



ALTERNATIVAS DE RELLENOS SANITARIOS
- GUÍA DE TOMA DE DECISIÓN -



Relleno Sanitario: Tipo tradicional



Relleno Sanitario: Tipo "seco"



**Relleno Sanitario: Combinado con
tratamiento mecánico-biológico**



Relleno Sanitario: Tipo operación manual

Gobierno del Estado de México
Secretaría de Ecología
Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación del Agua, Suelo y Residuos

M. en C. Arlette Lopez Trujillo
Secretaría de Ecología

M.V.Z. A. Ricardo Sánchez Rubio
Director General de Prevención y Control de la Contaminación del Agua, Suelo y Residuos

Arq. Onésimo Reyes Martínez
Subdirector de Prevención y Control de la Contaminación del Suelo y Residuos

Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH

Dr.-Ing. Günther Wehenpohl
Coordinador del Proyecto de Apoyo a la Gestión de Residuos Sólidos

Ing. Sandra Spies
Asesora del Proyecto

Autores:

Dr. Manfred van Afferden
Dra. Anne Hansen
M. en I. Orlando Quintero
M. en I. Luis Angel Barrera Morteo
M. en I. Verguinia Petkova
M. en I. Mintcho Iliev
Ing. Sandra Spies
Dr. en Ing. Günther Wehenpohl

IMTA - Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
IMTA
IMTA
IMTA
IPOTARSA - Ingeniería de Potabilización y Tratamiento de Aguas Residuales S.A. de C.V.
GTZ
GTZ

Fotos de la capa: (1) G. Wehenpohl; (2) IMABE; (3) FABER-AMBRA®; (3) OPS/OMS, Secretaría de Salud

© Secretaría de Ecología del Gobierno del Estado de México, 2002

© Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, 2002

Se autoriza la reproducción parcial o total, citando la fuente de referencia.

INDICE

0. Resumen Ejecutivo	1
1. Introducción	3
2. Objetivo	4
3. Descripción técnica y funcional de los procesos	4
3.1 Relleno sanitario tradicional (húmedo)	4
3.1.1 Descripción general	4
3.1.2 Riesgos ambientales	7
3.2 Relleno seco, pretratamiento de alta compactación	10
3.2.1 Descripción general	10
3.2.2 Riesgos ambientales	12
3.2.3 Impacto sobre el relleno sanitario	12
3.3 Pretratamiento mecánico-biológico de los residuos sólidos municipales	13
3.3.1 Descripción general	13
3.3.2 Riesgos ambientales	14
3.3.3 Impacto sobre el relleno sanitario	16
3.4 Relleno Sanitario Manual	17
3.4.1 Descripción general	18
3.4.2 Riesgos ambientales	20
4. Compatibilidad de las alternativas con la normatividad vigente en México	20
5. Evaluación técnica y ambiental de las alternativas	21
6. Literatura	25

Lista de Figuras

Figura 1:	Relleno sanitario tradicional, preparación de una celda diaria	5
Figura 2:	Esquema estructural de un relleno sanitario con principales componentes	6
Figura 3:	Relleno seco, manejo de las pacas	10
Figura 4	Sistema de compactación de los residuos Sólidos Municipales	11
Figura 5:	Pretratamiento mecánico-biológico de residuos sólidos en pilas	14
Figura 6:	Relleno manual	18

Tablas

Tabla 1:	Conclusiones de la evaluación técnica, ambiental y económica para las cuatro alternativas	2
Tabla 2:	Evaluación técnica de las alternativas	23
Tabla 3	Evaluación de impacto ambiental de las alternativas	24

Lista de abreviaturas

COT	Carbón Orgánico Total
DBO ₅	Demanda Biológica de Oxígeno en 5 días
DQO	Demanda Química de Oxígeno
EDOMEX	Estado de México
GTZ	Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit mbH
NOM	Norma Oficial Mexicana
RSM	Residuos Sólidos Municipales
SEGEM	Secretaría de Ecología del Gobierno del Estado de México

0. Resumen Ejecutivo

La evaluación de las cuatro alternativas de tratamiento de residuos sólidos municipales (RSM) demuestra que el relleno sanitario tradicional en la mayoría de los casos analizados es el más factible técnicamente para los escenarios de municipios grandes y medianos. Ya que su operación es sencilla por necesitar equipo convencional, además por la experiencia que existe de su manejo y por su bajo costo.

La tecnología del “relleno seco” con un pretratamiento de alta compactación, aparte de su complejidad técnica y un costo de inversión relativamente elevado, puede competir económicamente con el relleno tradicional. Este relleno tiene su mayor ventaja en la reducción del volumen que puede ser realizada independiente del sitio de disposición combinándolo por ejemplo con plantas de transferencia, pero prorroga el tiempo de control de pos clausura por el tiempo de degradación del material.

El pretratamiento mecánico-biológico presenta mejores ventajas por sus mínimos riesgos ambientales a largo plazo por la estabilización de RSM antes de su disposición final, así como, en la reducción del volumen de los residuos sólidos municipales, el cual tiene como resultado la utilización de un área menor para la disposición final. La tecnología requiere un terreno más amplio durante su operación, que puede ser el factor limitante en zonas de alta densidad de población. En contraparte, esta tecnología es la que causa menos riesgos ambientales. Los escenarios evaluados en este estudio no incluyen estaciones de transferencia, los cuales son comunes para conceptos de manejo de RSM regional. Por tal motivo, los costos específicos no dependen del transporte de RSM de las estaciones de transferencia al relleno sanitario. Para el pretratamiento mecánico-biológico, que reduce el peso de los RSM en un 40%, el factor del transporte puede jugar un papel importante para la factibilidad económica de esta tecnología, aplicada para conceptos regionales.

El relleno sanitario manual es un método de disposición final bajo ciertas condiciones: municipios de menos de 30,000 habitantes y/o en zonas de baja población donde se deposita menos de 20 toneladas diariamente. El factor determinante es que no es necesario adquirir maquinaria pesada para la operación del relleno lo que contribuye a mantener un nivel de costo relativamente bajo. Se usa principalmente la mano de obra, y el sitio de disposición final cuenta con los elementos básicos de un relleno sanitario tradicional, excepto de geomembrana y maquinaria. Ambientalmente es la forma más sencilla de las tres alternativas comparadas si se considera que el relleno tradicional, el relleno seco y el sitio de disposición del material mecánico-biológicamente pretratado se confina en un sitio impermeabilizado con geomembrana.

Tabla 1: Conclusiones de la evaluación técnica y ambiental para las cuatro alternativas

Evaluación	Relleno Tradicional	Relleno “Seco” / Pretratamiento de alta compactación	Pretratamiento Mecánico- Biológico	Relleno Sani- tario Manual
Técnica	+++	+	++(+)	+
Ambiental	++	+	+++	+(+)

1. Introducción

El crecimiento urbano ha propiciado un incremento en la generación de residuos provenientes de actividades que se desarrollan en casas habitación, sitios de servicios privados y públicos, construcciones, demoliciones, establecimientos comerciales y de servicios.

La gestión de los residuos sólidos, desde el lugar de la producción hasta su disposición final, incluye varias etapas relacionados con el almacenamiento en situ, recolección, transferencia y transporte, procesado y disposición final de los mismos. El manejo integral de los desechos sólidos se debe de realizar de una manera eficiente y ordenada para proporcionar la solución más adecuada, en concordancia con los mejores principios de salud pública, economía, ingeniería, estética, aceptación social y preservación ambiental.

El concepto de disposición final se centra principalmente en el manejo de residuos sólidos municipales (RSM) y no en las barreras artificiales o naturales alrededor del relleno. Los RSM tienen que alcanzar un estado "inerte" de modo que las emisiones del relleno sean compatibles con el ambiente por períodos a largo plazo independientemente de las capacidades de retraso y atenuación de los materiales a su alrededor.

