



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA E  
INDUSTRIAL



**COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA EL MANEJO DE LOS  
RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO**

PRESENTA

**RICARDO JIMÉNEZ ALBARRÁN**

ASESOR DE TESIS:  
DRA. RINA AGUIRRE SALDIVAR  
M.I. IZTCHEL NIETO DÍAZ

FEBRERO 2013

# ***Agradecimientos***

A la M.I. Itzchel Nieto Díaz por su apoyo y confianza. Gracias por sus consejos y por el esfuerzo realizado para que este trabajo se llevara a cabo.

A la Dra. Rina Aguirre Saldivar por su paciencia y por guiar mis ideas a través de sus consejos y comentarios.

## ***Dedicatoria***

*A mis padres por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, tanto en el aspecto académico, como personal. Por los ejemplos de perseverancia y constancia que los caracterizan y que me han inculcado siempre, por su motivación para salir adelante y sobre todo por su amor.*

# Índice

Agradecimientos

Dedicatoria

Índice de figuras

Índice de tablas

	Pag.
<b>Introducción.....</b>	1
Objetivo.....	2
Alcances y limitaciones.....	2
<b>Capítulo 1, Métodos y criterios de evaluación y comparación.....</b>	4
1.1 Métodos de estimación de efectos ambientales.....	5
<b>Capítulo 2. Residuos Sólidos.....</b>	9
2.1 Residuos sólidos urbanos.....	9
2.1.1 Generación de residuos sólidos urbanos.....	10
2.1.2 Características de los RSU.....	11
2.1.3 Normatividad para el manejo de RSU.....	13
2.2 Sistemas de manejo de los RSU.....	14
2.3 Efectos del manejo de RSU.....	16
<b>Capítulo 3. Relleno sanitario.....</b>	18
3.1 Clasificación de rellenos sanitarios.....	18
3.2 Procesos de descomposición en un relleno sanitario.....	20
3.3 Variables de comparación.....	24
<b>Capítulo 4. Compostaje, biodigestión y tratamiento mecánico biológico.....</b>	27
4.1 Compostaje.....	27
4.1.1 Proceso de descomposición en el compostaje.....	27
4.1.2 Características de construcción y operación de una planta de compostaje.....	30
4.1.3 Variables de comparación.....	32
4.2 Digestión anaerobia.....	34
4.2.1 Procesos en la digestión anaerobia.....	34
4.2.2 Configuración de una planta de digestión anaerobia.....	36
4.2.3 Variables de comparación.....	38
4.3 Tratamiento mecánico-biológico.....	39
4.3.1 Procesos en el TMB.....	39
4.3.2 Variables de comparación.....	42

---

<b>Capítulo 5. Incineración.....</b>	<b>44</b>
5.1 Proceso de incineración de RSU.....	44
5.2 Equipos de incineración y aprovechamiento de energía.....	45
5.3 Control de contaminantes en el proceso de incineración.....	47
5.4 Incineración de RSU en el mundo.....	50
5.5 Variables de comparación.....	50
<b>Capítulo 6. Aplicación de métodos de comparación entre alternativas de ma- nejo de RSU.....</b>	<b>52</b>
6.1 Función dosis-respuesta.....	52
6.2 Encuesta directa.....	55
6.3 Precio hedónico.....	57
6.4 Evaluación de expertos.....	59
6.5 Transferencia de beneficios.....	60
<b>Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>62</b>
<b>Mesografía.....</b>	<b>65</b>

# Índice de figuras

<b>Figura</b>	<b>Pag.</b>
1.1 Clasificación de métodos de estimación de efectos ambientales.....	5
1.2 Diagrama del método función dosis-respuesta.....	6
1.3 Diagrama de método directo.....	6
1.4 Diagrama de método indirecto.....	7
1.5 Diagrama de transferencia de beneficios.....	8
2.1 Generación total anual de RSU en México.....	10
2.2 Generación per cápita anual de RSU en México.....	10
2.3 Generación anual de RSU per cápita en países de la OECD.....	11
2.4 Composición de RSU en México.....	12
2.5 Principales componentes de RSU en la Ciudad de México.....	12
2.6 Normativa Federal en materia de RSU y de manejo especial.....	13
2.7 Sistema de manejo integral de RSU.....	14
2.8 Manejo de los residuos sólidos en la comunidad europea.....	15
2.9 Disposición final de residuos sólidos urbanos en México.....	16
3.1 Equipo de extracción de lixiviados y biogás.....	21
3.2 Fases de descomposición reflejadas en la en la evolución idealizada de la composición del biogás.....	22
3.3 Esquema de generación de electricidad en un relleno sanitario.....	24
4.1 Valores sugeridos para los parámetros del compostaje.....	30
4.2 Etapas del proceso de compostaje.....	31
4.3 Diagrama de proceso de una planta de compostaje mecanizada.....	31
4.4 Equivalencia del biogás con otras fuentes de energía.....	34
4.5 Procesos en la digestión anaerobia.....	35
4.6 Planta de digestión anaerobia.....	37
4.7 Tratamiento mecánico biológico.....	40
5.1 Quemador de parrillas rodantes.....	46
5.2 Sistemas de recuperación de energía.....	46
5.3 Precipitador electrostático.....	48
5.4 Filtro de maya recolector de bolsas.....	49
5.5 Lavador de Venturi.....	49
6.1 Alternativas de valoración aplicables a la gestión de RSU.....	52
6.2 Gráfica de función dosis-respuesta.....	55
6.3 Resultados de encuesta sobre separación de RSU.....	56
6.4 Propuesta de encuesta sobre separación de RSU.....	57

# Índice de tablas

<b>Tabla</b>	<b>Pág.</b>
3.1 Categorías de los sitios de disposición final.....	19
3.2 Composición típica de los lixiviados de un relleno sanitario.....	21
3.3 Composición típica del biogás producido en rellenos sanitarios.....	23
3.4 Variables para relleno sanitario.....	25
3.5 Ventajas y limitaciones del relleno sanitario.....	26
4.1 Variables para compostaje.....	33
4.2 Ventajas y limitaciones del compostaje.....	33
4.3 Variables para digestión anaerobia.....	38
4.4 Ventajas y limitaciones de la digestión anaerobia.....	39
4.5 Variables para TMB.....	42
4.6 Ventajas y limitaciones del tratamiento mecánico-biológico.....	43
5.1 Variables para incineración.....	51
5.2 Ventajas y limitaciones de la incineración.....	51
6.1 Emisiones por alternativa.....	53
6.2 Disponibilidad de datos de alternativas aplicables en la Ciudad de México.....	54
6.3 Tasas de mortalidad y morbilidad.....	54
6.4 Resultados de encuesta sobre separación de RSU.....	56
6.5 Encuesta de preferencias.....	58
6.6 Tabla para estimar el precio hedónico.....	58
6.7 Variables de comparación entre alternativas.....	59

## **Introducción**

Resulta paradójico que en la naturaleza, los procesos biológicos son cíclicos y altamente eficientes en el empleo de energía, mientras que la mayoría de los procesos productivos que desarrollamos los seres humanos son lineales y consumen y desperdician grandes cantidades de energía, agua y materiales.

El desarrollo económico, la industrialización y los patrones de consumo, han impactado significativamente en el volumen y la composición de los residuos producidos por las sociedades del mundo. La generación excesiva, así como el manejo inadecuado de los residuos sólidos urbanos generan consecuencias ambientales que provocan fenómenos adversos a la vida en el planeta, producen un deterioro estético de las ciudades, contaminan los suelos y cuerpos de agua, además de que favorecen la proliferación de fauna nociva y la transmisión de enfermedades. La descomposición de los residuos orgánicos produce biogás, que al ser liberado contribuye al calentamiento global y resulta peligroso por su toxicidad y explosividad.

