.org.mx>

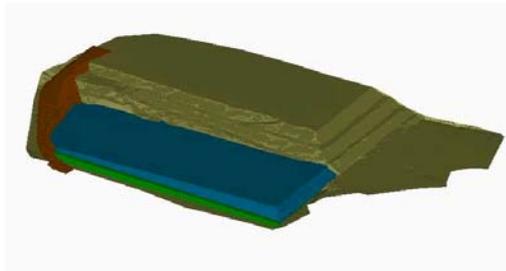


Figura 4.7 Proyección de la segunda plataforma en celda 1

Fuente: <http://www.fundacion-ica.org.mx>

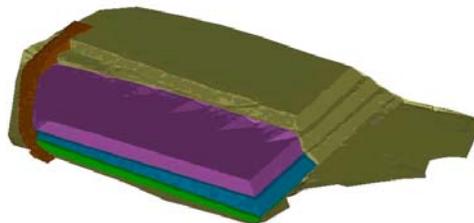


Figura 4.8 Proyección de la tercera plataforma en celda 1

Fuente: <http://www.fundacion-ica.org.mx>

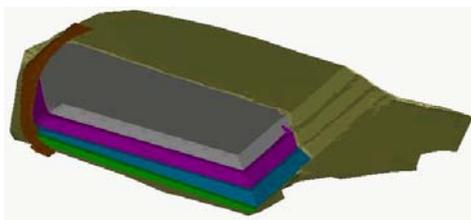


Figura 4.9 Proyección de la cuarta plataforma en celda 1

Fuente: <http://www.fundacion-ica.org.mx>



Figura 4.10 Vista de la construcción de acuerdo a proyecto.

Fuente: <http://www.fundacion-ica.org.mx>

4.9 TENDENCIAS

La degradación de la materia orgánica contenida en los residuos sólidos municipales, confinados en el relleno sanitario, produce cantidades importantes de biogas, cuya composición promedio se muestra en el Cuadro 4.1:

Cuadro 4.1 Composición de biogas

Composición %			
CH₄	CO₂	O₂	N₂
59.6	39.4	0.1	0.9

Fuente: <http://www.fundacion-ica.org.mx>

Se ve claramente que el compuesto que predomina es el metano; gas incoloro, más ligero que el aire, de baja solubilidad en el agua y altamente explosivo en concentración entre 5 y 15% por volumen de aire.

Aprovechando su característica de inflamabilidad, se están realizando estudios encaminados a la captación y quema para mitigación de olores, en una primera etapa.

Se propone la adecuación de los pozos existentes para una extracción pasiva, así como la instalación de quemadores individuales a la salida de cada uno de ellos. Los pozos de nueva creación se habilitarán desde el inicio con tubería de PVC, de 4 plg de diámetro y ranurada al tres bolillo.

En una segunda etapa se propone llevar el biogas a un quemador central.

El objetivo final es el aprovechamiento del biogas para la generación de energía eléctrica que pueda abastecer las propias instalaciones del relleno y sus equipos y el excedente comercializarlo por los medios y procedimientos pertinentes.

4.10 CLAUSURA, SANEAMIENTO Y REHABILITACIÓN DEL EXTIRADERO DE BASURA DE TLALNEPANTLA DE BAZ

Problemas detectados

- Incendios recurrentes
- Malos olores, y proliferación de fauna nociva
- Afloramiento de lixiviados en bermas, muros y taludes
- Encapsulamiento de biogas
- Inestabilidad de taludes
- Caminos de acceso inaccesibles

Objetivo de la rehabilitación y saneamiento

Estabilizar la masa de residuos evitando así posibles deslizamientos, y colocar sobre ellos una capa de sello adecuada para erradicar los incendios, malos olores, dispersión de materiales y la proliferación de fauna nociva, convirtiendo al sitio en un área verde que pueda incorporarse al entorno de manera armoniosa.

Proceso de rehabilitación y saneamiento

Etapas I

- Estudio topográfico de detalle en 16 ha de terreno.
- Estudio de geofísica para detectar espesores de residuos, contactos con el terreno natural y tipos de materiales.
- Proyecto ejecutivo.

- Captación y conducción de lixiviados hacia la laguna del relleno sanitario para su control. Longitud total del sistema implantado 320 m.
- Construcción de cunetas para captación y desvío de agua pluvial en 550 m.
- Acondicionamiento de caminos de acceso.
- Estabilización de taludes, incluyó el corte, carga, acarreo, conformación, bandeado y cobertura de 150,000 m³ de residuos.
- Perforación y habilitación de pozos de venteo de biogas.

Etapa II

- Estabilización de taludes cuyas alturas oscilan entre los 15 y 20 m, incluyó el corte, carga, acarreo, conformación y bandeado de 215,000 m³ de residuos.
- Conformación de bermas. Permite la circulación vehicular para mantenimiento futuro y la captación y conducción de aguas pluviales para su desalojo de manera controlada.
- Colocación de material de sello. Se colocó una capa de arcilla compactada en 60 cm de espesor, para evitar la filtración de agua de lluvia hacia el interior de los residuos. El área total trabajada fue de 140,000 m².
- Lavadero, cunetas y cárcamos. Se construyó un lavadero principal para el desalojo del agua de lluvia, así como cunetas en 750 m de camino de acceso.
- Camino de acceso. Su longitud total en esta etapa fue de 1300 m de terracería con bombeo suficiente para dar salida al agua de lluvia.
- Construcción de pozos de venteo de biogas de acuerdo al esquema mostrado.
- Siembra de especies vegetales silvestres propias de la región, sólo en algunas zonas, para su adecuación a las condiciones del sitio. El estado final del tiradero se muestra en la Figura 4.11.



Figura 4.11 Estado final del tiradero saneado y rehabilitado

Fuente: <http://www.fundacion-ica.org.mx>

V. INFRAESTRUCTURA, OPERACIÓN Y MONITOREO AMBIENTAL DEL RELLENO SANITARIO DE QUERÉTARO

5.1 DATOS GENERALES

El relleno sanitario se ubica al noreste de la ciudad de Querétaro, a una distancia aproximada de 15 km del centro de la ciudad, y a 6 km del límite de la mancha urbana, exactamente al lado poniente del antiguo tiradero municipal ubicado en la carretera satélite a Mompaní km 5+500 del ejido Tlacote el Bajo en el municipio de Querétaro.

El área del terreno es de 20 ha, con una capacidad máxima de 3 700 000 m³, para una población de proyecto de 640,000 habitantes y vida útil de 15 años para atender una generación promedio de 560 t/d.

5.2 INFRAESTRUCTURA DEL RELLENO SANITARIO

El Relleno Sanitario cuenta con la siguiente infraestructura:

- Malla ciclónica con guarnición por todo el perímetro de las 20 ha que corresponden al predio. Se complementa el cerramiento en el acceso principal, con una puerta metálica de 12 m de longitud, con sus guías en la base correspondiente. Esta cerca sirve también para crear la zona de amortiguamiento. La longitud de esta malla es de 2700 m.
- Oficinas administrativas equipadas.
- Caseta de vigilancia, tiene un área de 12 m² en el acceso al relleno sanitario y controla la entrada y salida de vehículos y a las personas que ingresan a las instalaciones.
- Báscula computarizada, se cuenta con una báscula electrónica de 70 t de capacidad, esta báscula lleva acabo el registro de la cantidad de residuos que ingresan al relleno, mediante el peso de los vehículos cargados y su posterior taraje a la salida.
- 2 Pararrayos.
- Estacionamiento público, en seguida del acceso principal y contiguo a las oficinas se cuenta con un estacionamiento.
- Estación meteorológica manual, donde todos los días a las 8 h se mide la temperatura ambiente, máxima y mínima, precipitación pluvial, evaporación, velocidad del viento, así como la observación de visibilidad, tempestad eléctrica, niebla, nevada o granizo.
- Almacén de lubricantes usados.
- Almacén de materiales.
- Tanque para el almacenamiento de diesel con una capacidad máxima de 11,000 L.

- Área de vestidores, baños y lockers.
- Área de lavado de maquinaria, que cuenta con compresora, hidrolavadora, herramienta menor, mangueras, etc. Todo ello para realizar un servicio adecuado de lavado de la maquinaria.
- Suministro de agua potable con depósito de 4 m de largo, por 3 m de ancho y 2 m de alto para almacenar y contener el agua suficiente para cubrir los servicios que demanda el relleno.
- Camino perimetral.
- Drenes pluviales.
- Señalamientos.

5.3 MAQUINARIA, VEHÍCULOS Y EQUIPO

Para llevar acabo las diversas actividades que se desarrollan en el relleno sanitario, se cuenta con el número y tipo apropiado de maquinaria y equipo, para lograr así la máxima eficiencia en la operación del relleno sanitario.

- Tractor
- Compactador
- Cargador
- Pipa de 10 m³
- 2 camiones de volteo de 7 m³
- Excavadora hidráulica
- Camionetas pick up, con capacidad de carga de 750 kg cada una
- 1 camioneta con capacidad de carga de 3.5 t, equipada con tanque de diesel, compresora y caja de herramientas
- Equipo de topografía para la determinación de niveles de operación, de avance y finales, que permite mejorar las condiciones de operación del relleno
- Torre de iluminación de 4000 W

5.4 OPERACIÓN DEL RELLENO

Diseño de la celda diaria

Los residuos vertidos diariamente constituyen la celda diaria de vertido que se forma con los residuos una vez conformados y compactados según las especificaciones técnicas del proyecto y con su capa de cobertura de material.

La celda diaria tiene una altura de 5 m con un largo variable de 15 a 20 m dependiendo de la zona a operar los residuos y con una capa de cobertura de 30 cm en época de estiaje y 50 cm en temporada de lluvias.

Las densidades de la masa de residuos que se manejan durante la operación son como mínimo las siguientes:

- Densidad inicial 0.7 t/m³ de residuos

- Densidad final 0.9 t/m^3 de residuos al paso de 5 años

Impermeabilización con geomembrana

Se impermeabiliza toda la base y taludes utilizando membrana sintética de 1 mm (0.4 plg) de espesor, de polímero de alta densidad. La base tiene una pendiente de 1:1 (H:V), una vez colocada la geomembrana se coloca una capa de 50 cm de material areno arcilloso compactado al 90% proctor, para recibir los residuos y evitar el tránsito del equipo pesado.