Un principio importante en la política de manejo de RSM es que cada generación humana maneje sus propios residuos a una calidad que no afecte a las generaciones posteriores. Como resultado de esta política, los rellenos sanitarios deben alcanzar su estado "inerte" de disposición final en aproximadamente 25 a 30 años después de la disposición.

Los principales problemas que enfrentan los Departamentos de Servicios Municipales están relacionados con la aplicación de tecnologías apropiadas para procesado y la selección de sitio para disposición final de los desechos.

La Secretaría de Ecología del Gobierno de Estado de México (SEGEM), a través del "Proyecto de Apoyo a la Gestión de Residuos Sólidos Municipales en el Estado de México" ejecutado en ámbito de la Cooperación Técnica Alemana a través de la Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, tiene como uno de sus objetivos la elaboración de estudios sobre el manejo de residuos sólidos al nivel de municipios. Estos se pueden emplear como una herramienta de información, sensibilización y decisión para las autoridades municipales. Uno de estos estudios es el presente documento denominado: **"Alternativas de Rellenos Sanitarios – Guía de Toma de Decisiones –"**.

En el estudio se comparan dos diferentes alternativas de pretratamiento: el de alta compactación y el de mecánico-biológico, integrando la disposición final, con el fin de facilitar la selección de alternativa más factible para el tratamiento y la disposición de los RSM en función de las condiciones locales. Aparte se presenta el relleno sanitario manual como método de

disposición final apto para comunidades urbanas de menos de 30,000 habitantes que no tienen forma de adquirir equipo pesado, y/o para áreas donde se deposita menos de 20 toneladas diarias.

2. Objetivo

El objetivo principal del presente estudio es:

La evaluación técnico-ambiental de alternativas de procesamiento y disposición final de los RSM, más utilizadas en el ámbito de los países en desarrollo, las cuales son:

Métodos de disposición final:

- Relleno Sanitario Tradicional
- Relleno Sanitario Manual

y dos formas de pretratamiento, previo a la disposición final:

- Relleno seco “Pretratamiento de RSM de alta compactación”
- Pretratamiento mecánico-biológico de RSM

3. Descripción técnica y funcional de los procesos

Cada una de las alternativas a presentar demuestra una solución viable bajo ciertas condiciones como lo económico, el espacio disponible para la obra y el tratamiento, la participación social, la disposición de maquinaria pesada, las condiciones del suelo, la vida útil del sitio de disposición final y otras más.

Por lo siguiente, se explican las características de dos métodos de pretratamiento en combinación con la disposición final, así como dos formas de disposición final sola, lo que da una herramienta para la toma de decisiones en dado caso.

3.1 Relleno sanitario tradicional (húmedo)

3.1.1 Descripción general

Esta tecnología consiste en la disposición final de los residuos sólidos generados por comunidades rurales y urbanas a nivel municipal de tal forma que la disposición final en el suelo

no cause perjuicio al medio ambiente y molestias o peligros para la salud y seguridad pública. Con esta tecnología se coloca la basura en celdas o en capas compactadas, cubiertas con tierra arcillosa, utilizando maquinaria pesada para la distribución, homogeneización y compactación (Figura 1). Antes de llenar el sitio de esta manera, se prepara el suelo del futuro relleno para evitar a lo máximo la infiltración de líquidos lixiviados en el suelo. Es posible usar una geomembrana, que es una lámina de plástico de alta densidad que funciona como una olla, o se compacta el suelo existente que debe de ser de tipo arcilla o tepetate lo que cuenta con un factor alto de protección y una baja permeabilidad. Al mismo tiempo se construyen obras adyacentes de control y monitoreo como pozos de venteo, de observación del agua subterránea e instalaciones para la recolección y tratamiento de los lixiviados (Figura 2). A nivel mundial existe una mayor experiencia técnica y económica con esta tecnología, así como la estabilización de RSM y afectación ambiental a largo plazo.



Figura 1: Relleno sanitario tradicional, preparación de una celda diaria
(Foto: Günther Wehenpohl)

Una vez que el terreno está asignado y los componentes principales del relleno sanitario están contruidos (Figura 2) y la operación autorizada, los RSM de la población se colectan

registrando cada descarga y la disposición se realiza de acuerdo al manual de operación, que contiene lo más sustancial de la operación del relleno sanitario¹.

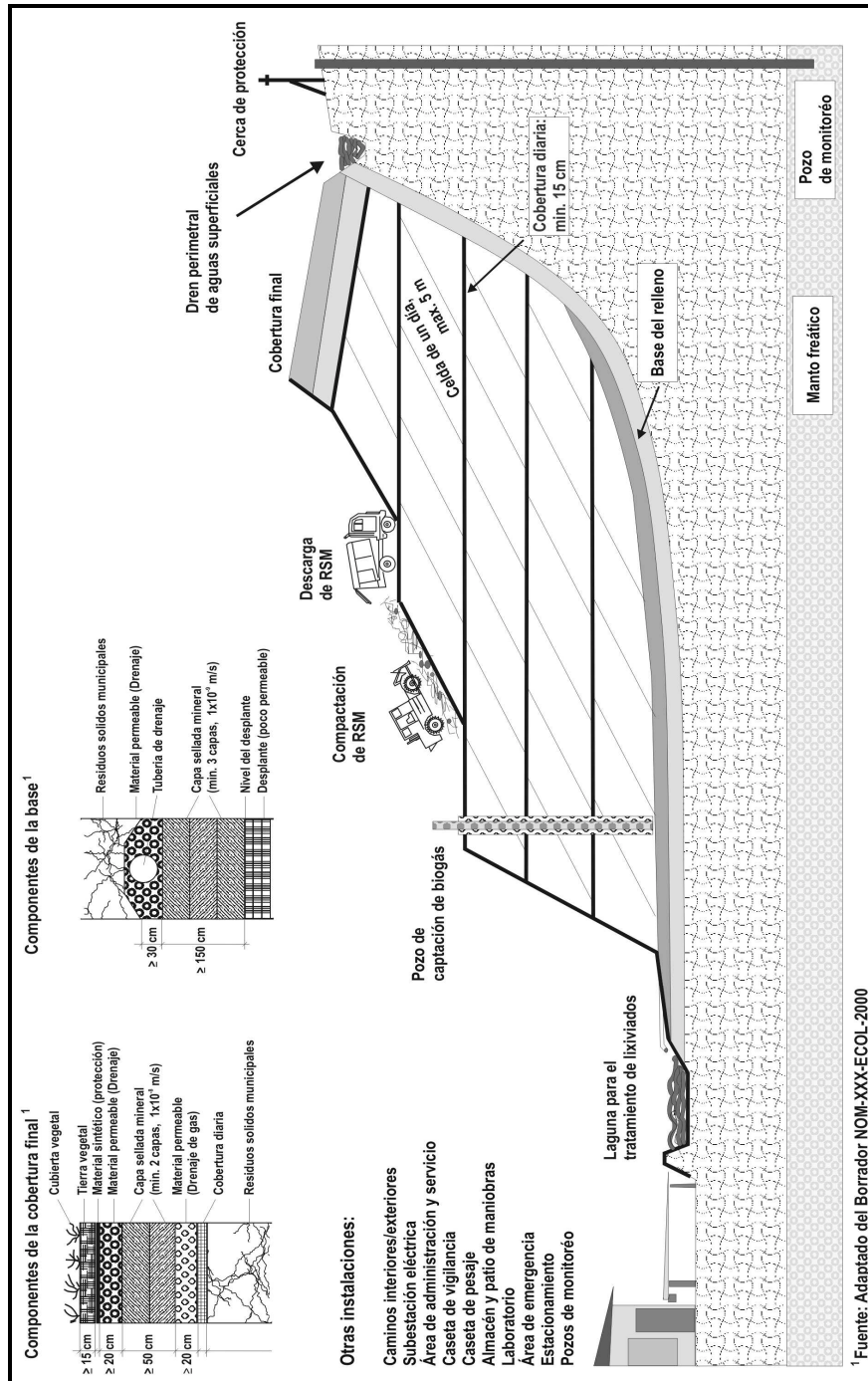


Figura 2: Esquema estructural de un relleno sanitario con principales componentes

¹ La SEGEM editó en diciembre 2000 el Manual para la Supervisión y Control de Rellenos Sanitarios que sirve de orientación para controlar los procesos en un sitio de disposición final.