Para el año 2009 se estimaba que en México del total de los residuos sólidos urbanos generados, se recolectaron aproximadamente el 90% y el resto fue dispuesto por los mismos generadores. Así mismo, de los residuos recolectados el 68% fueron depositados en rellenos sanitarios y sitios controlados mientras que el 28% se manejó de manera inadecuada en tiraderos a cielo abierto. La diferencia entre el total de generación y disposición final se debe al reciclaje de residuos recuperados (SEMARNAT, 2011).

El hecho de que la cantidad de residuos aumenta año con año, fomenta la investigación de alternativas novedosas en el campo del tratamiento de los mismos. Actualmente en Europa, algunos de los países más involucrados en el tema de gestión de residuos (Dinamarca, Alemania, Suiza y Holanda) desarrollan y utilizan tecnologías para el tratamiento térmico y compostaje, con la finalidad de aprovechar gran parte del biogás generado en forma de combustible para producir calor y electricidad que permiten acondicionar los residuos antes de su disposición final para reducir el riesgo de contaminación en un relleno sanitario, además esos países fomentan y promueven la separación y el reciclaje como medida importante para reducir el volumen de los residuos a disponer (OCDE, 2010).

En México, la Agencia de Cooperación Técnica Alemana (GTZ), junto con la Comisión Mexicana de Infraestructura Ambiental ha propuesto algunas opciones de tratamiento y disposición de residuos, además del relleno sanitario (GTZ, 2003):

- Reciclaje
- Aprovechamiento energético
- Compostaje
- Incineración
- Tratamiento mecánico-biológico

Sin embargo a pesar de que se conocen estas alternativas, los rellenos sanitarios, los sitios controlados y tiraderos a cielo abierto siguen siendo los principales métodos de dis-



posición en nuestro país. Además los sitios controlados y no controlados, no cumplen con las especificaciones que se requiere un relleno sanitario y no cuentan con un sistema eficiente de recolección de lixiviados y biogás, por lo que existe el riesgo de que se contaminen los mantos acuíferos y se emitan gases de efecto invernadero.

Para realizar un adecuado manejo de residuos es necesaria una planeación estratégica en la que se identifiquen y evalúen los efectos directos e indirectos que implique el tratamiento que los residuos reciban. Algunos de éstos pueden ser estimados de manera cuantitativa en términos económicos, sin embargo existen efectos que se limitan a una cuantificación cualitativa.

Un relleno sanitario requiere de gran extensión territorial para un adecuado funcionamiento, situación que afecta severamente a la Ciudad de México ya que es la entidad federativa del país con mayor densidad de población, con mayor generación de residuos sólidos urbanos y con gran dificultad para encontrar sitios adecuados en términos políticos, económicos y ambientales donde depositarlos. Es por ello que el presente trabajo se realiza con la intención de favorecer que en el Distrito Federal se lleve a cabo un tratamiento ambientalmente menos adverso y que permita el aprovechamiento de los residuos.

### **Objetivo**

Identificar las variables, los métodos y los criterios que permitan el análisis y la comparación del relleno sanitario, el compostaje, la digestión anaerobia, el tratamiento mecánico-biológico y la incineración como alternativas de manejo de residuos sólidos urbanos para la Ciudad de México.

### **Alcances y Limitaciones**

En el presente trabajo se analizan los residuos a partir de su generación y recolección enfocándose en su tratamiento y disposición final, considerando las características de los generados en la Ciudad de México.

Los datos estadísticos que se emplean en el presente trabajo son los más recientes publicados por instituciones gubernamentales como la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y el Instituto Nacional de Ecología (INE).

En este trabajo se plantea brevemente la aplicación de los métodos de comparación seleccionados, de manera que si en trabajos posteriores se requiere de un análisis más detallado se cuente con el antecedente y un sencillo análisis del método aplicado a las características de los residuos sólidos urbanos de la Ciudad de México.

Esta tesis forma parte de un proyecto de investigación doctoral enfocado a estimar las implicaciones económicas y ecológicas de las alternativas de gestión de los residuos sólidos urbanos mediante la valoración de su ciclo de vida en México.

Para analizar las opciones de manejo de residuos sólidos urbanos e identificar sus impactos asociados, resulta necesario investigar acerca de los procesos de tratamiento y disposición de residuos sólidos, las variables involucradas y los factores que las alteran, la normatividad que los rige y sus posibles efectos sobre el ambiente (incluyendo etapas de construcción, operación, mantenimiento y cierre) así como sus ventajas y desventajas económicas y sociales.

Esta tesis inicia con el desarrollo del marco de referencia, los conceptos básicos que se emplean para la investigación y los métodos de criterio y evaluación que se consideran para la investigación. Se continúa con un breve diagnóstico de la situación actual de los residuos sólidos urbanos en la Ciudad de México en el que se determinan sus principales características y cantidades de generación.

Posteriormente se presentan las principales características de un relleno sanitario, plantas de tratamiento biológico (compostaje, digestión anaerobia y tratamiento mecánico-biológico) e incineración, destacando las ventajas y desventajas de cada una de estas alternativas según sus efectos sobre el entorno ambiental y social. Para cada alternativa de manejo de residuos, se propone una configuración para atender el problema en la Ciudad de México.

Finalmente se realiza un análisis para la aplicación de algunos métodos empleados de manera internacional para comparar los efectos generados en cada una de las alternativas que se abordan en este trabajo y así determinar qué método posee mayores argumentos para ser aplicado en el contexto de nuestra ciudad.

## **Capítulo 1. Métodos y criterios de evaluación y comparación**

El presente trabajo de investigación se enfoca en determinar los indicadores, los métodos y los criterios que permitan el análisis y la comparación de alternativas de manejo de residuos, por ello inicialmente se establecen las definiciones y conceptos considerados dentro del marco teórico.

En el campo ambiental se han desarrollado indicadores para describir y analizar distintos fenómenos como el clima, la extinción de especies, la contaminación de cuerpos de agua y contaminación atmosférica entre muchos otros. Sin embargo, no existe una definición única y varían de acuerdo con la institución y con los objetivos específicos que se persiguen. Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD, 2001), que utiliza un conjunto de indicadores como información base para realizar evaluaciones periódicas del desempeño ambiental de los diferentes países que integran la organización, un indicador ambiental es un valor derivado de parámetros que proporciona información para describir y analizar el estado de un fenómeno, ambiente o área, con un significado que va más allá del directamente asociado con el valor del parámetro en sí mismo.

Cabe señalar que frecuentemente se utilizan las palabras “parámetro” e “índice” como sinónimos de indicador, sin embargo, no tienen el mismo significado. Un parámetro se define como cualquier propiedad que es medida u observada, mientras que un índice designa a un conjunto agregado o ponderado de parámetros o indicadores (OECD, 2001).

En el caso del manejo de residuos es fundamental establecer indicadores que ofrezcan una visión de las condiciones, impactos ambientales y respuestas de la sociedad. Estos deben ser sencillos, de fácil interpretación, capaces de mostrar tendencias respecto al tiempo y de preferencia tener un valor con el cual puedan ser comparados, entre otras características.

Conocer los costos y efectos directos, indirectos e intangibles de un proceso en el manejo de residuos permite una toma de decisiones apropiada en términos ambientales, sociales y económicos. Entre los efectos indirectos se pueden considerar el incremento de tasas de morbilidad y mortalidad, costo de servicios urbanos por el incremento en la producción de residuos y aumento de la contaminación atmosférica, mientras que como efectos intangibles se encuentra la generación de malos olores, el deterioro estético y los posibles cambios de costumbres. A los efectos indirectos e intangibles se les conoce como *externalidades* (Camacho, 2006).