Drenaje de lixiviados

La red de drenaje está formada por red primaria y secundaria. La red primaria es la línea principal de la espina de pez que será la conexión con celdas posteriores (Fig. 5.1).

Los drenes se forman sobre la base de la celda, los cuales consisten en:

- La excavación (en cono V) de 40 cm de profundidad sobre la base de la celda, con una anchura de 1.20 m .
- Se arroja el dren y la capa de material compactado con geotextil de 200 kg/cm^2 .
- Se coloca piedra bola de 4 plg aproximadamente de diámetro sin aristas y sin finos sobre el dren.



Fig. 5.1 Drenaje de lixiviados

Fuente: <http://www.fundación-ica.org.mx>

Laguna para la captación de lixiviados

La laguna de captación de lixiviados se encuentra en el punto más bajo del relleno sanitario, la cual recibe los lixiviados conducidos por los drenes primarios y secundarios de las celdas. La laguna de lixiviados tiene una forma de un tronco de pirámide invertida, con las siguientes dimensiones:

- Base superior: $30 \times 34 \text{ m}$
- Base inferior: $24 \times 28 \text{ m}$

Se ha dimensionado de acuerdo a las siguientes premisas:

- Residuos sólidos totales de $3,694,278 \text{ m}^3$
- Superficie aproximada $175,000 \text{ m}^2$
- Pluviometría media anual 558 mm
- Cobertura final de 60 cm
- Tipo de material de cobertura, bastante impermeable
- Coeficiente de infiltración 0.3
- Capacidad de campo equivalente 100 L/m^2

De acuerdo con las dimensiones de la laguna y tomando en cuenta que la evapotranspiración alcanza niveles de más de 33 mm con temperaturas superiores a los 20°C , durante los meses de mayo, junio y julio y de 18°C en promedio en el resto del año, se tiene un alto grado de evaporación en la laguna.

También se recirculan a los diferentes frentes de trabajo, para acelerar el proceso de estabilización, lixiviados y de residuos sólidos; bajo este tratamiento los lixiviados tendrán un menor grado de agresividad, trayendo como consecuencia, la estabilización de los residuos sólidos.

De lo anterior, de manera gradual, se tendrán cantidades de lixiviados mínimas, controladas a partir de la recirculación y evaporación que, sumadas al hecho de trabajar en condiciones controladas de frente de trabajo cubierto, obras de captación y desvío de pluviales, se crea un esquema integrado que redundará en un mejor control y tratamiento de los residuos sólidos.

Pozos para el venteo del biogas

Los pozos para el venteo del biogas se fabrican tomando como molde, tambos metálicos de 200 L sin tapas y perforados. Los pozos se desplantan sobre una cama de residuos de 2 m de altura desde la primera plataforma de vertido, una vez que se ha desplantado uno de estos pozos, se llena su interior con boleto mayor a 4 plg de diámetro, teniendo la opción de llenarlos con rocas, cascajo, etc. Los pozos se colocan en arreglo tresbolillo con una distancia entre cada pozo de 45 m .

Sistema de protección y amortiguamiento

Se consideró en todo momento el apartado referente al impacto ambiental establecido en el reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Impacto Ambiental, en su artículo 10, respecto a los elementos que componen la modalidad general de la manifestación de impacto ambiental, solicitada en las bases. (Nota: esta modalidad corresponde al RLGEPA del tiempo en el que fue realizado este proyecto.)

Respecto a la zona de amortiguamiento, se tomó en cuenta la observación inicial de considerar como mínimo 10 m de ancho, después de la malla, respetando todas las especies originales de esta zona dentro de este margen, y con la intención de mantener intactas las condiciones naturales.

De igual forma, esta barrera sirve para mitigar algún efecto de ruido producido por el equipo y maquinaria utilizado en el relleno, así como de partículas suspendidas que pudiesen emigrar al exterior de las instalaciones.

Características del suelo:

- Profundidad del nivel freático del agua de 75 m
- Permeabilidad del suelo de $1.4 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$

5.5 MONITOREO AMBIENTAL

Monitoreo de biogas

Este programa especifica los parámetros que se analizan, equipos, técnicas empleadas, y la frecuencia de medición del punto de muestreo. Cada bimestre se monitorean diferentes pozos por un laboratorio certificado por la Entidad Mexicana de acreditamiento (EMA) (Cuadro 5.1).

Cuadro 5.1 Programa de monitoreo de los pozos de venteo de biogas

PARÁMETRO	EQUIPO UTILIZADO	FRECUENCIA DE MEDICIÓN
CH ₄	Cromatógrafo de gases	Bimestral por laboratorio
CO ₂	Cromatógrafo de gases	Bimestral por laboratorio
O ₂	Cromatógrafo de gases	Bimestral por laboratorio
NH ₃	Cromatógrafo de gases	Bimestral por laboratorio
Explosividad	Exposímetro	Bimestral por laboratorio y diaria por MMA
Flujo	Flujómetro	Bimestral por laboratorio y diaria por MMA

Fuente: <http://www.fundación-ica.org.mx>

Monitoreo de lixiviados

Este es un indicativo del proceso de estabilización de los residuos confinados en el sitio. Las muestras se extraen directamente de la laguna de evaporación de lixiviados y del cárcamo, los parámetros a determinar, la frecuencia de muestreo así como los equipos y las técnicas empleadas se indican en el Cuadro 5.2.

Cuadro 5.2 Programa de monitoreo de lixiviados

Parámetro	Equipo utilizado	Frecuencia [meses]
pH	Potenciómetro	3
Conductividad eléctrica	Conductivímetro	3
Temperatura	Termómetro	3
Sólidos totales	Mufla, crisoles, pipetas, Estufas	3
Sólidos volátiles	Mufla, crisoles, pipetas, Estufas	3
Sólidos suspendidos fijos	Mufla, crisoles, pipetas, Estufas	3
DQO	Refrigerante, matraces y pipetas	3
DBO ₅	Pipetas, frascos Winkler, bureta	3
Cadmio	Espectrofotometría por absorción atómica	3
Cobre	Espectrofotometría por absorción atómica	3
Cromo Total	Espectrofotometría por absorción atómica	3
Mercurio	Espectrofotometría por absorción atómica	3
Níquel	Espectrofotometría por absorción atómica	3
Zinc	Espectrofotometría por absorción atómica	3

Plomo	Espectrofotometría por absorción atómica	3
Arsénico	Espectrofotometría por absorción atómica	3
Cianuros	Aparato de destilación, parrilla eléctrica, espectrofotómetro de UV visible	3
Grasas y aceites	Bomba de vacío, filtros	3
Nitrógeno orgánico	Equipo Kjeldall, pipetas	3
N ₂ Amoniacal	Equipo Kjeldall, pipetas	3
Coliformes fecales	Tubos múltiples de fermentación	3
Coliformes totales	Tubos múltiples de fermentación	3

Fuente: <http://www.fundación-ica.org.mx>

Monitoreo del acuífero

Tiene como objetivo fundamental conocer la calidad del agua subterránea aguas arriba y aguas debajo del relleno. Con los parámetros conocidos en estos dos puntos se realiza una comparación entre ambos, debiendo ser similares sus características.

La ubicación de los pozos de monitoreo del acuífero es:

- Aguas arriba
- Aguas abajo

En este caso las características en estos puntos son similares por lo tanto se podría decir que no existe contaminación en el manto subterráneo de agua, pero si los resultados de la caracterización aguas abajo muestran una contaminación más alta que en el punto aguas arriba, se efectúa un muestreo adicional para confirmar los primeros resultados y con base a ellos determinar las acciones a seguir.

Los parámetros a determinar, frecuencia de muestreo, así como los equipos y las técnicas empleadas se indican a continuación. (Cuadro 5.3).

Cuadro 5.3 Programa de monitoreo del acuífero

Parámetro	Equipo utilizado	Frecuencia [meses]
pH	Potenciómetro	6
Conductividad eléctrica	Conductivímetro	6
Temperatura	Termómetro	6
Sólidos totales	Mufla, crisoles, pipetas, Estufas	6
Sólidos volátiles	Mufla, crisoles, pipetas, Estufas	6
Sólidos suspendidos fijos	Mufla, crisoles, pipetas, Estufas	6
DQO	Refrigerante, matraces y pipetas	6
DBO ₅	Pipetas, frascos Winkler, bureta	6
Cadmio	Espectrofotometría por absorción atómica	6
Cobre	Espectrofotometría por absorción atómica	6
Cromo Total	Espectrofotometría por absorción atómica	6
Mercurio	Espectrofotometría por absorción atómica	6
Níquel	Espectrofotometría por absorción atómica	6
Zinc	Espectrofotometría por absorción atómica	6
Plomo	Espectrofotometría por absorción atómica	6
Arsénico	Espectrofotometría por absorción atómica	6

Cianuros	Aparato de destilación, parrilla eléctrica, espectrofotómetro de UV visible	6
Grasas y aceites	Bomba de vacío, filtros	6
Nitrógeno orgánico	Equipo Kjeldall, pipetas	6
N ₂ Amoniacal	Equipo Kjeldall, pipetas	6
Coliformes fecales	Tubos múltiples de fermentación	6
Coliformes totales	Tubos múltiples de fermentación	6

Fuente: <http://www.fundación-ica.org.mx>

Monitoreo de partículas aerotransportables

Las partículas aerotransportables son ocasionadas por el viento, la circulación de los vehículos y la operación de la maquinaria.

Existen tres clases de partículas de interés para el monitoreo dentro del relleno sanitario, que son:

- Partículas suspendidas totales (PST)
- Partículas fracción respirable (PM-10)
- Partículas viables (aerobiológicas)

Los puntos en los que se realiza el muestreo de estas partículas son:

- En el frente de vertido
- Oficinas

Los parámetros y técnicas empleadas y frecuencia en el muestreo se comentan a continuación. (Cuadro 5.4).