Los residuos sólidos son descargados y desplazados por un buldózer hacia la celda en construcción, la basura se esparce en forma homogénea en capas delgadas de max. 30 a 40 cm y se compacta. El tractor compactador debe pasar de 2 a 4 veces, en bandas paralelas a manera de compactar toda el área de residuos extendidos hasta obtener una superficie uniforme. Esta operación se repite sobre cada capa hasta obtener la altura recomendada de la celda.

Una vez terminada la celda diaria, se cubre con una capa de tierra de 10 a 15 cm, se compacta siguiendo el mismo procedimiento con la basura a manera de cubrir entera y uniformemente los residuos para impedir la dispersión de materiales ligeros y evitar la proliferación de fauna nociva.

Se debe esperar de 2 a 3 meses para construir nuevas celdas sobre las anteriores por dos razones ínter dependientes: favorecer la descomposición aeróbica, la cual es más productiva que la anaeróbica y para acelerar el asentamiento del relleno, proporcionado un mejor soporte para la construcción de celda superior.

Con el paso del tiempo el residuo sólido se descompone, una parte se transforma en gas, otra en líquido y sobra el material semi-inerte. El suelo de la cobertura y la humedad penetran en los espacios vacíos que se generan en los residuos, condensando el relleno a una densidad específica de 0.7 a 0.8 t/m³ provocando asentamientos. Después de dos años el proceso de generación de asentamientos se reduce y prácticamente desaparece a los cinco años.

Adicionalmente, se tienen que realizar las siguientes operaciones y medidas, las cuales se deben continuar por lo menos hasta 25 años después de la clausura del relleno sanitario:

- Captación, extracción y tratamiento de biogás
- Monitoreo de biogás
- Captación, tratamiento y disposición final del lixiviado
- Monitoreo de lixiviado
- Captación de aguas pluviales
- Monitoreo de acuíferos

3.1.2 Riesgos ambientales

3.1.2.1 *Estabilización de los residuos sólidos municipales*

Los desechos sólidos enterrados en el relleno sanitario están sometidos a un número de cambios biológicos, físicos y químicos simultáneos. La degradación biológica de los compo-

nentes orgánicos empieza en condiciones aeróbicas, consumiendo el aire atrapado dentro del relleno; al agotarse el oxígeno, la descomposición a largo plazo sigue bajo condiciones anaerobias. La degradación de los residuos esta influida por el grado de compactación, la composición de los RSM, la humedad, y la temperatura; la tasa de producción de gases es el principal indicador de las reacciones biológicas en un relleno sanitario.

El tiempo de estabilización de los residuos depende de la intensidad de los procesos biológicos; para llegar a un estado “inerte” de los residuos depositados en un relleno sanitario tradicional, los datos que existen indican un periodo entre 10 y hasta más de 100 años en donde lixivian compuestos orgánicos e inorgánicos.

La operación del sistema de manejo de los residuos sólidos debe ir acompañada de un Programa de Monitoreo y Control permanente, el que deberá establecer los parámetros de interés para el control del sistema y permitir verificar si las medidas de control de las emisiones, la eficacia de las medidas de mitigación propuestas y el comportamiento ambiental del sistema son eficaces.

En general, se deberá monitorear el cumplimiento de las normas de emisión y de calidad ambiental aplicables y el estudio o declaración de impacto ambiental. El monitoreo de agua subterránea y el biogás debe comprender un período posterior a la etapa de clausura, generalmente hasta que las concentraciones estén por debajo de las que indica la normatividad.

En la revisión de las NOM's se sugiere un periodo de 25 años para conocer el estado o la evolución del mismo en la generación de contaminantes, que pueden ser perjudiciales alrededor del relleno sanitario. Esta revisión está en proceso de verificación y aprobación por las autoridades competentes y podría sustituir la NOM 083 y la NOM 084 (proyecto).

3.1.2.2 Tratamiento de los lixiviados y sus riesgos

Para llevar a cabo el tratamiento de los lixiviados hay que tomar en cuenta varios factores: uno es el tipo de desechos, terreno, clima, estructura hidrogeológica, condiciones de operación y edad del relleno sanitario.

Entre los tratamientos para lixiviados de rellenos sanitarios se encuentran: procesos biológicos, lagunas, contacto biológico rotativo, reactores de capa biológica mezclada aerobia y anaerobia, tratamiento físico-químico, combinación de pretratamiento de lodos activados y osmosis inversa entre muchas otras. Por el clima y por razones económicas, en México las tecnologías de lagunas y posterior recirculación son las más adecuadas y factibles por su bajo costo y operación.

Lagunas: Este tratamiento es simple, económico y confiable. Los lixiviados se tratan cerca del sitio del relleno sanitario, proporcionando las opciones de reciclar o descargar el efluente

a cuerpos receptores, siempre cuando cumplan con la normatividad vigente. Las lagunas proporcionan la reducción de los contaminantes en una forma que no necesite mantenimiento ni consumo de energía, además, no requiere de instalaciones que sean muy costosas. Otra forma de tratamiento son las lagunas de evaporación, que bajo condiciones adecuadas (radiación solar), reducen la cantidad de los lixiviados quedando los sedimentos (lodos) los cuales se disponen al relleno bajo un control especial.

Recirculación de lixiviados: Es el procedimiento de manejo de rellenos sanitarios más investigado. Los beneficios que tiene éste tratamiento son: reducción de la materia orgánica de los lixiviados y consecuentemente el costo para el tratamiento de los mismos; reducción de la cantidad de lixiviados por el incremento en la evapotranspiración; aumento en la degradación de la basura por el incremento del contenido de agua de los residuos; suministro y distribución de nutrientes y biomasa; y dilución de concentraciones altas localizadas de inhibidores que influyen en la biodegradación dentro del cuerpo de los residuos sólidos.

Los riesgos principales de un relleno sanitario están relacionados con la liberación de lixiviados. Por su composición complejo y su alta toxicidad, los lixiviados pueden afectar:

- Directamente al agua (agua subterránea, agua potable, lagunas, ríos)
- Indirectamente a la salud humana
- Directa e indirectamente la flora y fauna
- Directamente al subsuelo (ecosistema del subsuelo)

3.1.2.3 Generación y estimación de la cantidad de biogás

La tecnología de rellenos sanitarios controlados existe desde aproximadamente 30 años, y estos todavía se encuentran en la fase de descomposición microbiológica intensiva. No obstante, de los monitoreos que se están efectuando en estos rellenos, todavía no se dispone con datos precisos para poder determinar la cantidad de biogás que se produce con diferentes características de los residuos depositados, diferentes condiciones climatológicas y el tipo de pretratamiento que se aplica.

Por lo tanto la producción de biogás en un relleno sanitario en esta etapa se estima usando diferentes métodos. Se han desarrollado modelos matemáticos y de simulación que estiman la producción de biogás en dependencia de la composición de los residuos sólidos y las condiciones climáticas.

La producción del biogas en rellenos grandes permite su aprovechamiento transformándolos en energía eléctrica teniendo una alta inversión inicial, pero que puede ser autofinanciable. En México los principales problemas existen todavía en la legislación actual de energía, que restringe su generación por el sector privado.