El uso de externalidades permite entre otras cosas:

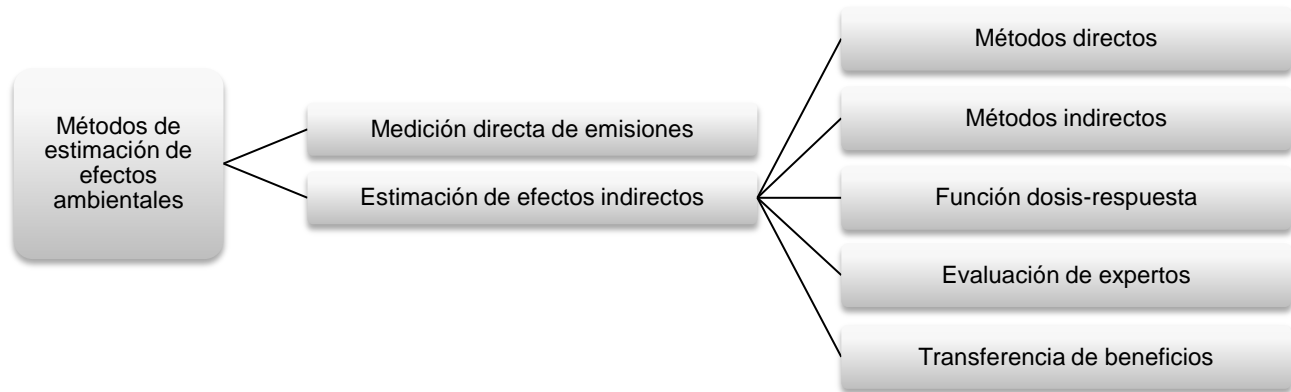
- Comparar la magnitud de diferentes impactos ambientales en términos económicos (factor determinante en la toma de decisiones).
- Comparar los impactos ambientales negativos contra los positivos.
- Considerar la variable ambiental junto con las financieras, sociales y políticas.
- Proveer más argumentos para un criterio claro y sobre todo objetivo que permita al decisor aceptar o rechazar un proyecto.

Las externalidades ambientales son de carácter relativo tanto en espacio como en tiempo, es decir, algunos efectos y factores pueden ser considerados más adversos en ciertas regiones que en otras según sus características sociales, geográficas, históricas, culturales y del tiempo en que son evaluadas (Jaime, 2006).

### **1.1 Métodos de estimación de efectos ambientales**

Para identificar y evaluar los efectos ambientales, se cuenta con diversas técnicas y métodos de análisis. La medición directa de sustancias en la fuente es el método más confiable para determinar las cantidades de emisión de un proceso, es por eso que de ser posible se debe optar por este método. Sin embargo, la medición directa implica procedimientos de muestreo que en ocasiones son complicados, requiere de personal especializado y equipos e instrumentos que pueden resultar costosos para realizar la medición.

Figura 1.1 Clasificación de métodos de estimación de efectos ambientales



Dadas las dificultades y los altos costos que implica la medición directa, se opta por emplear métodos que permitan la evaluación y comparación de manera indirecta mediante la estimación de efectos indirectos. Tzipi y Ofira en *A critical review of economic valuation studies of externalities from incineration and landfilling* (2005), clasifican los métodos de valoración de efectos en cinco categorías que se describen a continuación.

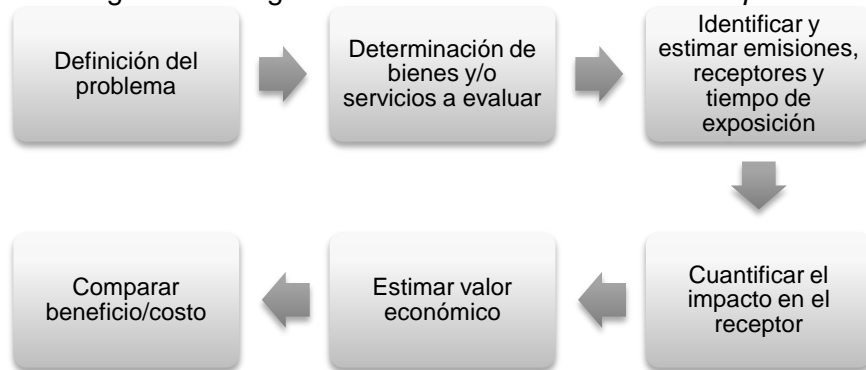
- 1) Función dosis-respuesta
- 2) Métodos directos
- 3) Métodos indirectos
- 4) Evaluación de expertos
- 5) Transferencia de beneficios

**Función dosis-respuesta.** La función dosis-respuesta considera la relación entre la unidad de concentración del contaminante (dosis) y su impacto en el receptor afectado (como la población, agua, cultivos y edificios). Dado que estos datos están directamente relacionados con el tamaño y la distribución territorial de la población se sugiere considerar distintos tipos de densidades de población. Así mismo DEFRA (Departamento de Medio Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales por sus siglas en inglés) propone dividir la población en pequeñas áreas, para cada área calcular el efecto en la salud mediante la multiplicación de un coeficiente de dosis-efecto (de datos estadísticos), la

concentración de contaminante en ese punto y un dato de referencia, una vez calculado el impacto, se suman los efectos sobre la salud por contaminantes de cada área.

Este tipo de métodos presenta ventajas como la versatilidad en la configuración de las alternativas a evaluar y visualizar explícitamente cuál de éstas causa más daños al ambiente y a la salud tomando como referencia datos estadísticos de organizaciones de prestigio. Sin embargo, también tiene desventajas como que en la mayoría de los casos no se cuenta con los datos estadísticos ni registros que proporcionen la información necesaria para una adecuada comparación. Otra desventaja es que no se consideran los impactos socio-económicos que se generan debido a los daños a la salud y al ambiente.

Figura 1.2 Diagrama del método *Función dosis-respuesta*



**Métodos directos.** La metodología de evaluación directa o de preferencia declarada, asume que el usuario (en este caso la población) es el mejor juez de sus intereses y que es apto para tomar decisiones adecuadas según sus preferencias.

La ventaja de estos métodos es que consideran a los principales beneficiados o perjudicados debido a la contaminación ambiental, lo que permite determinar la aceptación o rechazo social al plantearse diferentes escenarios. Sin embargo su principal desventaja es que no siempre las personas encuestadas tienen conocimiento de las dimensiones de los daños o efectos que podrían sufrir al exponerse a distintos contaminantes (en el aire, en el agua o en los alimentos) e ignoran los costos que implican los procesos o actividades evaluadas.

Figura 1.3 Diagrama de método directo.