Cuadro 5.4 Programa de monitoreo de partículas aerotransportables

Parámetro	Equipo utilizado	Frecuencia de medición
PST	Equipo para muestreo de alto volumen	Semestral por laboratorio
PM-10	Equipo para muestreo de alto volumen	Semestral por laboratorio
Partículas viables	Equipo Andersen para muestreo de partículas viables, equipo de laboratorio para determinación de UFC/m^3	Semestral por laboratorio

Fuente: <http://www.fundación-ica.org.mx>

Monitoreo de ruido y parámetros ambientales

Ruido. Este parámetro es indicativo de las condiciones de trabajo prevalecientes en el sitio, por lo que los lugares en los que se monitorea son:

- Frente de vertido
- Oficinas
- Almacén

En el relleno sanitario este parámetro se monitorea por personal de la EMA y por medio de un laboratorio autorizado. El control realizado por personal de la EMA es de frecuencia diaria y se reporta en la hoja de monitoreo ambiental correspondiente.

Parámetros ambientales

Diariamente se toman las lecturas en la estación meteorológica para contar con un registro histórico de los siguientes parámetros:

- Temperatura máxima
- Temperatura mínima

- Temperatura ambiente a las 8:00 h
- Precipitación diaria
- Evaporación diaria
- Velocidad y dirección de los vientos

Caracterización de los residuos

- Composición de los residuos
- Contenido de materia orgánica
- Contenido de cenizas
- Contenido de nitrógeno
- Contenido de azufre
- Contenido de humedad

5.6 VIDA ÚTIL ORIGINAL

Inicialmente la vida útil del actual proyecto se determinó a partir de los siguientes parámetros:

- Población servida: 550,000 habitantes
- Generación de RS por habitante: 0.65 kg/d
- Generación media: 360 t/d. Densidad inicial: 0.6 t/m³
- Densidad final: 0.900 t/m³
- Crecimiento previsto del 3% anual.
- Capacidad máxima: 3,100,000 m³
- Vida útil del sitio: 15 años

Se ha considerado para el desarrollo del relleno sanitario plataformas de 2.7 m de altura de residuos y 0.3 m de material de cubierta.

El vaciado para la preparación de la celda de vertido, consistió en la técnica de terrazas, dadas las alturas entre el terreno natural y el nivel de plantilla, lo cual restó considerablemente el volumen aprovechable y condicionó los niveles de piso de las celdas futuras.

Ampliación de la vida útil

La evolución histórica de disposición de residuos, en la cual se evidencia un incremento medio anual del 18.5%, rebasa por mucho el valor considerado en el proyecto inicial. (Cuadro 5.5).

Cuadro 5.5 Incremento porcentual de residuos sólidos no peligrosos generados.

INCREMENTO

Año	Ayuntamiento (%)	Particular (%)	Total (%)
1996			
1997	26.37	52.65	28.45
1998	12.12	174.37	27.38
1999	7.93	-6,32	5.05
2000	13.09	13.98	13.25
Media	14.88	58.67	18.53

Fuente: <http://www.fundación-ica.org.mx>

Se determinó ante esta situación, implantar una serie de medidas de ingeniería para modificar el proyecto ejecutivo inicial y ampliar la vida útil del sitio. Dichas medidas se mencionan a continuación:

- Proyección de los vaciados con taludes 1:1, y una pendiente uniforme del 2% en la plantilla de las celdas.
- Modificación de la altura de celda diaria de 3 m a 5 m, de esta manera se reduce considerablemente el avance diario del frente de vertido y como consecuencia, demanda de material de cobertura y equipo.
- La recuperación de material de cobertura de la celda diaria permite reutilizarlo y de esta manera reducir el volumen del mismo, eliminando las capas intermedias de material de cubierta, ya que este concepto representa un 15% de la capacidad total inicial.
- Un drenaje de lixiviados eficiente, en el interior de la masa de residuos, con esto se garantizaría una mayor estabilidad en el relleno, además de producirse mayores asentamientos diferenciales y por tal motivo la reducción de vacíos en el interior, se considera este factor ya que en la actualidad se reporta una generación de 15 L/min, que durante la vida útil del sitio representa un volumen importante aprovechable.
- Otro aspecto importante es el relacionado con la máxima altura de proyecto, ya que el relleno no rebasaría el nivel de terreno natural. Al modificar esta característica se tiene presente que las corrientes reinantes en dirección sur-oeste acarrearán materiales al exterior del predio, ocasionando problemas con los ejidatarios, ante tal situación se prevé la necesidad de instalar mallas para retener los susceptibles de arrastre y de esta manera establecer una cota de altura máxima.

Como resultado de implantar las medidas anteriores, se determinó el volumen máximo aprovechable de 3'900,000 m³ es decir un 25% más que el inicial.

Aún con el incremento en espacio aprovechable, el crecimiento en el tonelaje rebasa por mucho la capacidad del sitio, ya que de mantenerse en este orden, se estaría agotando la vida útil del sitio a finales del año 2006, lo cual nos obliga a determinar medidas

alternativas para garantizar los 15 años de servicio establecido en el contrato de concesión.

Adecuaciones al proyecto para incremento de vida útil

Una alternativa de solución a la necesidad de vida útil del sitio, es la de apoyarse en el área que comprende el antiguo tiradero, de 13 *ha*. Actualmente se realizan trabajos de vaciado de la macro celda 2; el material producto de excavación se dispone en el predio del extiradero, existiendo un proyecto de conformación de bancos. Al final de dicha obra será necesario actualizar la topografía y realizar las proyecciones correspondientes de aprovechamiento para determinar el incremento de la vida útil.

El volumen estimado de capacidad de esta alternativa es de 500,000 m^3 , considerando una cota de enrase 1912, es decir dicho volumen puede incrementarse aun más dado que al aprovechar el espacio del camino perimetral actual y ligar el actual sitio de vertido y el extiradero se generaría un área mayor a 10 *ha* en la corona, que también son susceptibles de aprovechamiento. Para establecer un valor más aproximado es necesario realizar las proyecciones correspondientes.

Saneamiento y clausura del antiguo tiradero

Condiciones iniciales

- Los residuos eran depositados sobre terreno natural
- Malos olores y fauna nociva, que son vectores de transmisión de enfermedades
- Mala operación de las masas de desechos
- Falta de sellado en la superficie final, lo que facilita la filtración de agua pluvial
- Afloración y encharcamiento de lixiviados en bermas y taludes (Fig. 5.2)
- Ausencia de dispositivos de ventilación



Figura 5.2 Afloramiento de lixiviados en el relleno sanitario

Fuente: <http://www.fundación-ica.org.mx>

Soluciones tomadas

- Captación y conducción de lixiviados
- Remoción de residuos y conformación de plataformas de acuerdo a proyecto
- Estabilización de taludes críticos
- Perforación e instalación de pozos de venteo de biogas
- Extendido de material de cobertura de sello final
- Extendido de material drenante
- Extendido de material orgánico
- Conducción de escurrimientos superficiales

Uso del suelo al término de la vida útil

El uso del suelo al final de la vida útil del relleno sanitario será área verde y no podrá construirse ningún tipo de edificio formal, como pudiera ser casa habitación, camino de tránsito pesado o edificios.

Esto se debe a que los residuos poseen una limitada capacidad de carga al presentar asentamientos diferenciales, que puedan afectar cualquier construcción, por lo que debe considerarse la construcción de estructuras ligeras, como es el caso de casetas, andadores, etc.

VI. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE RELLENOS SANITARIOS SOBRE MATERIAL CÁRSICO; EL CASO DE MÉRIDA, YUCATÁN

6.1 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS

El Relleno Sanitario de la Ciudad de Mérida, Estado de Yucatán, está desplantado sobre un terreno ubicado dentro del Municipio del mismo nombre a una distancia de 8 *km* del centro de la Ciudad. Las condiciones geológicas del subsuelo en este sitio corresponden a las que de manera general se encuentran en el resto de la península.

La Península de Yucatán es una unidad geológica constituida por sedimentos calcáreos marinos del Cenozoico. Representa una extensa planicie, con características morfológicas y estructurales bastante uniformes.

Los rasgos fisiográficos que presenta esta región son de tipo cársico y corresponden a un estado de erosión intermedio dentro del ciclo geomorfológico. En las calizas existen cavidades y conductos de disolución que pueden variar desde pequeñas oquedades hasta cavernas muy extensas.

A las formas cársicas que resultan del colapso de la frágil corteza de roca caliza, dejando al descubierto el manto de agua subterránea, se les conoce localmente como "cenotes".

Generalmente, la roca superficial está formada por una capa muy compacta cuyo espesor varía de 0 a 4 *m*, pudiendo llegar a alcanzar en ocasiones espesores mayores.

En muchas excavaciones realizadas en la península de Yucatán, se ha observado un material friable, blanquecino, denominado en la región como "sahcab", que significa en lengua maya "tierra blanca", que es una roca calcárea no consolidada, cuya consistencia parece indicar que el lodo calcáreo del cual procede se depositó como calcita, la cual nunca se recristalizó para formar una roca consolidada.

El espesor de este material suele variar de 2 a 4 *m* y generalmente se ubica subyacente a la capa superficial de caliza compacta y descansando sobre una de caliza suave.

De acuerdo a estudios realizados en la Ciudad de Mérida, las características geológicas son muy similares a las descritas anteriormente: el subsuelo está conformado por rocas calcáreas fosilíferas, de origen marino, heterogéneas por los procesos de formación, intemperismo y erosión que han experimentado.

Los procesos de formación han originado en general la siguiente estratigrafía:

- Una capa superficial resistente (laja) de espesor variable, pero relativamente delgada
- Calizas suaves del tipo de coquinas
- Capas de materiales no consolidados de textura terrosa (sahcab)
- Capas delgadas o lentes de arcilla interestratificados dentro de la caliza

El proceso de intemperismo está representado principalmente por fenómenos químicos que producen disolución de la caliza (acción cársica), y es causante de una gran cantidad de conductos y cavidades comunicadas entre sí y en algunas ocasiones al exterior. Es evidente que mediante este proceso se genera en el medio material un elevado índice de permeabilidad, Figura 6.1.



Figura 6.1 Cavidades y conductos de disolución generados por la acción cársica de la roca caliza

Fuente: <http://www.fundación-ica.org.mx>

Los procesos de erosión han provocado el transporte de los suelos vegetales superficiales, depositándolos en oquedades de la masa rocosa, formando bolsas de suelos blandos, conocidos como "coqueras".