3.2 Relleno seco, pretratamiento de alta compactación

3.2.1 Descripción general

El pretratamiento de alta compactación es conocido también como la tecnología del “Relleno Seco”. Su principal objetivo es acelerar y facilitar el control de los rellenos sanitarios a través de la reducción del volumen de los residuos por su alta compactación con una prensa embaladura. Con este procedimiento se aumenta la cantidad de los residuos depositados en el relleno sanitario y promete reducir los problemas ambientales y un mejor manejo de la disposición final. El pretratamiento puede contener varios procesos adicionales como la selección manual y la separación completamente automatizada hasta el encapsulamiento de las pacas con plásticos, los cuales se pueden adaptar a las necesidades locales, a la variación de la cantidad y las propiedades de los residuos municipales.



Figura 3: Relleno seco, manejo de las pacas (IMABE Ibérica, sin año)

En la Figura 3 se muestra un sistema de compactación de los RSM que comprende varios procesos de separación, trituración, tamizado y empacado de materiales reciclables como papel, cartón, vidrio, residuos metálicos, así como tratamiento biológico de la fracción remanente. Esta alternativa requiere de mayor número de prensas empacadoras, cintas de transportación del material, y cintas de sorteo para recuperación de los metales.

El sistema permite la compactación de los RSM sin sorteo y separación de las fracciones reutilizables. Este procedimiento es denominado “todo uno” y requiere sólo el equipo marcado como equipo indispensable en la Figura 4.

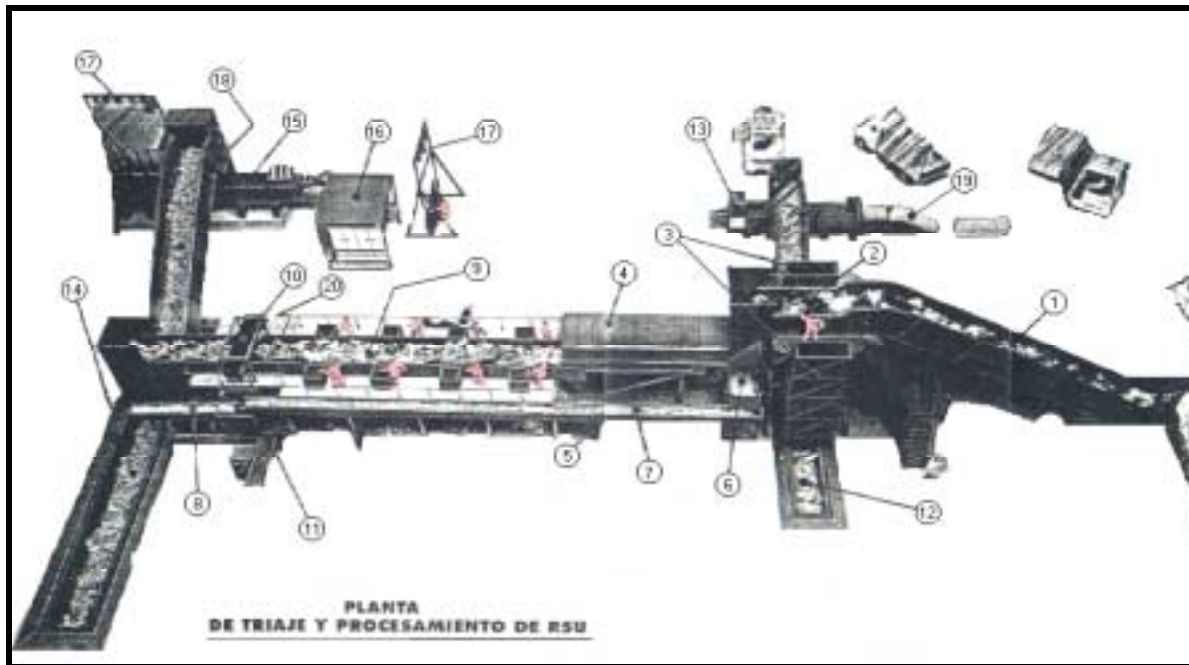


Figura 4 Sistema de compactación de los residuos Sólidos Municipales
(IMABE Ibérica, sin año)

- | | |
|--|--|
| 1 Cinta de alimentación a triaje primario | 11 Prensa empacadora de chapajo |
| 2 Plataforma de selección manual primaria | 12 Cinta de alimentación prensa |
| 3 Tolvas de caída de material | 13 Prensa embaladora |
| 4 Tromel centrífugo de cribado y rompebolsas | 14 Cinta de alimentación prensa residuos * |
| 5 Cinta de evaluación de fracción fina bajo tromel | 15 Prensa embaladora de RSU * |
| 6 Cinta de evaluación de fracción fina | 16 Central hidráulica * |
| 7 Cinta de fracción fina rodillo magnético | 17 Giado de alambre * |
| 8 Cinta fracción fina a prensa RSU o composteo | 18 Cinta evacuación escurridos * |
| 9 Plataforma de triaje terciario | 19 Salida de balas * |
| 10 Ferromagnético de banda | |

*Componentes indispensables

3.2.2 Riesgos ambientales

El proceso de compactación origina escurrimientos de líquido, proveniente de la fracción orgánica de los residuos. La cantidad de los escurrimientos es variable y depende de la capacidad de la planta procesadora y la fracción orgánica en los residuos.

La composición de los escurrimientos está en función de las características y la humedad de los residuos procesados. Los escurrimientos se caracterizan por su alto grado de contaminación orgánica (DQO, ortofosfatos, nitratos), elevada concentración de sólidos, cloruros, sulfatos, calcio, y metales pesados (hierro, plomo, zinc, cobre, cobalto, arsénico, etc.), y alta carga de coliformes totales y fecales.

Los líquidos escurridos de las prensas se recolectan mediante la red de drenaje interior para ser evacuados a un tanque de almacenaje para su control y tratamiento posterior o directamente a la laguna de evaporación que está en el mismo sitio del relleno sanitario.

Si el área donde están instaladas las prensas empacadoras esta cerrada, se requiere de un sistema de ventilación y contra incendio, así como un sistema de agua para el lavado periódico de los equipos.

3.2.3 Impacto sobre el relleno sanitario

Los impactos que se obtienen al empacar los residuos municipales y/o rechazos de los residuos sólidos (material orgánico) son los siguientes:

- La vida del relleno sanitario se extiende, colocándose de aproximadamente 50 % mas de residuos en el mismo espacio que con el sistema convencional.
- Un relleno conformado con pacas (relleno seco) tiene menos problemas que uno convencional ante condiciones climáticas extremas (temporada de lluvias) debido al menor área abierta, expuesta a la lluvia.
- Se necesita menos material de cobertura (20 cm de tierra por capa de 5 pacas de altura); la reducción de volumen de los residuos implica un 70 a 75 % menos de cobertura diaria. Frecuentemente solo se requiere cubrir la parte superior de la pila de pacas, dejando el frente descubierto.
- El frente de trabajo expuesto a la intemperie es más pequeño que en un relleno convencional, reduciéndose así los vectores de contaminación, puesto que restringe el acceso de pájaros, roedores, perros, etc. Se reduce la dispersión de residuos ligeros (papeles, plásticos) por el viento, y la apariencia de un relleno de pacas es más aceptable en comparación con un relleno convencional.