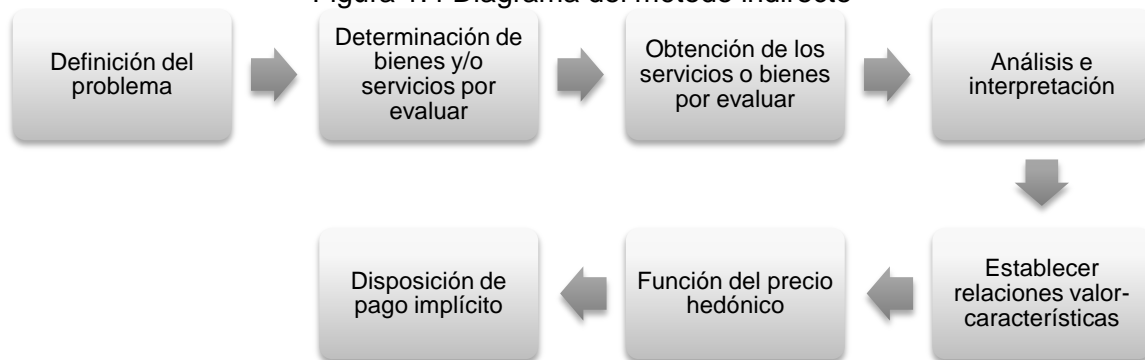


En general los métodos directos se enfocan en evaluar alternativas que permiten reducir efectos sobre el ambiente en el contexto de la salud humana y el paisaje, así como la pérdida de bienestar.

**Métodos indirectos.** En los métodos indirectos, las preferencias y por lo tanto, el valor implícito de las externalidades se determinan indirectamente cuando las personas compran los productos o servicios que están relacionados con el bien del medio ambiente.

Por ejemplo en el mercado de la vivienda los atributos ambientales de una propiedad varían según su ubicación, es decir por los niveles de ruido, la calidad del aire local y paisaje se ven reflejados en el precio de una propiedad. Lo que implica que dos propiedades idénticas que difieran sólo en la cantidad de ruido, se diferencian en precio a medida que la gente encuentra niveles de ruido más confortables. Es así como el indicador puede medirse como la diferencia de niveles de ruido registrado, por la diferencia de precios entre ambas viviendas. Además de identificar la diferencia monetaria causada por las condiciones ambientales, este método tiene la ventaja de que permite inferir cuánta gente está dispuesta a pagar por una mejora en el medio ambiente. Esta técnica puede ser utilizada para estimar los factores tales como los costos de pérdida de bienestar de la ubicación cerca de los rellenos sanitarios o plantas de tratamiento de residuos.

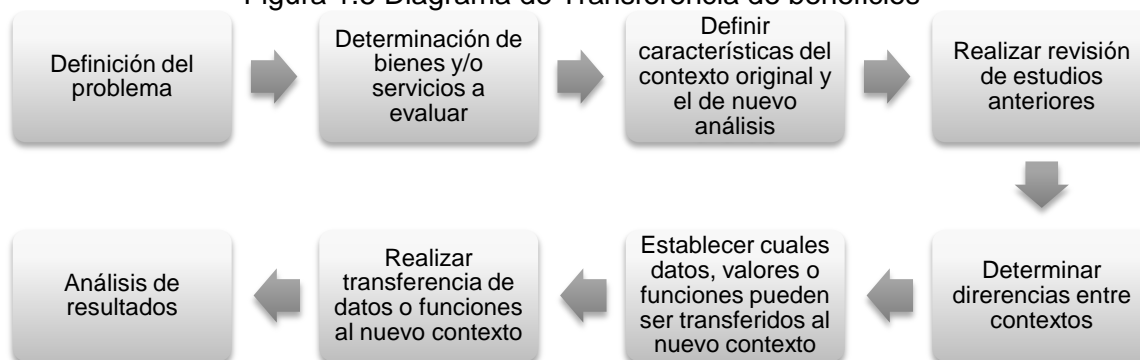
Figura 1.4 Diagrama del método indirecto



**Evaluación de expertos.** Representa un tipo de métodos ampliamente usados dentro del proceso de evaluación ambiental. En éste, los grupos de expertos identifican la información adecuada y elaboran modelos cualitativos y/o cuantitativos para la estimación de impactos ambientales se basan en el conocimiento, experiencia, intuición y criterio de profesionales especialistas en ámbitos ambientales.

**Transferencia de beneficios.** Debido a los altos costos que genera la implementación de las metodologías anteriormente presentadas, surgió una técnica que se basa en las estimaciones obtenidas en los estudios previamente realizados, con el fin de determinar el valor económico de un bien, servicio o daño ambiental en un sitio de estudio con diferentes características.

Figura 1.5 Diagrama de Transferencia de beneficios



Según Osorio (2003), el método de transferencia de beneficios se puede clasificar en dos tipos, transferencia de valores fijos y transferencia de funciones.

- Transferencia de valores fijos. En este método los efectos totales del sitio donde se va a realizar el análisis se estiman tomando los valores por unidad promedio provenientes de los datos del estudio original, es decir es la aplicación directa de las estadísticas de una investigación original a un nuevo sitio de análisis. La información que puede ser transferida son datos de medición de emisiones, valores de disponibilidad a pagar, afectación del bienestar de la población, tasas de mortalidad y morbilidad entre otros datos.
- Transferencia de funciones. Está orientada de una manera más técnica que la transferencia de valores, consiste en transferir modelos estadísticos que establecen la relación entre alguna variable y el efecto estimado. En este método es posible transferir datos de diferentes estudios lo que permite obtener resultados con mayor concordancia a las características del sitio de análisis.

La principal ventaja de este tipo de métodos es que no requiere de grandes inversiones, sin embargo los valores que se obtienen de la transferencia de beneficios no consiguen la validez de un estudio original. En muchos casos no se tiene la certeza de haber realizado una adecuada estimación hasta que no se logre realizar una investigación completa en el nuevo contexto.

Una vez propuestos y descritos los tipos de métodos y criterios utilizados en la presente tesis, a continuación se realiza un breve diagnóstico de la situación actual de los residuos sólidos urbanos de la Ciudad de México ya que para realizar la comparación entre alternativas se considera fundamental conocer el tipo y composición de los residuos, así como su volumen de generación.

## **Capítulo 2. Residuos sólidos**

Según la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA, 1998), los residuos se definen como cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control o tratamiento cuya calidad no permita usarlo nuevamente en el proceso que lo generó.

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR, 2003) define a los residuos sólidos como aquellos materiales o productos cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentran en estado sólido o semisólido. En función de sus características y orígenes, se les clasifica en tres grupos: residuos sólidos urbanos, residuos de manejo especial y residuos peligrosos.

El presente trabajo se enfoca en los residuos sólidos urbanos, sin embargo es importante establecer un marco de referencia acerca de las principales características de estos tres tipos de residuos.

*Residuos peligrosos (RP).* Se define como residuo peligroso a todos aquellos residuos, en cualquier estado físico, que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico-infecciosas (CRETIB), representen un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente (LGEEPA, 1998).

*Residuos sólidos de manejo especial (RME).* Son aquellos generados en los procesos industriales o productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos. Según la LGEEPA, los residuos de manejo especial son aquellos provenientes de rocas, materiales de construcción, productos generados en los servicios de salud, las actividades pesqueras, agrícolas, avícolas, servicios de transporte y tratamiento de aguas residuales (lodos), entre otros.

Dado que el presente trabajo se enfoca únicamente en los residuos sólidos urbanos a continuación se desarrolla un breve resumen sobre las características de composición y generación de este tipo de residuos y su situación en la Ciudad de México.

### **2.1 Residuos sólidos urbanos**

Los residuos sólidos urbanos o municipales (RSU), son aquellos generados en las casas habitación como resultado de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas (productos de consumo y sus envases o empaques). También provienen de cualquier otra actividad que se desarrolle dentro de establecimientos comerciales y de servicios, así como los resultantes de las vías, lugares públicos e industrias, siempre y cuando no reúnan las características para ser considerados como residuos peligrosos o de manejo especial (SEMARNAT, 2009a).