La conformación de la estratigrafía generada por estos procesos es la que rige fundamentalmente el comportamiento mecánico de la masa rocosa. Debido a que estos accidentes geológicos tienen una distribución aleatoria, no es posible conocer sus dimensiones, profundidad y otras características locales, a menos que se realicen investigaciones particulares en cada sitio.

En el sitio considerado para desplantar el Relleno Sanitario de Mérida, la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán (FIUADY) realizó inicialmente estudios generales para conocer las características del subsuelo, mediante la perforación de 5 barrenos de exploración hasta 12 m de profundidad, Figura 6.2.

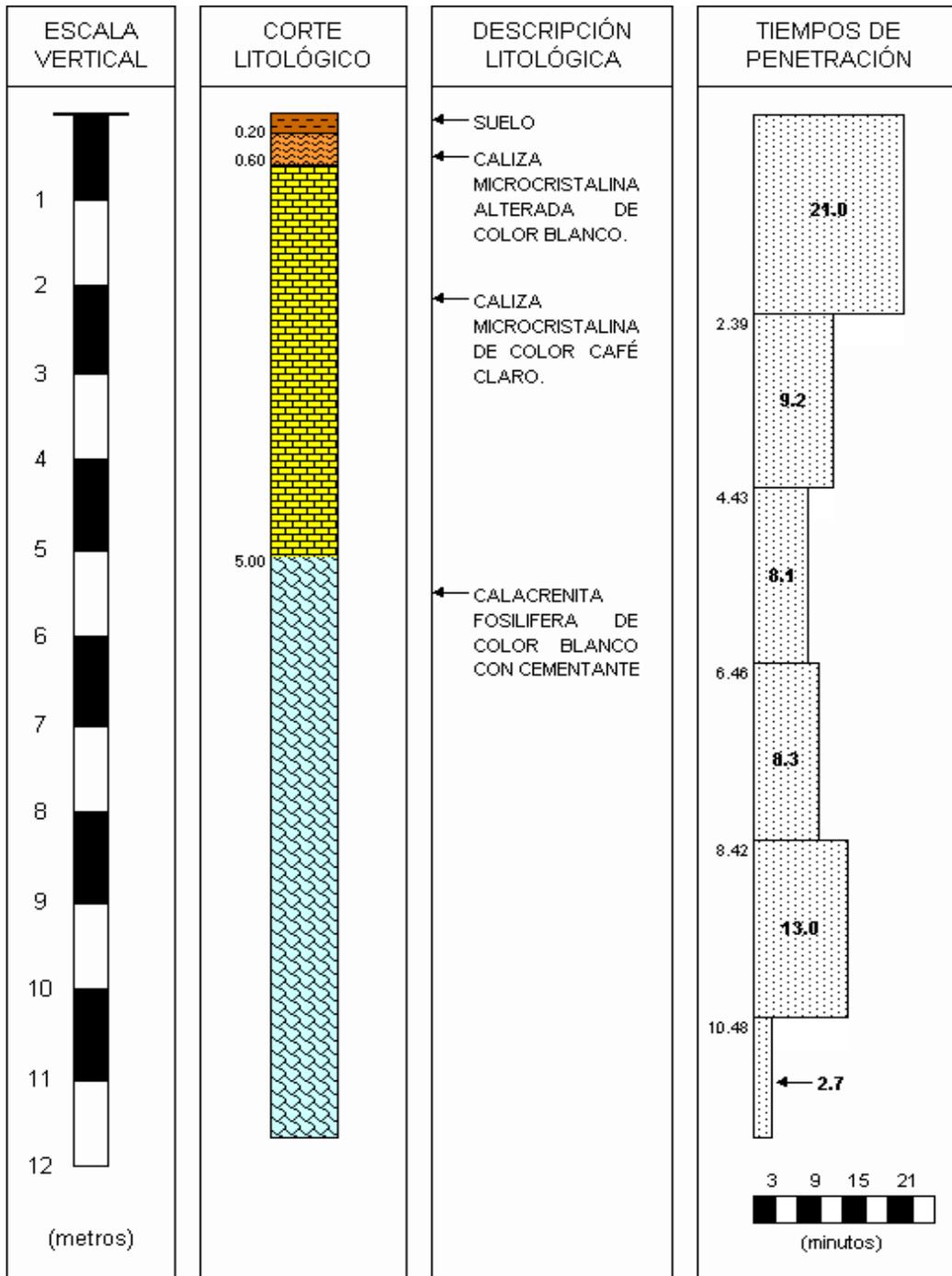


Figura 6.2 Pozo de Exploración no. 3 de los estudios preliminares realizados en el Relleno de Mérida

Fuente: <http://www.fundación-ica.org.mx>

Durante la exploración se tomaron muestras de roca que fueron analizadas para su descripción y se midieron los tiempos de penetración de la barrena para conocer la

profundidad de los cambios de los diferentes estratos del subsuelo.

El resultado obtenido es que en el sitio la roca es microcristalina en los primeros metros y por debajo sahcab. Se detectó también la presencia de coqueas rellenas por suelo residual arcilloso por decalcificación de la caliza.

Complementariamente, la FIUADY también realizó un estudio geofísico mediante 3 sondeos eléctricos verticales (SEV) con la finalidad de conocer las propiedades de transmisión de corriente eléctrica y resistividades aparentes. Los SEV se ubicaron de tal manera que se pudiera obtener información de todo el terreno propuesto para el desplante del proyecto, a fin de obtener una correlación significativa de las capas geoelectricas del subsuelo hasta una profundidad de estudio de 80 m.

De los resultados de estas pruebas se identificó una correspondencia aceptable con los resultados obtenidos mediante las efectuadas con los barrenos de exploración. Se identificaron principalmente 4 capas relacionadas con las características principales del subsuelo, la primera conformada por caliza microcristalina o fosilífera localizada arriba del nivel de aguas freáticas (NAF); la segunda capa por calcarenita o sahcab saturado con agua dulce; la tercera capa por caliza masiva fracturada y con conductos de disolución; y la cuarta capa por material calcáreo con alto contenido arcilloso y agua de alto contenido salino.

A fin de tener mayor certidumbre respecto a la continuidad de los estratos rocosos del subsuelo y poder también definir la capacidad de carga del terreno en el sitio considerado para al Relleno Sanitario, se realizó un estudio de mecánica de suelos que involucrara el área de las ocho celdas que considera el proyecto, mediante la perforación de 10 barrenaciones, obteniéndose los siguientes resultados.

No se detectaron cavidades en los sondeos realizados; se detectó una capa superficial de suelo orgánico en un promedio de 52 cm; las capas subyacentes a ésta están conformadas por roca caliza en diferentes grados de cementación, que se traduce en una variabilidad del medio material a la resistencia a la compresión simple, desde capas de roca caliza blanda, con valores de 6 kg/cm², en estratos debajo de los 5 m de profundidad, hasta capas de roca caliza dura, con valores de 150 kg/cm², predominando ésta sobre todo en las capas superficiales.

Los estratos en su interior muestran alguna inclusión de sahcab, así como lentes de cancab (tierra roja) detectados en 3 barrenaciones, determinándose que por su profundidad y su espesor (20 cm en los tres casos), no representan riesgo alguno en la capacidad de carga del estrato rocoso.

Asimismo se calculó la capacidad de carga admisible del terreno, siendo ésta de 12 kg/cm², afectado este valor por un factor de seguridad de tres.

6.2 GEO-HIDROLOGÍA

En la Península de Yucatán no existen corrientes superficiales de agua, debido a que la alta permeabilidad de la roca caliza genera una rápida penetración del agua hacia los mantos subterráneos, que además son muy someros.

La erosión producida por el agua forma conos de disolución en la superficie, y puede generar también conductos y cavernas subterráneas, dentro de las cuales el agua fluye con una pendiente prácticamente paralela al relieve del terreno, que es casi horizontal.

El suelo vegetal en la zona es escaso, sobre todo en las zonas de mayor permeabilidad, donde el agua se desplaza con mayor facilidad a estratos profundos, dando lugar a las coqueas. El sentido del flujo es radial, del centro de la Península hacia las costas, donde se ha detectado la presencia de manantiales de agua dulce; la alta permeabilidad del estrato rocoso genera rápida penetración del agua superficial hacia el manto subterráneo.

En el terreno destinado para la construcción del Relleno Sanitario de Mérida se detectó que el flujo subterráneo se dirige hacia el poniente y norponiente del sitio, esto es del centro de la ciudad hacia las costas del norte y poniente de la rívera peninsular y con un gradiente promedio de 1.42×10^{-4} .

Apoyados en las barrenaciones realizadas para los estudios de mecánica de suelos, se efectuó la medición de la profundidad del nivel freático, obteniéndose que el promedio de ésta en el sitio es de 6.93 m.

También se realizó en el sitio una prueba para determinar el potencial de infiltración en la zona no saturada, es decir hasta una profundidad menor al nivel freático. La prueba consistió en infiltrar agua hasta 6.45 m en barrenos perforados para ese fin y que previamente se estudió su litología durante la perforación. El proceso de saturación duró aproximadamente 24 h en cada barreno. Posteriormente se realizaron las mediciones para medir el flujo de infiltración, obteniéndose un valor promedio general de 0.197 L/s.

6.3 GENERACIÓN DE RESIDUOS

Tomando como referencia los datos estadísticos de población del INEGI (1996), se consideró como base de cálculo inicial para la ciudad de Mérida una población de 636,187 habitantes; por otro lado, se consideró el índice de generación de residuos en la zona de Mérida, que según la SEDESOL (1995), es de 0.876 kg/hab/d.

No obstante que estos valores nos arrojan una generación diaria de residuos de 557 t/d, el Ayuntamiento de Mérida estableció en las bases de la licitación un volumen mínimo de ingreso de residuos al Relleno Sanitario de 450 t/d durante el primer año de operaciones. La diferencia representaba el volumen de residuos generados en domicilios no atendidos por los grupos recolectores o los que de alguna manera no eran entregados a éstos debido a las prácticas indebidas de algunos habitantes de la ciudad (depósito en terrenos baldíos, quema, etc.); en algunos casos por la falta de conciencia o educación ambiental; en otros por evitar el pago del servicio; y en la mayoría por ambos motivos.