- Elimina por completo la necesidad de maquinaria de compactación en el relleno, permitiendo el manejo más flexible de las pacas; siguiendo la configuración del relleno las pacas se pueden apilar, alcanzando hasta 5.5 m de altura por capa. La compactación se realiza antes en una planta específica.
- Reduce el personal en el relleno, realizando las operaciones de descarga y acomodo de las pacas con una grúa, o carretilla elevadora manejada por un operador, pero tiene un personal adicional en la estación de compactación.
- Los problemas de hundimientos en los rellenos se reducen, por la mayor densidad y consistencia de las pacas.
- La consistencia de las pacas se caracteriza por la poca presencia de líquido y escaso oxígeno que da lugar a una fermentación anaerobia. La tasa de generación de gas y lixiviados es significativamente menor que en un relleno convencional, debido a la lenta descomposición bioquímica de los residuos embalados en el relleno seco. Aún que la cantidad es inferior en comparación con los rellenos sanitarios tradicionales, el relleno seco igual requiere las instalaciones de captación y tratamiento de lixiviados y del biogas.
- La carga orgánica y la concentración de los sólidos en el lixiviado es reducida, puesto que gran parte de los contaminantes se separan con los escurrimientos generados durante el comprimido de los residuos en la planta.

Cabe mencionar que existe poca experiencia con esta tecnología a largo plazo y los tiempos de estabilización no son conocidos. Pero, es probable que la alta densidad de los residuos causa el retraso de los procesos de degradación biológica, pudiendo alcanzar la descomposición completa (final) hasta 100 años. Esto significa que el tiempo de monitoreo de biogás y de lixiviados de pos clausura probablemente es mucho más largo que en un relleno sanitario tradicional.

3.3 Pretratamiento mecánico-biológico de los residuos sólidos municipales

3.3.1 Descripción general

La estabilización de los residuos municipales en un relleno sanitario tradicional tiene un periodo aproximado de 25 años y en el relleno seco se estima hasta unos 100 años. Para reducir este largo periodo de vigilancia ambiental se debe de minimizar el potencial contaminante de los residuos sólidos, antes de que los mismos sean depositados en el relleno sanitario. La forma de lograr este reto es extraer a lo máximo los contaminantes orgánicos de los residuos sólidos convirtiéndolos en material inerte. El tratamiento mecánico-biológico es un proceso que convierte los residuos en material semi-inerte antes de su disposición final. El tratamiento mecánico-biológico consiste en dos etapas de tratamiento: Mecánico para acondicionar los residuos municipales a su tratamiento posterior, y biológico mediante una fermenta-

ción controlada o digestión aerobia. El tratamiento integra varios procesos, los cuales con flexibilidad se pueden adaptar a las condiciones locales, a la variación de la cantidad y las propiedades y de los desechos municipales. El pretratamiento acelera y facilita el control de los rellenos sanitarios a través de la reducción del volumen de los residuos, de la cantidad de los lixiviados y emisión de biogás.



Figura 5: Pretratamiento mecánico-biológico de residuos sólidos en pilas (celda demostrativa) (Foto: Günther Wehenpohl)

3.3.2 Riesgos ambientales

El pretratamiento mecánico-biológico de los residuos sólidos está relacionado con generación de biogás, lixiviados, ruido y otros vectores ambientales como atracción de insectos, desarrollo de gérmenes y patógenos que afectan el medio ambiente y el personal de operación. La tasa y la extensión de las emisiones depende del proceso biológico seleccionado para el pretratamiento y la eficacia de las medidas de mitigación propuestas. Los parámetros de interés para el control de estos efectos son la cantidad y la composición de los efluentes líquidos, la tasa de generación de biogás, y el ruido emitido en la operación de equipo electromecánico.

Lixiviados

Los lixiviados generados en el proceso de pretratamiento mecánico–biológico se recolectan, y mediante una canaleta o tubería se conducen a un tanque (o laguna) para su tratamiento posterior por sedimentación y/o oxidación. Los lixiviados son completamente controlables para los procesos de degradación biológica que se realizan en espacios cerrados (contenedores); en este caso se recolecta solamente el lixiviado generado por la degradación de la materia orgánica, que se caracteriza con alta carga de contaminación y cantidades moderadas. Además los lixiviados pueden ser usados para el proceso de descomposición de la materia original.

La contaminación de los lixiviados generados posteriormente en el relleno sanitario esta originada por la descomposición del material difícilmente degradable como papel, plásticos, madera, y metales. Estos contaminantes persisten en el lixiviado durante varios años; la tasa de su descomposición es muy lenta, el proceso en estas condiciones no es accesible para el control. Sin embargo, la concentración orgánica ya no es tan grande, puesto que los residuos enterrados en el relleno están bien estabilizados y alrededor de 60-90% de la materia orgánica esta descompuesta.

Olor y biogás

El olor es causado por la emisión de gases, producto de metabolismo microbial. Los principales causantes del olor son entre otros el amoníaco, ácido sulfhídrico, ácidos alifáticos, aminas y aromáticos. En los procesos de biodegradación intensiva la emisión del gas es completamente controlable, puesto que los procesos dejan pasar el gas por un biofiltro antes de ventilarlo en la atmósfera.

El olor se puede convertir en un problema, especialmente para el proceso de aeración pasiva, si la degradación de material apilado no se controla apropiadamente. Una de las formas para reducir significativamente el olor es la cobertura de la pila con material previamente estabilizado y tamizado que actúa como "biofiltro" y retiene las sustancias volátiles (biogás) emitidos por la degradación.

Los resultados anteriores demuestran que el material producido en el pretratamiento biológico es biológicamente inerte, sin riesgo de producir emisiones de biogás en el relleno sanitario, puesto que casi todo el potencial se descarga durante el pretratamiento biológico de los residuos. En este aspecto, es válido hacer revisión de la normatividad existente respecto al sistema de recolección del biogás y su monitoreo en los rellenos sanitarios en la etapa de operación, clausura y post clausura.

Otros impactos

Algunas preocupaciones ambientales, identificados para un sistema de pretratamiento biológico en pilas se relacionan con el arrastre de materiales sueltos (papeles y materiales plásticos) por el viento, la atracción de insectos, y el aspecto estético de la planta. Todos estos vectores están en gran parte controlados por la cobertura superficial de las pilas que reduce el impacto de estos inconvenientes.

Cabe mencionar, que durante la descomposición aerobia de los sólidos, es posible eliminar todos los patógenos, malezas, y semillas si el proceso es propiamente dirigido. Para hacer esto, la temperatura se debe mantener entre 60 y 70°C durante 24 h. Como fue descrito anteriormente en este documento, la degradación aerobia esta acompañada con liberación de calor, la temperatura en la pila alcanza hasta 80°C, fomentando la eliminación de los patógenos y la estabilización de la materia orgánica. Los riesgos por la salud en la disposición final de este producto se reducen significativamente.

3.3.3 Impacto sobre el relleno sanitario

El tratamiento mecánico-biológico es una alternativa de pretratamiento que transforma los residuos sólidos en material semi-inerte, antes de su disposición final en el relleno sanitario. Esta técnica ofrece las siguientes ventajas para el manejo y el control del relleno sanitario:

- Reducción de emisión de biogás en el relleno sanitario. El material es biológicamente semi-inerte y posee un limitado potencial de generación de biogás del orden de 1 a 5% del teórico total.
- Reducción de la cantidad de los lixiviados y los contaminantes presentes en los mismos. La descomposición de gran parte de la fracción orgánica (generalmente toda la fracción que es fácilmente biodegradable) procede durante el pretratamiento, en condiciones donde los lixiviados se pueden interceptar y controlar. La concentración de COT y DBO5 en los lixiviados se reduce al orden de 60 a 80%, semejante reducción se obtiene también para los compuestos de nitrógeno.
- Los residuos sólidos pierden la masa, reduciéndose la concentración de sólidos totales hasta 33% (por peso, GV), y hasta el 12 % en la concentración de COT. Los residuos sólidos están bien estabilizados, con el potencial contaminante reducido significativamente, obteniendo un material semi-inerte, antes de su disposición final en el relleno sanitario.
- Reducción del volumen de los residuos y mejora de la compactibilidad del material en el relleno sanitario. La reducción de volumen de los residuos es de 50-70% (estimando una densidad inicial de residuos crudos de 0.25 a 0.53 t/m³), lo que conduce a un mejor aprovechamiento de la capacidad de los rellenos sanitarios y extiende la vida útil del mismo.