Entre los RSU se encuentran los residuos de alimentos fermentables (biodegradables), y los residuos sólidos no fermentables dentro de los que destacan los materiales combustibles como el papel, textiles y algunos polímeros; así como los materiales inertes, por ejemplo el vidrio, metales y cerámicos (Henry, 1999). Conocer acerca de su origen, características, composición y volumen de generación es fundamental para establecer la demanda de la infraestructura que se tiene que considerar para desarrollar un buen plan-



teamiento de manejo. El siguiente apartado aborda el tema de generación de RSU; cifras y factores que la alteran.

2.1.1 Generación de residuos sólidos urbanos.

Debido al crecimiento urbano, al desarrollo industrial, a las modificaciones tecnológicas y al cambio en los patrones de consumo de la población, la generación de RSU ha aumentado considerablemente en los últimos años. En el Distrito Federal, la generación total diaria es de 15,134 toneladas; lo que equivale a un total anual de más de 5 millones de toneladas (GODF, 2011), mientras a nivel nacional el total se estimó de más 41 millones de toneladas. La generación per cápita diaria aumentó 15% respecto al año 2000 y fue de 0.99 kg/hab-día (en 2000 era de 0.86 kg/hab-día). En las figuras 2.1 y 2.2 se presenta respectivamente, el aumento en la generación total y per cápita en nuestro país.

Figura 2.1 Generación total anual de RSU en México (2000-2011)

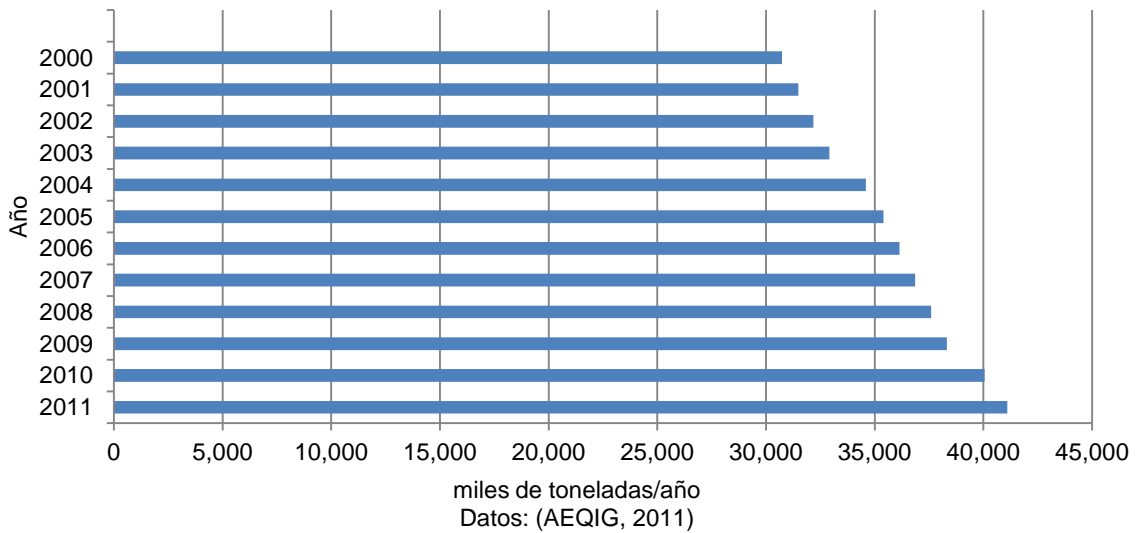
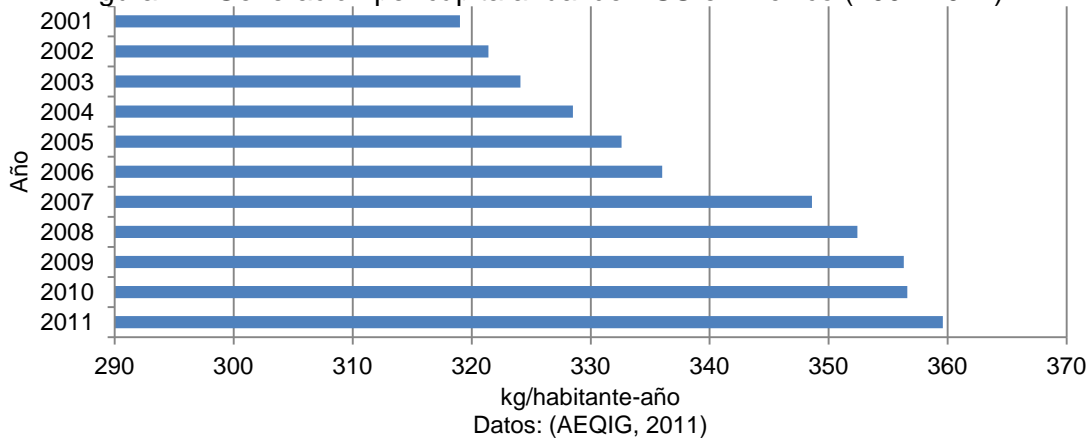


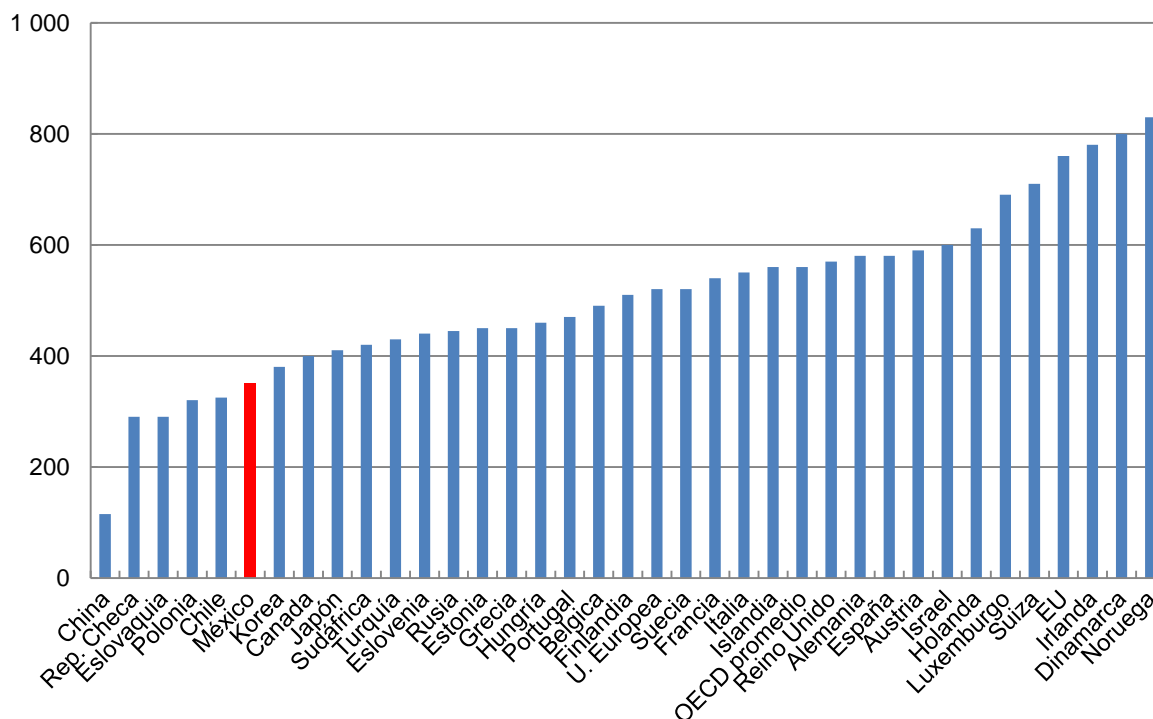
Figura 2.2 Generación per cápita anual de RSU en México (2001-2011)



Para ubicar a México dentro de un contexto mundial de generación de residuos sólidos urbanos se muestra en la figura 2.3, que en el año 2007 la generación per cápita anual de un ciudadano mexicano fue de 348 kg/hab-año, lo que equivale al triple de residuos de un

ciudadano chino y menos de la mitad del volumen producido por un habitante promedio de Noruega (OECD 2010). Cabe mencionar que la generación per cápita muestra diferencias importantes entre países, debidas a la influencia de factores geográficos, culturales y económicos.