Con base en una proyección aritmética a partir de los censos de población de 1980 y 1990, durante los 15 años de vida útil del proyecto, se estimó una generación media de 579 *t/d*, considerando una generación per cápita de 0.8 *kg/hab/d*.

Los datos reales de ingreso de residuos en el Relleno Sanitario de Mérida han mostrado cierto apego con las estimaciones preliminares, aunque con ciertas variantes por ciertas situaciones que a continuación se explican.

Durante los primeros cuatro meses de operaciones (noviembre de 1997 a febrero de 1998) ingresaron un total de 31,771 *t*, lo que representa un promedio diario de 305 *t*. No se puede considerar a este periodo como representativo ya que durante éste se continuó operando el exbasurero municipal en los turnos nocturnos, lo que representó que una buena cantidad de residuos no ingresara al relleno Sanitario.

De marzo de 1998 (cuando se cerró de manera definitiva el anterior sitio de disposición final de residuos) a diciembre del mismo año ingresaron 130,573 *t*, lo que representó un promedio diario de 502 *t*. Para el año de 1998 se había considerado un ingreso promedio de 530 *t/d*.

En 1999 ingresaron 180,483 *t*, que significó un promedio diario de 578 *t*. Para este mismo periodo se estimó un ingreso diario promedio de 540 *t*. El incremento se debió a la reorganización en cuanto a la zonificación de las rutas de recolección municipal a principios de agosto de 1998, la cual mostró parte de sus beneficios al incrementar de 89,753 a 138,709 los predios atendidos en la ciudad.

Durante el año 2000, ingresaron 191,509 *t*, que representan un promedio diario de 614 *t*, a diferencia de las 551 *t* estimadas antes del inicio de las operaciones para el mismo año. En este periodo se incrementó la cobertura del servicio de recolección al pasar del 85% del año anterior al 91% en el año 2000, lo que significó también un incremento en el número de toneladas que ingresan diariamente al Relleno Sanitario. De tal manera, al mes de diciembre del mismo año, ingresaron al Relleno Sanitario en condiciones ambientalmente seguras un total de 534,336 *t* desde su puesta en marcha el 3 de noviembre de 1997.

6.4 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El sitio destinado para la construcción del Relleno Sanitario se ubica aproximadamente a 8 *km* en dirección oeste del centro de Mérida, fuera del anillo periférico de la ciudad, el sitio se localiza adyacente a la planta de composta y separación, a 1.5 *km* del periférico.

Como justificación de la elección del sitio se consideraron los siguientes aspectos: Inicialmente se determinó un área global, dentro del Municipio para preseleccionar los sitios probables para el proyecto; para realizar esto, se tomaron en cuenta los diversos factores especificados en la Norma Oficial Mexicana NOM-083-ECOL-1996, que establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales.

Dada la uniformidad en la morfología de la estructura del subsuelo que existe en toda la superficie del municipio, uno de los principales criterios que se utilizó para la selección del área global fue la dirección de flujo del acuífero, así como las distancias a las zonas de captación de agua potable y a las áreas naturales protegidas. Por lo tanto, el área seleccionada fue la situada fuera del anillo periférico de la ciudad, al oeste y noroeste del municipio.

Dentro de esta área global, el sitio elegido se mostró como la mejor opción debido a que los vientos dominantes proceden del este y del sureste, la dirección del flujo del agua subterránea es del sureste hacia el noroeste, y al hecho fundamental de que el sitio fue expropiado en 1987 exprofeso para destinarse a la construcción de la planta para el procesamiento y disposición final de los desechos sólidos de Mérida. Además, cumple con todos los criterios establecidos en la Norma de referencia, con excepción de las características del subsuelo, ya que el tránsito de infiltración natural es mayor a lo establecido en la normatividad ($3 \times 10^{-3} s^{-1}$); no obstante y de acuerdo a lo que la misma norma permite, se puede garantizar mediante obras de ingeniería, que no existirá conexión de la superficie con los acuíferos subterráneos.

El área del terreno destinado a la construcción del Relleno Sanitario es de 29.13 *ha*, de las cuales se utilizarán en total 18.77 *ha* para la disposición de los residuos sólidos; el resto de la superficie está destinada para la habilitación de la infraestructura complementaria del proyecto, así como el área que ocupa la planta de separación y composta.

La superficie destinada para la disposición de desechos está dividida en ocho celdas, no todas con las mismas dimensiones debido a la irregularidad de la superficie del terreno.

El procedimiento establecido para la operación del Relleno Sanitario se clasifica como de "área", debido a las mencionadas condiciones del subsuelo, ya que además de buscar que los residuos se depositen lo mas alejado posible del acuífero subterráneo, resulta, por otro lado, que el excavar en roca representaría la erogación de gastos que por sí solos volverían al proyecto inviable, sin considerar que también esta actividad retrasaría considerablemente los trabajos de construcción e implementación de cada celda. Debido al empleo de este procedimiento de operación, el Relleno Sanitario crece en forma vertical, a partir prácticamente del nivel de terreno natural, evitando las excavaciones en el sitio.

El volumen crece en forma piramidal, Figura 6.3, con pendientes de talud exterior con una relación horizontal-vertical de 3:1, hasta lograr la altura máxima del proyecto, que será de 30 *m* una vez que se hayan ocupado las ocho celdas. A la mitad de la altura se forma dentro de la geometría que van formando los residuos, una berma perimetral de 8 *m* de ancho.

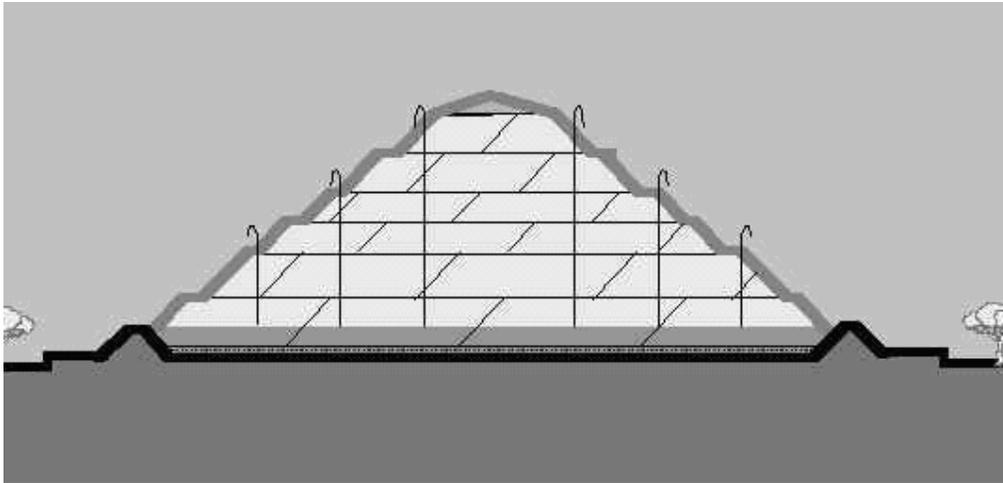


Figura 6.3 Corte transversal del Relleno Sanitario de Mérida

Fuente: <http://www.fundación-ica.org.mx>

Además de las celdas de disposición de residuos, el proyecto completo consta de obras complementarias que se requieren para la buena operación del sistema de disposición final:

- *Cerca de malla ciclón.* A fin de evitar el acceso al terreno de cualquier persona o vehículo ajenos al proyecto, así como cierto tipo de fauna, el sitio cuenta en todo su perímetro con una protección de malla ciclónica.
- *Control de acceso.* Sitio a partir del cual se vigila el ingreso al sitio de cualquier persona o vehículo a fin de mantener la seguridad de las instalaciones.
- *Báscula electrónica.* Con capacidad de 30 t y plataforma con dimensiones de 10 x 3 m, para el registro de todas las unidades que ingresan para descargar residuos. Está conectada a una computadora que mediante un software especializado permite almacenar todos los registros emitidos por el sistema de pesaje.
- *Oficinas administrativas.* Para albergar al personal que desempeña actividades de administración y supervisión se dispone con oficinas que cuentan con los servicios e instalaciones necesarias para realizar tales funciones.
- *Cobertizo de maquinaria.* Área establecida para realizar el mantenimiento de los vehículos utilizados en la operación del Relleno Sanitario, así como para el resguardo de la herramienta y equipo menor, almacenamiento temporal de combustible y lubricantes, etc. Consta de un área de 10 x 6 m, cubierta con estructura metálica, adicionalmente muros de block y piso de concreto. El área para el almacenamiento de combustibles y lubricantes está cercada y cuenta con un cárcamo colector que almacenaría los productos en caso de algún probable derramamiento.

- *Cortina arbórea.* Se cuenta con un área de amortiguamiento consistente en zonas de preservación y reforestación con especies vegetales de la región y que se localiza en todo el perímetro del área de disposición de residuos, abarcando un ancho de 7 m.
- *Camino perimetral.* La vía de acceso que los vehículos utilizan para ingresar a la celda que se encuentre en operación consiste en un camino que inicia desde la entrada a las instalaciones y rodea toda la zona establecida para la disposición de residuos; tiene 7.5 m de ancho y está conformada por una estructura de terracerías para dar nivelación, capa base de 25 cm y carpeta asfáltica de 5 cm de espesor. Este camino se va construyendo de acuerdo al mismo ritmo de avance de habilitación de las celdas.
- *Celdas.* Áreas definidas e identificadas para la disposición de residuos sólidos. Se construyen en el orden secuencial definido en el proyecto ejecutivo, cuando por la capacidad ocupada en la anterior es necesaria la habilitación de una siguiente. Están delimitadas por un bordo perimetral que se desplanta paralelo al camino pavimentado, que además de delimitar cada celda, otorga al volumen conformado de residuos, la estabilidad necesaria contra deslizamiento horizontal.
- *Dren de lixiviados.* Se instala a fin de conducir los lixiviados de cada celda hasta la zona de menor nivel. Está conformado por un tubo de polietileno de alta densidad de 6 plg de diámetro, perforado longitudinalmente en tres hileras equidistantes. La tubería ya instalada se hace rodear por material granular a manera de filtro que se mantiene a lo largo de toda la tubería cubriéndola con material sintético tipo geotextil.
- *Cárcamo de lixiviados.* En la zona más baja de cada celda se construye un cárcamo de concreto que permite almacenar los lixiviados, éstos son bombeados ya sea para recircularlos dentro de los mismos residuos o para enviarlos a la laguna de evaporación.
- *Laguna de evaporación.* A fin de reducir el volumen de lixiviados generados en las celdas, uno de los tratamientos empleados es la evaporación por exposición a la energía solar, colocando los lixiviados en una laguna impermeabilizada. La radiación del sol genera que la parte líquida del lixiviado se evapore, quedando únicamente la fracción sólida, la cual es retirada cuando se logra secar completamente la laguna y enviada como residuo sólido hacia la celda que se encuentre en operación.