Además se minimizan los asentamientos posteriores de los rellenos sanitarios. El material, producto en pretratamiento biológico posee alta densidad (1.0 a 1.4 t/m³), combinada con baja permeabilidad, lo que reduciendo así el aporte de precipitación del agua de la lluvia.

Los rellenos sanitarios requieren de una supervisión y control durante todo el periodo de generación de emisiones y lixiviados, por los riesgos ambientales que éstos representan. En el caso de rellenos sanitarios de residuos sólidos pretratados mecánico y biológicamente este largo periodo se reduce significativamente (hasta unos 5 años) por el bajo potencial contaminante de los residuos sólidos dispuestos en el relleno sanitario.

Los resultados anteriores demuestran que el material producido en el pretratamiento biológico es biológicamente inerte, sin riesgo de producir emisiones de biogás en el relleno sanitario, puesto que casi todo el potencial se descarga durante el pretratamiento biológico de los residuos. En este aspecto, es válido hacer revisión de la normatividad existente respecto al sistema de recolección del biogás y su monitoreo en los rellenos sanitarios en la etapa de operación, clausura y post clausura.

Según los criterios de evaluación del impacto ambiental por el manejo de residuos sólidos *“La frecuencia y el tiempo que durará el monitoreo después de la clausura dependerán del tamaño del relleno sanitario y lo fijará la autoridad correspondiente una vez que el programa de cierre sea aprobado”*. En este aspecto, existen suficientes criterios técnicos que puedan servir como herramienta de apoyo a “la autoridad correspondiente” para que su decisión sea objetiva, basada en parámetros medibles y cuantificables.

La revisión de la normatividad se debe de hacer también con respecto a la cobertura final del relleno, puesto que el material producido en el pretratamiento biológico posee alta densidad, combinada con baja permeabilidad, reduciendo así el aporte de precipitación del agua de lluvia.

3.4 Relleno Sanitario Manual

Esta técnica de disposición final constituye una alternativa apropiada para el manejo ambiental de los residuos sólidos en áreas marginales de ciudades urbanas grandes o medianas, de menos de 40,000 habitantes, que no pueden adquirir equipo pesado para el manejo de un relleno sanitario tradicional. En zonas con baja población que generan menos de 20 toneladas diarias de residuos sólidos, también significa una alternativa de disposición final. Se utiliza principalmente la mano de obra lo que se aplica para cantidades pequeñas.

En general, la disposición final en un sitio que es capaz de recibir grandes cantidades es más económico que en sitios pequeños, por los costos fijos que se reparten a una mayor cantidad de RSM. Los costos específicos de la disposición final en una planta grande son

más bajos por la mejor utilización de las maquinas pesadas que forman una parte considerable de los costos de inversión. Normalmente, la distribución de recursos está al revés: municipios grandes disponen de más recursos que municipios de poca población. El relleno sanitario manual brinda una solución entre los aspectos económicos y ecológicos (ver [Figura 6](#)).



Figura 6: Relleno manual (Foto: Jorge Sánchez)

3.4.1 Descripción general

El relleno sanitario manual cuenta con ciertos elementos del relleno sanitario tradicional como son el cerco perimetral, el drenaje periférico para la desviación de las aguas pluviales, la impermeabilización, el drenaje de lixiviados, el sistema de evacuación del biogas y una caseta (vigilancia y sanitarios). Mientras para la operación se aplica instrumentos de uso manual, para la preparación del sitio (las excavaciones de zanjas o material de cobertura y la construcción de vías internas) se recomienda el uso de maquinaria pesada.

Se comienza con una planeación de la construcción de un relleno sanitario manual, tomando en cuenta la generación de residuos sólidos municipales y la vida útil necesaria de la planta futura. Esto ayuda para determinar la dimensión que debería tener el sitio, al lado de otros

parámetros como la aptitud geotécnica e hidrológica, la propiedad del sitio y la presencia de material de cobertura.

Para minimizar el impacto ambiental, está a considerar el mantener cierta distancia hasta la próxima zona urbana y hasta las aguas superficiales.

Pasos para la construcción del relleno sanitario manual:

La adecuación del terreno, la tala de vegetación que obstaculice la operación, son los primeros pasos a realizar. Se sigue con la construcción de vías de acceso al relleno para facilitar la llegada de vehículos de transporte. Se coloca una cerca perimetral para evitar la entrada no autorizada de personas o la de animales, además sirve para evitar que se vuele basura ligera. La siembra de una cerca viva (arbustos, árboles) a largo plazo ayudaría a ocultar el sitio lleno de desechos.

La construcción de un drenaje periférico que es dimensionado según la cantidad de precipitación local contribuiría a disminuir su ingresos al sitio y limitar la generación de los lixiviados. Una inundación del sitio puede causar dificultades en su operación.

La preparación del suelo de soporte depende de la presencia de material de cobertura. Si no existe y es difícil de alcanzarlo, es favorable remover las capas superiores del terreno. Por otro lado, la capacidad de absorción del suelo se disminuye con movimientos de tierra.

Dentro del relleno, se construye un sistema de drenaje de lixiviados. Una red horizontal de zanjas de 0.20 hasta 0.30 metros y con una pendiente de 2 % que se llena con piedras de 4 a 6 pulgadas. Se tapa las zanjas con pasto, ramas secas o un geotextil para permitir la infiltración de líquidos y retener las partículas finas que trae el mismo.

Otro elemento esencial del relleno sanitario manual es la construcción del sistema de evacuación de biogases para dejar salir el gas producido en el cuerpo del relleno. Un sistema de ventilación vertical en forma de torres de piedra o de tubería perforada en función de chimeneas o ventilas se instala cada 20 a 50 m con diámetros de 0.30 hasta 0.50 m.

Por último, se recomienda la instalación de una caseta de vigilancia al lado de la entrada del sitio de disposición final. Se puede construir una casa con parte de vigilancia y parte de sanitarios y abrigo/comedor. La documentación de procedencia de vehículos en una lista es instrumento para ayudar a rastrear residuos sólidos mal entregados (p.ej. residuos peligrosos escondidos).

Para operar un relleno manual con un ingreso de alrededor de 10 t/día se requiere de precisa entre 4 y 6 trabajadores.

3.4.2 Riesgos ambientales

La disposición regulada de desechos en un relleno tradicional impide que haya plástico volando, que se produzca fauna nociva y que se originen fuentes de enfermedades, eso igual es valido para un relleno manual.

Comparando con el relleno sanitario tradicional el de operación manual tiene un riesgo de la infiltración de lixiviados al subsuelo y en su consecuencia la contaminación es mayor en el último caso, ya que generalmente se impermeabiliza sin a geomembrana y con capas de arcilla/tepetate inferior. Al compararlo con la disposición ilegal en terrenos o barrancas (tiraderos), el relleno manual significa un avance significativo y aceptable para los rellenos de bajo ingreso.

4. Compatibilidad de las alternativas con la normatividad vigente en México

En México existen normas o proyectos de normas para regular los sitios destinados para la disposición final de RSM, así como para la construcción, operación y mantenimiento de los mismos. La Norma Oficial Mexicana (NOM-083-ECOL-1996) establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales, y de igual manera, está la Norma Oficial Mexicana (NOM-084-ECOL-1996) (proyecto), que establece los requisitos para el diseño, construcción, operación y monitoreo de un relleno sanitario. Ambas normas actualmente se encuentran en fase de revisión.