Figura 2.3 Generación anual de RSU per cápita en países de la OECD, 2007 (kg/hab-año)



Fuente: (OCDE, 2010)

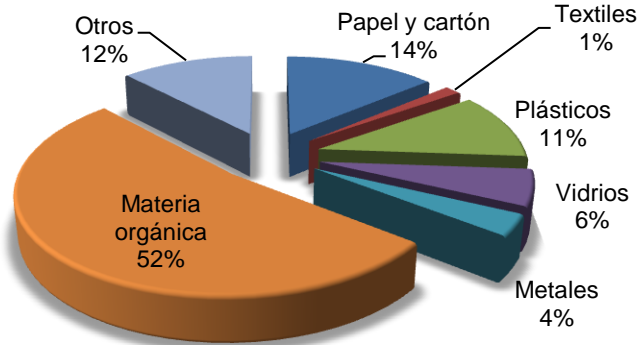
Una vez ubicado el contexto de la generación, a continuación se analizan las principales características de los RSU y algunas causas por las que se ven alteradas.

### 2.1.2 Características de los RSU

Para desarrollar programas de gestión ambiental adecuados es necesario conocer, además del volumen de la generación, las características físicas y químicas de los residuos.

*Composición.* Se determina mediante el método de cuarteo establecido por la norma NOM-AA-15-1985 y depende principalmente de las condiciones climáticas, el ingreso per cápita, las costumbres y el grado de urbanización de la comunidad que genera los RSU. Del total generado en la Ciudad de México en el año 2011 (ver figura 2.4), 21,544 toneladas fueron residuos orgánicos (52% del total), incluyendo alimentos, basura de jardín y madera (GODF, 2011).

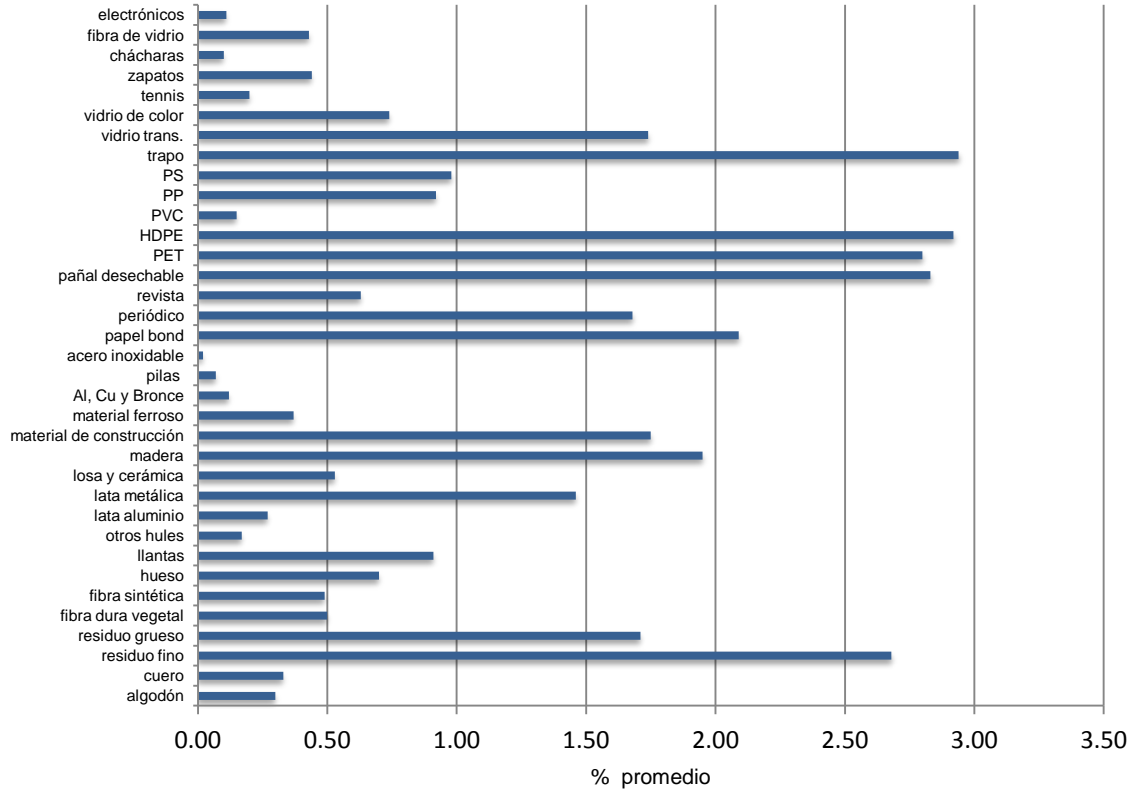
Figura 2.4 Composición de RSU en México (2011).



Datos: (AEQIG, 2011)

Se puede observar que los RSU se clasifican en siete principales categorías: orgánicos, papel y cartón, plásticos, vidrios, metales, textiles y otros. Sin embargo con la finalidad de facilitar su proceso de separación y manejo, los RSU de la Ciudad de México se clasifican en 51 tipos; muchos de ellos son susceptibles de ser reciclados, tales como metal, vidrio, papel y plásticos. En la figura 2.5 se muestran los principales componentes de los RSU en el año 2009, excluyendo los residuos alimenticios, residuos de jardinería, papel higiénico, cartón y plásticos de baja densidad (LDPE) que representaron el 34.9, 9.2, 6.72, 5.86 y 5.44%, respectivamente

Figura 2.5 Principales componentes de RSU en la ciudad de México (2009).



Fuente: (GODF, 2010)

*Peso volumétrico.* Es un factor crucial para determinar las dimensiones del equipo de recolección y tratamiento. Al manejar esta variable se debe considerar que el volumen de los residuos disminuye con el tiempo de almacenamiento y el equipo de compactación de camiones recolectores. Se expresa en unidades de masa sobre unidades de volumen.

*Humedad.* El grado de humedad de los residuos depende, además de la composición de los propios residuos, del clima y de la época del año; se mide en porcentaje en peso de agua. Cabe mencionar que los residuos con alto grado de humedad (más del 40%), no pueden ser incinerados directamente (ver capítulo 5), mientras que aquellos residuos orgánicos muy húmedos son aptos para el compostaje (ver sección 4.1).

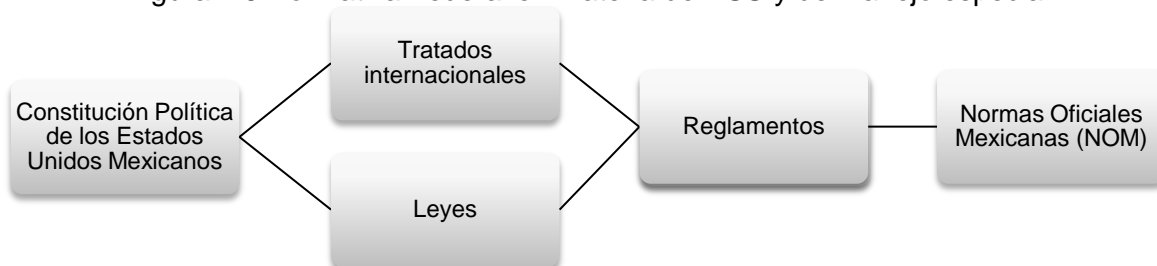
*Poder calorífico.* Se define como la cantidad de energía, por unidad de masa, que se desprende por la combustión completa y se expresa en J/kg o kcal/kg. Para la caracterización de combustibles se hace la distinción entre poder calorífico superior y poder calorífico inferior (Wark, 2001).