El sistema de impermeabilización de las celdas y de la laguna de evaporación de lixiviados representa un aspecto fundamental del proyecto, ya que como ya se ha mencionado, el subsuelo del sitio está constituido por materiales altamente permeables que de manera natural excede el tránsito de infiltración permisible, por lo que el diseño del Relleno Sanitario ha planteado la utilización de materiales sintéticos que garanticen que no existirá comunicación de la base de la celda con el acuífero subterráneo. Este sistema está conformado por una doble capa de geomembranas de polietileno de alta

densidad (HDPE); la superior funcionará directamente en contacto con los lixiviados cuando éstos circulen a través de la capa de filtro y sobre la capa de HDPE hacia el cárcamo; la inferior funciona como una segunda garantía a fin de contar con un mayor factor de seguridad contra la contaminación del subsuelo y el acuífero subterráneo. Las dos capas de HDPE se combinan con el mismo número de capas de geotextil a fin de proteger a las primeras contra posibles daños. Entre las dos capas de geomembrana también se coloca una capa intermedia formada con arena limosa a fin de proporcionar el medio filtrante que complementaría la geomembrana inferior, además de que funciona como una capa de separación.

De tal manera que en orden ascendente, la sección completa de la base de cada celda queda comprendida por las siguientes capas:

- *Terreno natural.* Se realizan los movimientos de tierra necesarios a fin de proporcionar las cotas de terracerías establecidas en el proyecto ejecutivo, que a su vez generan las pendientes suficientes que garanticen el adecuado flujo hidráulico en la base de las celdas.
- *Capa de nivelación.* Sobre el nivel de terracerías se coloca una capa de sahcab de 20 cm en promedio, conformada y compactada a fin de lograr una superficie firme y lisa donde pueda instalarse el sistema impermeable.
- *Geotextil 200 g/m².* Se extiende en rollos de 6 m de ancho sobre toda la superficie conformada, incluyendo los taludes interiores de los bordos perimetrales, uniéndola en sus extremos con aire caliente.
- *Geomembrana 1 mm.* Capa inferior colocada sobre el geotextil, casi de manera simultánea, Figura 6.4. Se une en sus extremos por termofusión, salvo en algunas zonas donde el equipo de unión no tiene las condiciones de espacio y forma para hacerlo, por lo que en esos casos se utiliza el método de extrusión.



Figura 6.4 Instalación de geomembrana de polietileno de alta densidad

Fuente: <http://www.fundación-ica.org.mx>

- *Capa intermedia.* Conformada de arena limosa, con un espesor de 20 cm, se tiende sobre la capa de geomembrana, se nivela y compacta, cuidando que en el

proceso no se maltrate el material impermeable y evitando que algún vehículo toque directamente dicho material.

- *Geomembrana 1.5 mm.* Capa principal de impermeabilización de la base de cada celda. Se coloca inmediatamente después de la capa intermedia, cuando ésta ya ha sido compactada al porcentaje especificado.
- *Geotextil 470 g/m².* Material instalado sobre la capa superior de geomembrana a fin de protegerla contra posibles daños por punzonamiento o rasgado.
- *Material filtrante.* Capa de grava con granulometría de 2 *plg* a malla #4, no caliza y sin finos que funciona como filtro para que a través de ella percolen los lixiviados hacia el dren principal de conducción y/o al cárcamo colector. A partir de esta última capa se podrán depositar ya los residuos dentro de la celda.

6.5 CONSTRUCCIÓN DEL RELLENO SANITARIO

La habilitación de cada celda del Relleno Sanitario implica la construcción de diferentes estructuras y ejecución de diversas actividades que tienen por fin proporcionar las áreas de disposición de residuos, cumpliendo con las especificaciones de proyecto para que la estructura final cuente con el nivel de calidad suficiente que garantice la estabilidad de la celda así como su impermeabilidad.

Estas actividades se pueden dividir en las siguientes:

- *Limpieza del terreno.* De acuerdo a la configuración geométrica indicada en el proyecto ejecutivo, se delimitan las colindancias de cada celda y de las obras adyacentes, como bordos perimetrales y caminos. Posteriormente se realiza el desmonte y despalle del área, eliminando por completo la capa de suelo que contenga materia orgánica, por lo que la superficie se dejará a nivel de estrato de roca. Durante estas actividades se realiza una separación de productos, que serán utilizados con diferentes fines: fragmentos de roca y material inerte que puede ser empleado como terracerías en los trabajos de movimientos de tierras para dar las cotas de proyecto; tierra orgánica que se emplea en la capa final del Relleno Sanitario, cubriendo los taludes definitivos; troncos y hierba, que podrán ser integrados a la cobertura final si se trituran. Con esta limpieza se logra obtener una superficie libre de materia orgánica y estable para recibir las capas subsecuentes.
- *Nivelación topográfica.* Ya con la superficie limpia se realiza un levantamiento topográfico, tanto en planimetría como en altimetría estableciendo cadenamientos al menos a cada 10 *m* de separación en ambos sentidos. Con el plano de curvas de nivel, se determina primero el área donde se ubicará el cárcamo de lixiviados, siendo esta zona la más baja del área que esté sobre la parte exterior de la celda, es decir la parte que colinda con el camino perimetral. Utilizando las cotas de terreno natural, se corroboran los niveles finales de proyecto, y en su caso se realizan las modificaciones necesarias a fin de determinar las cotas definitivas, teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Se deben garantizar las pendientes sobre la base de la celda en un porcentaje mínimo de 0.4%, de tal manera que todos los escurrimientos dentro de cada celda confluyan hacia la zona mas baja, es decir donde se ubicará el cárcamo.
 - Se debe reducir al mínimo posible el movimiento de tierras dentro de la celda, sobre todo los cortes, por lo que debe aprovecharse la configuración topográfica del área.
- *Movimiento de tierras.* Una vez definidos los niveles de terracerías se procede a conformar la superficie de la celda, cortando o terraplenando según sea el caso. Para este último caso, se debe rellenar con material de banco tipo sahcab y/o con el material inerte sobrante de la limpieza del terreno, en capas de 20 cm compactadas por medios mecánicos, utilizando para ello un vibrocompactador. En caso de requerir cortes para lograr los niveles de terracerías, se deben emplear martillos hidráulicos o rompedoras neumáticas; en ningún caso se debe recurrir al uso de explosivos, ya que éstos pueden alterar la estructura y resistencia del terreno.
- *Construcción de capa de nivelación.* A fin de lograr una superficie fina que pueda recibir a los materiales sintéticos del sistema impermeable, se construye una capa de nivelación sobre la superficie de terracerías, utilizando para ello material de banco tipo sahcab fino con tamaño máximo de partículas de $\frac{3}{4}$ plg. El material se tiende con motoconformadora logrando las cotas establecidas para esta capa y que son 20 cm arriba de las definidas para terracerías; posteriormente se compacta utilizando vibrocompactador hasta lograr un índice de 90% de acuerdo a la prueba Porter modificada.
- *Construcción de bordos perimetrales.* Los bordos perimetrales pueden ser de dos tipos: definitivos y temporales. Los primeros se construyen en los lados de la celda que estén en la parte exterior de la misma, es decir adyacente al camino perimetral. Los segundos se construyen en los lados interiores de la celda, o sea los que son contiguos a otras celdas, ambos bordos tienen una sección trapezoidal. Los definitivos tienen una base de desplante de 8.50 m, su corona es de 1 m y tiene pendientes de talud de 3:1 para el caso del talud interior (hacia el interior de la celda) y de 2:1 para el caso del talud exterior. Su altura mínima es de 1.5 m a partir del nivel de terreno natural, por lo que el área de su sección es al menos de 7.125 m². De acuerdo al proyecto ejecutivo, los bordos temporales tienen una base de desplante de 1.8 m, su altura mínima es de 0.6 m, su corona de 0.6 m y con una inclinación en ambos taludes de 1:1. No obstante, por proceso constructivo se puede considerar su ejecución con una sección mayor, dándole más inclinación a los taludes, debido a que la motoconformadora generalmente no puede cortar los taludes en una inclinación de 45°. De tal manera que la base del bordo queda ampliada. Para la construcción de los bordos es necesario tender y conformar con motoconformadora el material tipo sahcab en capas de 20 cm a fin de que el proceso de compactación llegue a todo el espesor mediante el empleo de un vibrocompactador. Las capas van reduciendo su ancho conforme el nivel del bordo crece hasta el límite del ancho

del equipo empleado en la conformación y compactación. Una vez que los bordos han alcanzado su altura máxima, se realiza una excavación al centro de su corona, de 60 cm de ancho y 60 cm de profundidad, utilizando para ello una retroexcavadora equipada con cucharón. El ancho de éste debe ser menor al ancho de la zanja a fin de que pueda afinarse el corte manualmente. La función de la zanja es el alojamiento y anclaje del sistema impermeable a fin de evitar su deslizamiento horizontal hacia dentro de la celda. Una vez que se ha realizado la excavación de la zanja de anclaje, los taludes de los bordos se cortan con motoconformadora; así mismo y a fin de lograr una superficie más fina, se compactan transversalmente con vibrocompactador.