Las normas existentes y/o futuras establecen la regulación y disposición final de los RSM en rellenos sanitarios, con el fin de que los sitios destinados a la construcción, diseño, operación, clausura y monitoreo de éstos, se lleven a cabo de acuerdo a los lineamientos técnicos que garanticen la protección del ambiente, la preservación del equilibrio ecológico y de los recursos naturales. El sitio de la disposición final en cada una de las cuatros alternativas tiene que cumplir con la NOM-083-ECOL-1996 y todas las especificaciones, procedimientos y los estudios preliminares, geológicos, hidrogeológicos, etc., estipulados en la misma.

El material producido aplicando una de las técnicas de pretratamiento estudiadas, difiere de los desechos sólidos por sus propiedades físicas (densidad) y por su composición, en el caso de los desechos biodegradados. Estas diferencias conducen a un diferente manejo de los mismos en el relleno sanitario, requiriéndose de un plan de operación y un diseño específico para cada caso.

La cantidad y la tasa de producción de biogás y la composición de lixiviado también difieren significativamente por lo que para estos casos se tienen que establecer criterios normativos

para la captación, el monitoreo y el manejo de los gases y los líquidos generados, en cumplimiento de la normatividad para la preservación del medio ambiente.

Las dos alternativas son muy novedosas, y en México todavía no se tiene experiencia², tampoco se cuenta con datos estadísticos para poder crear una base de datos que sirvan de apoyo en la gestión de diseño, operación, manejo, etc.. Todas las especificaciones, procedimientos y parámetros relacionados con la explotación de estas técnicas se basan a la experiencia de otros países donde existen suficientes datos que permitan evaluar las mismas y establecer criterios para su aplicación en México.

La NOM – 084 -ECOL-1996 (proyecto) establece los requisitos para el diseño, construcción, operación y monitoreo de un **relleno sanitario tradicional** donde se depositan residuos sólidos sin pretratamiento, con características diferentes de los que se obtienen en alta compactación o pretratamiento mecánico-biológico.

Los principales conceptos que deberían de tomarse en cuenta en la elaboración de la normatividad para deposición final de residuos sólidos precompactados o biodegradados se refieren a los siguientes elementos:

- Diseño, construcción y operación de la celda diaria, la cobertura diaria y final de relleno sanitario.
- Configuración de los sistemas para recolección y extracción de biogás y lixiviados.

Monitoreo de impacto ambiental de los rellenos sanitarios y duración de monitoreo de las emisiones de biogás y lixiviados en el periodo de post clausura del sitio.

En referencia al **relleno sanitario manual**, la NOM-083-ECOL-1996 permite la disposición final de residuos sólidos municipales de cantidades menos a 20 toneladas diarias sin especificación técnica. La disposición en sitios incontrolados tampoco es permitida para pequeñas cantidades.

5. Evaluación técnica y ambiental de las alternativas

Un **relleno sanitario tradicional** puede definirse como una tecnología convencional, que necesita equipos pesados y una obra de ingeniería elaborada con sistemas de control de emisiones de gas y lixiviados para garantizar su compatibilidad con el ambiente. La opera-

² Actualmente hay varios proyectos de relleno seco en implementación y uno de tratamiento mecánico-biológico en fase piloto (10/2002).

ción de esta tecnología es regular y por lo tanto el mantenimiento no requiere de personal de alta calificación. Por la experiencia que se tiene a largo plazo tanto al nivel nacional como al nivel internacional, esta tecnología es factible de aplicarse en países en desarrollo.

El relleno sanitario tradicional, es una parte integral de las otras dos alternativas, las combinadas con métodos de **pretratamiento**. La influencia de los pretratamientos está directamente relacionada con el área necesaria, el volumen del relleno sanitario, los equipos utilizados, el tiempo de estabilización de los residuos depositados, repercutiendo en los costos de inversión, equipos, operación y mantenimiento.

El **relleno seco** necesita alta tecnología y está sometido a mayor vulnerabilidad por fallos de los equipos mecánicos; en caso de avería en algún punto de la línea de operación, se tiene que parar todo el proceso, afectando las subsecuentes operaciones, sin flexibilidad funcional a las incidencias en la entrada de los residuos en la planta de compactación. Además, la alta densidad de los residuos causa la retardación de los procesos de degradación biológica, pudiendo alcanzar la descomposición completa (final) hasta 100 años, que implica que las emisiones al aire y los contaminantes de los lixiviados en los rellenos sanitarios, deben ser controlados a largo plazo.

El **pretratamiento mecánico-biológico** se basa en tecnologías convencionales, utilizando equipos más universales, en su mayor parte disponible en el mercado nacional a un costo más accesible. El problema común de estos sistemas es la dificultad de asegurar un suministro controlado de oxígeno, y respectivamente la estabilidad del proceso. El control operativo del proceso consiste en proporcionar las óptimas condiciones para el desarrollo de los microorganismos que degradan la materia orgánica. En este aspecto, la experiencia y los conocimientos del personal de operación pueden ser factores límite para lograr un alto grado de descomposición de la materia orgánica. Por las grandes áreas que se requieren para el manejo de los residuos sólidos, este sistema de pretratamiento es recomendable aplicarse junto al relleno sanitario y/o formar parte del mismo. Aún la aplicación de tecnología recomendada para municipios medianos requiere grandes espacios (cerca 1 m² por tonelada), hay tecnologías para mayores cantidades (mayores de 300 toneladas por día), aplicando el mismo método de pretratamiento.

La disposición en un **relleno sanitario manual** describe una forma alternativa y factible para pequeños municipios. En sentido costo-beneficio es una solución intermedia – mucho mejor que la disposición incontrolada en barrancas o en baldíos, pero equipado de menos medidas de protección al medio ambiente que un relleno sanitario tradicional. Por eso se indica un máximo de ingreso a este tipo de relleno.

En las Tablas 2 y 3 se encuentra resumida la evaluación técnica y ambiental de los cuatro procesos.

Tabla 2: Evaluación técnica de las alternativas

Parámetros	Relleno Tradicional	Relleno Seco / (alta compactación)	Pretratamiento Mecánico-Biológico	Relleno Sanitario Manual
Operación	Regular	Regular	Especializada (proceso biológico)	Muy Sencillo
Mantenimiento	Sencillo, convencional	Complejo, especializado	Sencillo	Muy sencillo, convencional
Equipo	Convencional	Especializado	Convencional	Convencional y sencillo
Calificación del personal	Nivel promedio	Nivel especializado	Nivel promedio	Bajo promedio
Reducción del volumen de RSM (%)³	50 – 60	70 – 75	75 – 85	40 – 50
Aplicable para municipios pequeños	Si, pero costoso	No o solamente al nivel intermunicipal	Si	Exclusivamente
Aplicable para municipios grandes	Si	Si	Si (con limitaciones)	No
Experiencia en pos clausura	Mucha (> 40 a)	Poca (< 10 a)	Poca (< 10 a)	Poca

³ (1) La reducción del volumen está calculado con una densidad inicial de RSM de 0.3 t/m³