- *Poder calorífico superior.* Además del calor liberado por la quema del combustible, considera el calor de vaporización del agua formada.
- *Poder calorífico inferior.* No considera el calor de vaporización del agua que se forma durante la combustión.

### 2.1.3 Normatividad para el manejo de RSU

A nivel normativo existen disposiciones contenidas normas diversas, a continuación podemos observar las diversas normas a las que se debe atender para llevar a cabo el adecuado manejo de los residuos en México.

Figura 2.6 Normativa Federal en materia de RSU y de manejo especial



La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos establece en su artículo 115, fracción III, que los Municipios tendrán a su cargo las funciones y servicios públicos de limpia, recolección, traslado, tratamiento y disposición final de residuos, así mismo la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en su artículo 6 señala que compete a las entidades federativas y municipios la regulación del manejo y disposición final de los residuos sólidos que no sean peligrosos.

Entre las normas más importantes para el manejo de residuos en México está la NOM-083-SEMARNAT-2003, que establece las especificaciones de protección ambiental para la construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de Residuos sólidos urbanos y de manejo especial.

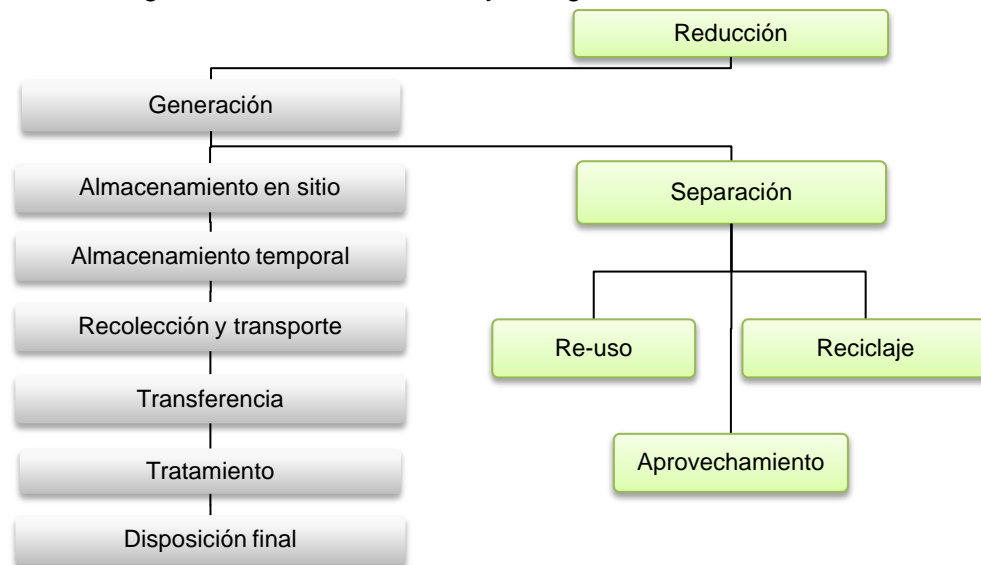
Para fines de este trabajo de investigación, en el que se comparan diferentes alternativas de manejo de residuos, entre éstas la incineración, es conveniente mencionar que la NOM-098-SEMARNAT-2002 rige el tema de protección ambiental en el proceso de incineración de residuos, determinando las especificaciones de operación y los límites de emisión de contaminantes.

A partir de las características de los RSU y la normatividad correspondiente se debe diseñar un sistema para el manejo integral para cada zona de generación. A continuación se revisan los conceptos relacionados con los sistemas de manejo de residuos sólidos urbanos.

## **2.2 Sistemas de manejo de los RSU.**

Un sistema de manejo de residuos (SMRSU) se considera formado por las etapas de: generación, almacenamiento, recolección, transporte, transferencia, tratamiento y disposición final (figura 2.7)

Figura 2.7 Sistema de manejo integral de RSU.



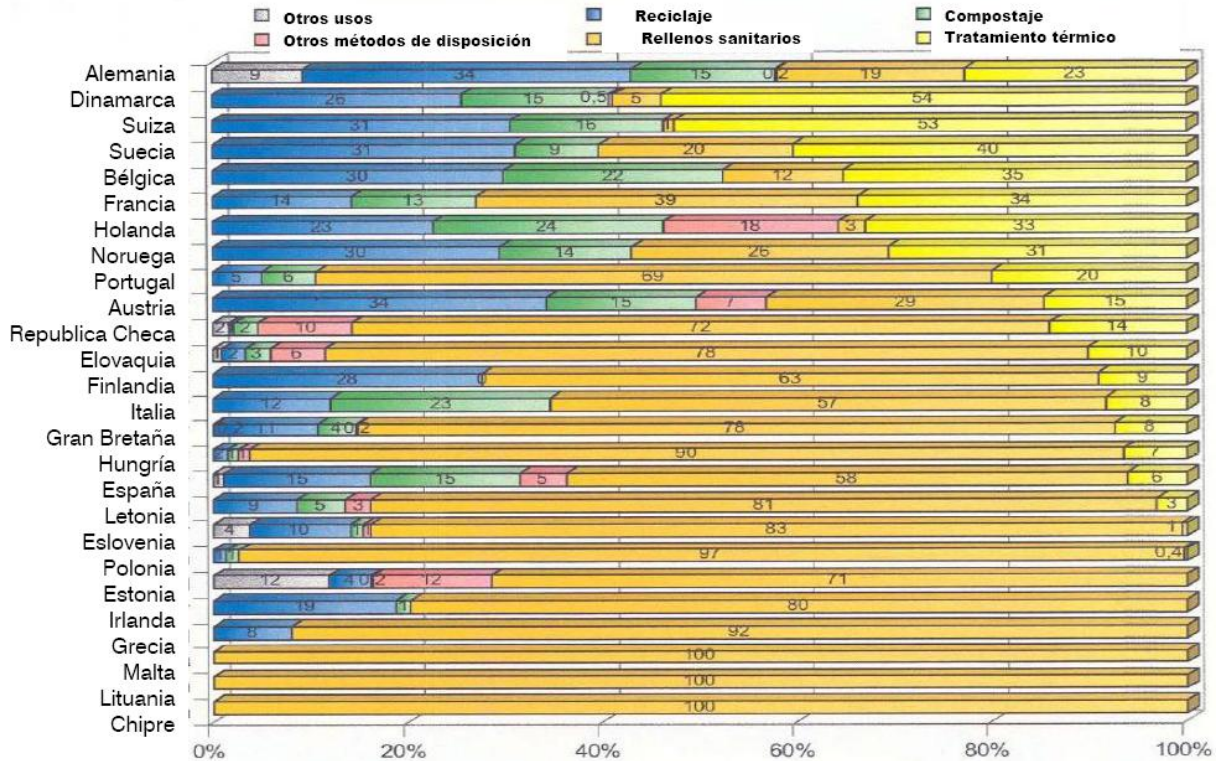
Cada una de estas etapas debe ser planteada para reducir y tratar de evitar los efectos negativos de los RSU al ambiente. Para este trabajo la etapa más importante es la de tratamiento, ya que es en ésta cuando se llevan a cabo los procesos correspondientes a la alternativa que se utilice, con el fin de reducir la emisión de contaminantes, realizar un adecuado monitoreo y captación de lixiviados y biogás, recuperación de energía entre otras cosas.