- *Instalación del sistema impermeable.* Cuando se cuenta ya tanto con la capa de nivelación como con los bordos perimetrales, incluyendo su zanja de anclaje, se procede a la instalación del sistema impermeable, iniciando siempre en la parte más alta de la celda. Primero se tienden los rollos de geotextil de 200 g/m², otorgándoles un empalme mínimo de 10 cm para que puedan ser unidos utilizando para ello aire caliente. El material, al igual que el resto de geosintéticos, se coloca cubriendo las paredes de la zanja de anclaje, así como el talud interior del bordo perimetral y la capa de nivelación. Una vez unidos los lienzos de geotextil, se procede a la instalación de la capa inferior de geomembrana, dándole a los rollos un traslape mínimo de 10 cm a fin de que puedan ser unidos por termofusión. Todos los paños deben traslaparse en todas las pendientes, de modo que el paño superior descansa sobre el paño inferior. No deben extenderse más rollos de los que puedan ser soldados en un mismo día. La colocación de los paños se determina considerando la pendiente aguas arriba. Generalmente la instalación se inicia desde el punto más elevado dentro de la celda, de modo que si llueve, el agua se desplace a los puntos de más bajo nivel; esto evita que haya agua por debajo de la geomembrana. Los paños de geomembrana deberán ser desenrollados, usando métodos que no dañen, tensen o tuerzan al material y que además no se dañe el sustrato donde va a ser instalado el geosintético. Cada rollo puede desenrollarse manualmente, aunque para agilizar el proceso puede auxiliarse de un cargador sobre neumáticos y aparatos especialmente diseñados que se colocan en los extremos del rollo y en los soportes del traxcavo, de tal manera que sea posible colocar los paños en su posición sin que ruede el equipo sobre el geosintético. En tanto no se unan los paños y a fin de evitar que el viento levante la geomembrana, ésta debe lastrarse en sus orillas, utilizando balastros que no dañen al material. El sistema de lastre comúnmente empleado consiste simplemente en bolsas o costales con arena fina (tamaño máximo de agregado de 1/8 plg), como medida de cuidado estricto, no debe permitirse el tráfico vehicular directamente sobre la geomembrana. Ya en posición los rollos de geomembrana y antes de realizar la soldadura, debe realizarse una inspección visual para detectar posibles daños ocasionados durante la manufactura, el transporte o la instalación, determinando, en caso de que se detecten, si éstos pueden repararse por cualquier sistema de soldadura, o si requiere sustituirse algún tramo del rollo. Posteriormente debe verificarse que las orillas de la geomembrana, donde se realizará la soldadura, se encuentren totalmente limpias y secas. En superficies planas o en aquellas donde no existen cambios bruscos de pendiente, se recomienda el empleo del sistema de soldadura con equipo de fusión con cuña caliente. Estos equipos de

soldar deben ser automáticos, autopropulsados y con los aditamentos necesarios para dar las temperaturas y presiones requeridas para fundir y pegar. Atrás de las cañas calientes el equipo cuenta con dos juegos de rodillos que ejercen presión sobre el área fundida, de tal manera que se genera una doble unión en la sobreposición, separada una de la otra. El espacio que queda entre las dos fusiones forma un conducto vacío que sirve para realizar las pruebas necesarias para verificar la hermeticidad de las soldaduras. La prueba se realiza de acuerdo al siguiente procedimiento: primeramente se sellan ambos extremos del conducto vacío que va a probarse; posteriormente se presuriza aire en ese conducto mediante el empleo de una bomba de aire, manual o de motor, capaz de generar una presión constante de 25 *psi*. El aire se inyecta utilizando una aguja conectada a la bomba hasta lograr la presión mencionada; posteriormente se cierra la válvula y se mantiene la presión en el conducto al menos por 5 *min*. Si durante ese tiempo, la presión tiene una caída mayor o igual a 2 *psi* o no se estabiliza, se deberá localizar y reparar la falla, volviendo a realizar la prueba hasta que se logre mantener la presión durante el intervalo de tiempo especificado. Posteriormente se retira la aguja y se sella el orificio mediante soldadura por extrusión. La soldadura por extrusión se utiliza para realizar reparaciones o en aquellas zonas donde existen cambios bruscos de pendiente. Antes de realizar cualquier soldadura por este método es necesario achaflanar todo el material en un ancho mínimo de 1.5 *mm* utilizando una lijadora orbital. La soldadura consiste en aplicar un extrudado del mismo material del que está hecha la geomembrana en la unión precalentada de los paños, al mismo tiempo que se aplica presión con la misma soldadora. Cuando ya se han realizado las pruebas y antes de colocar la capa intermedia, debe realizarse una inspección visual de toda el área para asegurarse que no existan daños o soldaduras no reparadas. Ya que se ha colocado la capa inferior de geomembrana en su posición, la trinchera de anclaje debe rellenarse parcialmente, cuando mucho hasta la mitad de su profundidad, a fin de que no se levante en las orillas. El relleno se realiza utilizando el mismo material obtenido del corte de la misma trinchera y se recomienda que se haga en las horas del día en que exista menor temperatura ambiental (cuando el geosintético está contraído) a fin de evitar tensionamiento de la geomembrana cuando ésta se encuentre anclada. Sobre la capa inferior de geomembrana se coloca la capa intermedia como se describe en el inciso que sigue, para que después de ésta se instalen las capas superiores de geomembrana y geotextil, siguiendo los mismos procedimientos y recomendaciones utilizadas en la colocación de las capas inferiores. Ya que se ha completado el sistema impermeable, debe completarse el relleno de la trinchera de anclaje, enrasándolo y compactándolo hasta el nivel de la corona del bordo perimetral.

- *Construcción de capa intermedia.* Para la colocación de esta capa se requiere preparar un acceso a la celda donde se proteja la geomembrana ya sea con arena fina o con geotextil. Inicialmente se coloca el material del que estará formada la capa intermedia al principio del acceso a la celda y se tiende con equipo ligero de afuera hacia adentro formando un camino. Debido a que no debe circular ningún vehículo directamente sobre la geomembrana, los camiones que transportan la arena limosa deben entrar a la celda en reversa, circulando sobre la arena ya tendida previamente, de tal manera que con el nuevo material

descargado se continúe cubriendo toda la geomembrana con arena; al mismo tiempo, este material se va conformando en el espesor especificado en el proyecto (20 cm) con la ayuda de una motoconformadora. El material debe cubrir toda el área de geomembrana, incluyendo los taludes interiores de los bordos perimetrales, la capa deberá compactarse mecánicamente hasta lograr un índice de compactación de 90% de acuerdo a la prueba Porter Modificada.

- *Sistema de conducción, captación y evaporación de lixiviados.* El sistema para el manejo de lixiviados comprende la construcción de diferentes estructuras y la ejecución de diversas actividades que tienen por objeto asegurar su adecuada filtración, conducción, captación y evaporación.
 - **Filtración.** Sobre la capa superior de geotextil se coloca material de filtro constituido por una capa de 15 cm de espesor de grava con especificaciones particulares, que facilite el drenaje de los lixiviados hacia las obras de conducción y captación.

La grava, de acuerdo al proyecto ejecutivo debe cumplir los siguientes requisitos:

Granulometría: Bien Graduada.

T.M.A.: 2".

Contenido de arena: Máximo 10%.

Contenido de finos: 0%.

Forma: Redondeada, sin aristas (de canto rodado).

Tipo de roca: No caliza.

Debido a que este tipo de materiales no se encuentra en la península de Yucatán, es necesario recurrir a bancos de explotación en otras localidades. Para el caso del Relleno Sanitario de Mérida se transportó grava del Estado de Tabasco.

Para la instalación del material se utilizan camiones de volteo de 7 m³ de capacidad, equipados con tolva metálica para la descarga controlada del material, de tal manera que se va esparciendo una capa relativamente uniforme para conformar el espesor especificado, para lo cual se mide con escantillones de madera conforme el camión va descargando el material. Posteriormente se enrasa manualmente con rastrillos hasta lograr el espesor uniforme. El camión circula sobre la capa superior de geotextil y bajo ningún caso debe permitirse que lo haga sobre la grava ya instalada a fin de evitar esfuerzos puntuales sobre la capa de geomembrana.

- **Conducción.** A fin de eficientar el drenaje de lixiviados hacia el cárcamo colector, se instala sobre la capa superior de geotextil una tubería de 6 plg de polietileno de alta densidad perforada en tres hileras equidistantes. Generalmente se ubica sobre el cadenamiento donde se ubica el cárcamo, atravesando toda la celda, aunque puede instalarse además en otras zonas de la celda que puedan funcionar como cauce.

Para instalar la tubería es necesario que desde la capa de terracerías se forme una zanja de sección triangular donde se pueda alojar la tubería.

Para formar una tubería única es necesario unir los tramos de tubo utilizando el método de soldadura por termofusión.

Antes de colocar la tubería, se instala una franja de geotextil de 200 g/m^2 a lo largo de toda la zanja; posteriormente se coloca la tubería y se cubre con grava para filtro, también a todo su largo; finalmente se envuelve la tubería y la grava con la franja de geotextil, por lo que ésta deberá tener el ancho suficiente para que pueda realizarse dicho envolvimiento. Esto sirve para que la tubería tenga un filtro adecuado y no se azolve con los sólidos que pudieran ingresar al tubo a través de las perforaciones. La tubería debe llegar al fondo del cárcamo y debe cubrir el largo de su base.

- **Captación.** En la zona de menor elevación dentro de la celda se construye un cárcamo colector que permita almacenar temporalmente los lixiviados generados en cada celda. El cárcamo, que tiene geometría de una pirámide truncada invertida de base cuadrada, se construye de concreto armado con una resistencia $f'c$ igual a 300 kg/cm^2 y un espesor de 10 cm . Su base mide $5 \times 5 \text{ m}$ y tiene una altura de 1.27 m . Sus taludes tienen una inclinación con proporción 3:1. Todo el cárcamo es cubierto con el sistema de impermeabilización.

Dentro de él se instalan dos tuberías de 18 plg de polietileno de alta densidad, la primera queda dentro de la capa intermedia y tiene la función principal de monitorear que la capa principal de geomembrana esté funcionando adecuadamente. Esta tubería es soldada herméticamente a ambas geomembranas. La segunda se coloca sobre la capa superior de geotextil, dentro de la capa de grava y su función es la de poder instalar dentro de ella una bomba sumergible que permita la extracción de lixiviados fuera del cárcamo.

Las tuberías se instalan a partir de la corona del bordo perimetral y corren a lo largo del talud interior del mismo y sobre el fondo del cárcamo, por lo que se requiere soldarle un codo que le permita el cambio de dirección necesario.