Tabla 3 Evaluación de los impactos ambientales de las alternativas

Parámetros	Relleno tradicional	Relleno seco Pretratamiento de alta compactación	Pretratamiento mecánico-biológico	Relleno sanitario manual
Cantidad de lixiviados	Cantidades regulares durante todo el tiempo.	Pequeñas cantidades en el pretratamiento. Cantidades considerables en la disposición final.	Cantidades considerables en el pretratamiento. Cantidades pequeñas en la disposición final.	Cantidades regulares durante todo el tiempo.
Calidad de lixiviados	Concentración de contaminantes arriba de los límites permisibles. Necesidad de tratamiento.	Concentración de contaminantes arriba de los límites permisibles en el pretratamiento y en la disposición final. Necesidad de tratamiento.	Concentración de contaminantes arriba de los límites permisibles en el pretratamiento. Necesidad de tratamiento (o reuso en el pretratamiento). Abajo de los límites después de la clausura de la disposición final. Sin necesidad de tratamiento.	Concentración de contaminantes arriba de los límites permisibles. Necesidad de tratamiento.
Olor y Biogás	Emisiones de olor y formación constante de biogás. Necesidad de sistema de captación y tratamiento (por ejemplo: quema).	Emisiones de olor en el pretratamiento. Formación de biogás en la disposición final en menores cantidades. Necesidad de sistema de su captación y tratamiento.	Emisiones muy limitadas de olor en el pretratamiento por la aplicación de un biofiltro. Generación insignificante de biogás en la disposición final.	Emisiones de olor y formación constante de biogás. Necesidad de sistema de recolección y tratamiento.
Vectores, insectos, roedores, etc.	Riesgo durante la operación del relleno. Necesidad de recubrimiento diario para disminuir los efectos.	Riesgo limitado en el lugar de pretratamiento. Efectos reducidos en la disposición final.	Riesgo limitado en el lugar de pretratamiento. Efectos insignificantes en la disposición final.	Riesgo durante la operación del relleno. Necesidad de recubrimiento diario para disminuir los efectos.
Impacto a la salud	Protección personal obligatoria de todos los trabajadores.	Protección personal obligatoria de todos los trabajadores.	Protección personal obligatoria de todos los trabajadores en el pretratamiento. Reducción significativa de los patógenos en el material pretratado.	Protección personal obligatoria de todos los trabajadores.
Ruido	Típico emitido por la maquinaria de operación.	Típico emitido por la maquinaria de operación.	Típico emitido por la maquinaria de operación.	Casi no hay ruido, solamente en fase de uso de maquinaria.
Monitoreo de lixiviados y biogás	Durante la operación, clausura y pos clausura del relleno, 20 a 30 años.	Durante la operación y clausura y pos clausura del lugar de disposición final, 80 a 100 años.	Solamente durante la operación y de 3 a 5 años después de la clausura.	Durante la operación y clausura y pos clausura del relleno. Hasta 10 años.
Riesgo de impacto ambiental	Durante la operación, clausura y pos clausura, 20 a 30 años después de ser clausurado.	Hasta 100 años después de la clausura del lugar para la disposición final.	Solamente 3-5 años después de clausurado el lugar de disposición final.	Durante la operación, clausura y pos clausura, 7 a 10 años después de clausura.

6. Literatura

Andreottola G., Cannas P. (1992): Chemical and biological characteristics of landfill leachate. In: Christensen TH, Cossu R, Stegmann R (eds.) Landfilling of waste: Leachate. Elsevier Applied Science. London, New York.

Brunner D.R., Keller D.J. (1972): Sanitary Landfill Design and Operation, U.S. Environmental Protection Agency, Publication SW-65ts, Washington, D.C.

CNA (1989): Criterios ecológicos de calidad del agua. Diario Oficial de la Federación el 13 de diciembre de 1989.

CNA (2000): Catálogo general de precios unitarios para la construcción de sistemas de agua potable y alcantarillado.

Collins H.J., Brammer F., Maak D. (1998): Ergebnisse der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung bei mehrjährigem Praxisbetrieb. Entsorgungspraxis 4/98, pp 26 – 29 y 5/98, pp 36 – 41.

EPA (1987): Dewatering Municipal Wastewater Sludge, U.S Environmental Protection Agency EPA/625/1-87/014, Center for Research Information, Cincinnati, OH 45268.

Grupo FADYM, S.A. de C.V. (2001): Proyecciones financieras para anteproyectos para el tratamiento y disposición final de los residuos sólidos municipales a través del relleno sanitario tipo “seco”. Informe.

Hernández C. P. (1998): Programa para la obtención de costos asociados al emplazamiento de un relleno sanitario. Secretaría de Ecología del Gobierno del Estado de México, GTZ.

Hernández C. P., Wehenpohl G. (2000): Manual para la rehabilitación, clausura y saneamiento de tiraderos a cielo abierto en el Estado de México. Secretaría de Ecología del Gobierno del Estado de México, GTZ.

IMABE IBERICA S.A. (1997): Generación de escurridos en el proceso de embalado de R.S.U. Informe.

IMABE IBERICA S.A. (2001): Parámetros de explotación y mantenimiento de una prensa sistema IMABE para una producción de enfardado de RSU de 600 ton./día. Información de la empresa.

IMABE IBERICA S.A. (sin año; a): Plantas de prensado y embalado de residuos sólidos urbanos, sistema IMABE, Información de la empresa.

IMABE IBERICA S.A. (sin año; b): Sistema IMABE. Tratamiento de residuos sólidos urbanos. Catálogo.

INEGI: Censo de Población y Vivienda. Resultados Definitivos, 1995. Tabulados Básicos. México, 1996, <http://www.inegi.gob.mx>.

Jaramillo J. (1999): Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales – Una necesidad para pequeñas comunidades en México, Organización Mundial de la Salud/ Organización Panamericana de Salud.

Kebekus F, Dilewski G, Drees KT (2000 a): Mechanical-Biological Waste Treatment. Introduction and Decision-making Tools for Application in Developing Countries. GTZ.

Kebekus F, Janikovski G, Dilewski G (2000 b): Study on the Feasibility of a Mechanical-biological Residual Waste Treatment Plant in Phitsanulok, Thailand, GTZ.

Lahl U., Zeschmar-Lahl B. (1998): TOC-Grenzwerte (Eluat) für das nachsorgearme Ablagern von Abfällen

Maak D (sin año): Deponieren von Restabfällen, Korrespondenz Abwasser, 47/ 7, pp. 1321 – 1329.

Fakten über das FABER-AMBRA®-Verfahren zur mechanisch-biologischen Abfallbehandlung
<http://www.faber-ambra.de/wiserg.htm>.

Maak D., Pereira C., Tönges W. (2000a): Erster Zwischenbericht zum Vorhaben Einführung der FABER-AMBRA in Rio de Janeiro, Brasilien, Faber-Ambra, FABER-Recycling GmbH, <http://www.faber-ambra.de/start.htm>.

Maak D., Pereira C., Tönges W. (2000b): Zweiter Zwischenbericht zum Vorhaben Einführung der FABER-AMBRA in Rio de Janeiro, Brasilien, Faber-Ambra, FABER-Recycling GmbH, <http://www.faber-ambra.de/start.htm>.

NOM-001-ECOL-1996 Norma Oficial Mexicana, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

NOM-083-ECOL-1996 Norma Oficial Mexicana, que establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales.

NOM-084-ECOL-1996 (proyecto) Norma Oficial Mexicana, que establece los requisitos para el diseño, construcción, operación y monitoreo de un relleno sanitario (no vigente).

Reinhardt J.J., Hamm R.K. (1974): Solid Waste Milling and Disposal on Land without Cover, U.S. Environmental Protection Agency, NTIS Publication PB-234930, Springfield, Va.

Schenk B. (2000): Machbarkeitsstudie für eine mechanisch biologische Abfallbehandlungsanlage in Ilhabela, Brasilien, GTZ, <http://www.gtz.de/mba/english/products.htm>.

Secretaria de Salud (2000): Manual de Saneamiento Básico Ambiental del Municipio

SEDESOL (1995): Manual Técnico-Administrativo para el Servicio de Limpia Municipal
<http://www.sedesol.gob.mx>.

SEDESOL (1999): Subsecretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda
<http://www.sedesol.gob.mx>

Sorg T.J., Hickman H.L. (1970): Sanitary Landfill Facts, U.S. Public Health Service, Publication 1792, 2d ed., Washington, D.C.

Tchobanoglous G. (1977): Solid Waste Engineering Principles and Management Issues, McGraw Hill, N.Y.

Con apoyo de