- **Laguna de evaporación de lixiviados.** Está constituida por un estanque impermeabilizado que permite el almacenamiento temporal de lixiviados en tanto éstos son evaporados de manera natural por medio de la radiación solar. Su proceso de construcción es similar al de las celdas, ya que consta de trabajos de limpieza del terreno, nivelación topográfica, movimientos de tierra, capa de nivelación, construcción de bordos perimetrales y sistema de impermeabilización. No requiere filtro de grava, tuberías de conducción ni cárcamo. Los bordos perimetrales tienen dimensiones diferentes a los construidos para las celdas: su altura mínima es de 2 m y sus taludes tienen una inclinación de 45° .

Por otro lado, consta de un sistema impermeable de triple seguridad, conformado en orden ascendente de las siguientes capas a partir de la capa de nivelación:

- geotextil de 200 g/m^2
- geomembrana de 1 mm
- capa intermedia de arena limosa de 15 cm de espesor
- geomembrana de 1 mm
- capa intermedia de arena limosa de 15 cm de espesor y
- geomembrana de 1.5 mm

6.6 CONTROLES AMBIENTALES

- *Manejo de lixiviados.* A partir de la acumulación de lixiviados en los cárcamos de captación, a éstos se les bombea para extraerlos y enviarlos a la laguna a fin de que mediante la radiación solar se evapore el agua que contiene. Se han observado reducciones de hasta 1 mm/d en temporadas de intensa radiación solar. Como proceso alterno, se pueden hacer recircular los lixiviados sobre las celdas de disposición final, con el propósito de proveer a los residuos la humedad necesaria a fin de que la fracción orgánica se degrade más rápidamente, logrando también que parte de los lixiviados se acumulen en la superficie y se evaporen. Este proceso se realiza una vez terminada la etapa de lluvias.
- *Manejo de biogas.* El control de la migración de biogas se logra mediante la implantación de pozos de venteo, los cuales son construidos a base de una tubería de polietileno de 15 cm de diámetro, perforada en toda su longitud en tres hileras. Alrededor del tubo se le coloca grava a fin de permitir una capa filtrante por la cual el pozo capte el biogas cercano. Los pozos se colocan en una distribución de 2 por hectárea, de acuerdo a lo establecido por la normatividad correspondiente.
- *Control de fauna.* A través de la instalación de un dispositivo que emite una detonación sonora, se evita que la fauna conformada por aves se acerque a los residuos.
- *Control de residuos arrastrados por el viento.* A fin de reducir el volumen de residuos ligeros que puedan ser arrastrados por el viento fuera del área de la celda diaria, se instrumentan cercas móviles construidas con estructura metálica y malla. Se colocan rodeando el frente de trabajo, a contrasentido de la dirección del viento.
- *Control de polvos.* Durante los días secos, se provee a la cubierta diaria la humedad suficiente a fin de reducir la generación de polvos, regando ya sea con lixiviados o con agua en las superficies de rodamiento, esto es, en plataformas y rampas de acceso.

CONCLUSIONES

Con el desarrollo de este trabajo se puede observar que nuestro país enfrenta una gran problemática en la disposición de los residuos sólidos municipales, esto se debe sobretodo, al rápido crecimiento de las ciudades, a la tendencia de la población a abandonar las zonas rurales e ir hacia los centros urbanos, a la falta de educación ambiental y a la limitada capacidad del medio ambiente para mitigar la contaminación que genera la inadecuada disposición de los residuos entre otros.

En los últimos años la problemática de los residuos sólidos municipales ha llamado poderosamente la atención de los funcionarios encargados de la prestación de los servicios públicos; en cuatro décadas la generación de residuos se ha incrementado aproximadamente 9 veces, además ahora los residuos en su mayoría son inorgánicos, esto se debe a la costumbre de consumir artículos desechables.

En nuestro país la generación de residuos sólidos varía de 0.68 a 1.4 *kg/hab/d*, el valor superior representa la generación en zonas como el Distrito Federal y el Estado de México. En el Cuadro C.1, se observa que Baja California Sur (BCS) es el estado que menos residuos genera a nivel nacional, Distrito Federal y Estado de México, tienen valores de generación mayores, pero es importante ver que BCS tiene una extensión territorial mucho mayor y su población es menor.

Cuadro C.1

ENTIDAD FEDERATIVA	EXTENSIÓN TERRITORIAL [km ²]	POBLACIÓN [Habitantes]	GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES [Miles de toneladas]
Baja California Sur	74646.25	424041	145.7
Distrito Federal	1964.38	8605239	4350.7
Edo. de México	21608.13	13096686	5310.9

Fuente: INEGI. Marco Geoestadístico

En cuanto a la recolección, se estima que únicamente el 83% del total de los residuos generados son recolectados y solo el 53% se deposita en sitios controlados, el resto se deposita en tiraderos a cielo abierto o en sitios clandestinos. Por lo antes expuesto es urgente abandonar los viejos esquemas de manejo de residuos para adoptar nuevas tecnologías que nos permitan vivir en equilibrio con el medio ambiente.

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

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

Nuestro país cuenta con aproximadamente 65 rellenos sanitarios que operan satisfactoriamente, pero aún quedan aspectos por desarrollar como es el aprovechamiento del biogas o el tratamiento de los lixiviados, que en la misma medida que este tipo de instalaciones cobren importancia, se obtendrán avances tecnológicos nacionales que permitan hacerles frente.

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

Para tener una buena respuesta se debería revisar, adecuar y, en su caso, elaborar instrumentos regulatorios que incentiven la minimización y el manejo ambiental de los residuos sólidos municipales así como fortalecer a las instituciones encargadas de la gestión integral de los mismos para que cumplan eficientemente con su misión de proteger la salud humana y el equilibrio ecológico y garanticen el uso eficiente de sus recursos, además de llevar a cabo programas de capacitación y educación dirigidos a funcionarios públicos y a la sociedad en general, con la finalidad de frenar y revertir los procesos ambientalmente inadecuados, así como profesionalizar la gestión de los residuos involucrando en particular al sector privado y al conjunto de la sociedad.

Un ejemplo de esto lo estamos viviendo día a día con la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal, la falta de infraestructura, de información, de educación así como la irresponsabilidad e inconciencia de los habitantes ha afectado la buena marcha de esta Ley, debido a que se hace caso omiso a las instrucciones dadas. Esta Ley obliga a separar nuestros residuos en orgánicos e inorgánicos y su propósito es reducir la generación éstos a través del reciclaje. La solución al problema de los residuos sólidos es disminuir al máximo la generación de residuos, ésta a través de la aplicación de las tres R: Reducir, Reutilizar y Reciclar. Tal vez no tenemos claro el significado de cada uno de estos conceptos y la falta de información nos empuja a no cumplir el objetivo de dicha Ley. Estos conceptos se relacionan entre sí de tal manera que uno está en función del otro. Reciclar, es aprovechar los materiales que fueron desechados y que aún sirven para elaborar otros productos o refabricar los mismos; reutilizar es volver a darle un buen uso a algún material y reducir es disminuir, entonces así podemos concluir que efectivamente se relacionan uno con el otro. Si se reciclan los residuos, entonces se reutilizan y si se reutilizan, entonces se reduce la generación de estos.

Hace falta tener respeto al medio ambiente y conseguir una educación ambiental desde temprana edad, para lograr que los residuos que se desechen sean realmente los que ya no tienen algún uso y así propiciar un hábito hacia el reciclaje.

En el Municipio de Tlalnepantla de Baz, Estado de México, las autoridades decidieron poner en funcionamiento un relleno sanitario que cumpliera con todos los preceptos de las Normas Oficiales Mexicanas en materia de ecología, cuya ubicación, construcción y equipamiento implica el empleo de la más alta tecnología en este campo. La operación de los residuos que ingresan es altamente tecnificada, ágil y segura, con lo cual se logra

cambiar de manera radical la óptica sobre el manejo de residuos que la población en general tiene, dignificando, además, el trabajo de las personas que a ello se dedican.

El relleno sanitario del Municipio de Querétaro, a sus más de 4 años de operación, constituye una solución óptima tanto técnica y económicamente, debido a que a la fecha se han recibido 807,829 t de residuos de forma segura, siendo esta cifra superior a las previstas por el proyecto original. Lo anterior es posible ejemplificarlo de la siguiente manera: Para el primer año de operación se estimaron un promedio de 360 *t/día* de generación de residuos que serían dispuestos en el relleno y actualmente se reciben un promedio de 460 *t/día* lo que representa un aumento del 18.5% por lo que el relleno supera significativamente las expectativas iniciales del proyecto. Por otro lado, las adecuaciones realizadas al proyecto original permitirán incrementar de manera significativa los volúmenes de residuos sólidos que serán dispuestos en el relleno, permitiendo aumentar aún más la vida útil prevista en el proyecto inicial.

Por otro lado, el relleno sanitario de Mérida, Yucatán ha contado con la valiosa participación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán. Desde los estudios previos, en la elaboración de la manifestación de impacto ambiental y en las etapas de construcción y operación, los especialistas han contribuido para analizar y verificar el cumplimiento del proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

Libros

- ❖ Alba B. Vázquez González, Enrique Cesar Valdez, *Impacto ambiental*, IMTA, Facultad de Ingeniería, 1994.
- ❖ George Tchobanoglous, Hilary Theisen, Samuel A. Vigil, *Gestión integral de residuos sólidos*, Volumen I, Mc Graw Hill, España, 1994.
- ❖ J.G.Henry, G.W. Heinke, *Ingeniería Ambiental*, Segunda edición, Prentice Hall, México, 1999
- ❖ Rodolfo Trejo Vázquez, *Procesamiento de la basura urbana*, Trillas, México, 1994.
- ❖ SEMARNAT, Guía para la gestión integral de los residuos sólidos municipales, México, 2001.
- ❖ SEMARNAT, Minimización y manejo ambiental de los residuos sólidos, México, 2001.

Leyes, Reglamentos y Normas

- ❖ Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.
- ❖ Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.
- ❖ Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal.
- ❖ NOM-083-ECOL-1996

Páginas en internet

- ❖ <http://www.cepis.org>
- ❖ <http://www.fortunecity.es>
- ❖ <http://www.fundación-ica.org.mx>
- ❖ <http://ine.gob.mx>
- ❖ <http://inegi.gob.mx>
- ❖ <http://www.sedesol.gob.mx>
- ❖ <http://www.semarnat.gob.mx>
- ❖ <http://www.tenax.com>