En esta investigación se abordan 5 alternativas para el manejo de RSU:

- Rellenos sanitarios
- Compostaje
- Digestión anaerobia
- Tratamiento mecánico biológico
- Incineración

En el mundo se han desarrollado tendencias de manejo de los residuos sólidos, en la figura 2.8 se observa que países como Dinamarca, Suiza y Suecia, utilizan la incineración como principal técnica de manejo de RS; en Alemania aproximadamente 23% del total de residuos es incinerado en plantas con recuperación de energía, mientras que en países como Chipre, Polonia, Letonia y España, los rellenos sanitarios representan más del 50%. En Bélgica, Italia y Holanda el compostaje aparece en altos porcentajes (entre 15% y 25%) como alternativa en el manejo de los residuos sólidos urbanos.

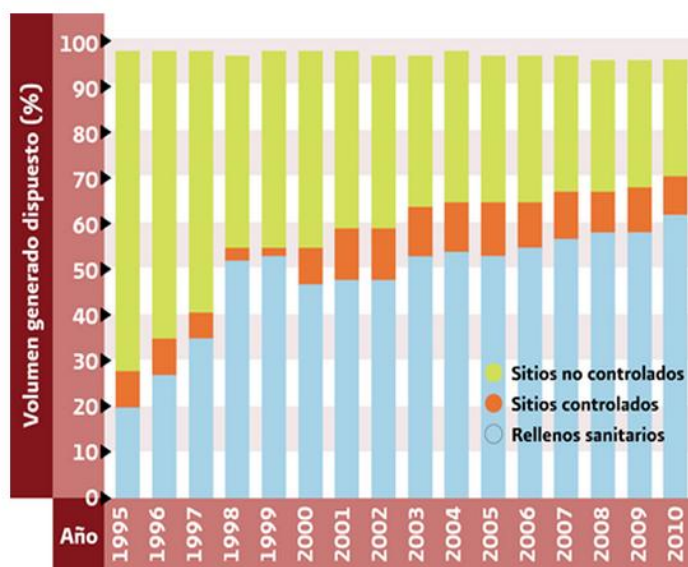
Figura 2.8 Manejo de los residuos sólidos en la comunidad europea (2006)



Fuente: (Gestión de estadísticas y servicios de ingeniería, Alemania 2006)

En México mientras la generación de RSU aumenta, el tratamiento prácticamente no existe y las formas de disposición de los residuos sólidos urbanos han cambiado relativamente poco, los principales son los siguientes: sitios no controlados, sitios controlados y rellenos sanitarios. La figura 2.9 muestra, para el periodo 1995-2010, la disposición final de los RSU en nuestro país.

Figura 2.9 Disposición final de residuos sólidos urbanos (1995-2010)



Fuente: SEMARNAT (2011)

Para 2010 se estima que el 62% de los RSU generados en el país se dispuso en rellenos sanitarios, 8 % en sitios controlados, 25% en sitios no controlados y el 5% restante es el porcentaje de residuos que son reciclados antes de ser dispuestos. Lo que se puede interpretar como un manejo inadecuado, ya que como se mencionó anteriormente los sitios controlados y los no controlados no cumplen con las especificaciones necesarias para reducir el impacto de la descomposición de los residuos al ambiente. Además el hecho de que únicamente 5% de los residuos sean reciclados previos a la disposición final a pesar de que la composición promedio de los residuos sólidos (figura 2.5) indica la presencia de materiales susceptibles a reciclaje como metales, cartón, papel, vidrio y plásticos, implica una deficiencia en el sistema de manejo de RSU en México.

### **2.3 Efectos del manejo de RSU**

Uno de los efectos más evidentes del manejo inadecuado de los RSU es el deterioro estético de las ciudades y del paisaje natural, con la consecuente devaluación de los predios donde se localizan los tiraderos como de las zonas aledañas por el abandono, la acumulación de basura y los olores desagradables que se generan, siendo uno de los efectos fácilmente observados por la población, sin embargo existen otros efectos que resultan peligrosos para la salud:

- *Generación de contaminantes del aire y gases de efecto invernadero:* la descomposición de los residuos orgánicos produce biogás, que es peligrosos por su toxicidad e incluso por su explosividad, además de ser de olor desagradable. Entre los gases vinculados a los residuos, destacan el bióxido y monóxido de carbono (CO<sub>2</sub> y CO, respectivamente), metano (CH<sub>4</sub>), y compuestos orgánicos volátiles (COVs), como la acetona, benceno, estireno, tolueno y tricloroetileno.
- *Contaminación de suelos y cuerpos de agua:* el depósito de residuos sólidos urbanos en arroyos y canales o su abandono en las vías públicas, puede causar durante la época de lluvia, estragos en los sistemas de drenaje y alcantarillado de la ciudad, generando inundaciones y ocasionando con ello daño hacia los bienes.

El contacto de los residuos con el agua propicia la formación de lixiviados (es decir, líquidos que se forman por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales), que contienen, en forma disuelta o en suspensión sustancias que se pueden llegar a infiltrar en los suelos o escurrir fuera de los sitios de depósito (SEMARNAT, 2009). Los lixiviados pueden contaminar los suelos y los cuerpos de agua, provocan su deterioro y representan un riesgo para la salud humana y de los demás organismos por su alto contenido de bacterias y otras sustancias contaminantes.

- Proliferación de fauna nociva y transmisión de enfermedades: los residuos orgánicos que se disponen inadecuadamente, atraen especies de insectos, aves y mamíferos que pueden transformarse en vectores de enfermedades peligrosas como la peste bubónica, tifus marino, salmonelosis, cólera, leishmaniasis, amebiasis, disentería, toxoplasmosis, dengue y fiebre amarilla, entre otras (SEMARNAT 2009).

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 tener en cuenta, entre otras consideraciones: el valor económico de algunos residuos con su probable mercado, el posible complemento entre los sistemas de tratamiento y disposición final, así como el costo que implican estos procesos.

Como se mencionó anteriormente, en la Ciudad de México los rellenos sanitarios sin tratamiento previo representan la principal alternativa de manejo de RSU. En el siguiente capítulo se revisa este método de disposición de RSU, sus características de construcción, operación y mantenimiento para analizar los factores que alteran su funcionamiento y determinar sus efectos sobre el ambiente y la sociedad.



## **Capítulo 3. Relleno sanitario**

De acuerdo a la NOM-083-SEMARNAT-2003 en México un relleno sanitario es una obra de infraestructura que involucra métodos y obras de ingeniería para la disposición final de los residuos sólidos urbanos, con el fin de controlar a través de la compactación e infraestructura adicional, los impactos ambientales que los RSU pueden generar.

Adicionalmente existen los sitios controlados y no controlados, los cuales no cumplen con las exigencias establecidas en la normatividad, entre una de ellas la impermeabilización, por lo tanto se consideran sitios ambientalmente inadecuados para la disposición de RSU.

Según la NOM-083-SEMARNAT-2003, un relleno sanitario debe cumplir con ciertas especificaciones, entre las que destacan:

- No debe ubicarse en zonas de manglares, pantanos humedales, recarga de acuíferos, fracturas o fallas geológicas.
- Ubicarse a una distancia mínima de 500m de poblaciones que cuenten con más de 2500 habitantes.
- Localización fuera de zonas de inundación
- Distancia mínima de 500 m de los cuerpos de agua
- Distancia mínima a un pozo de captación debe ser de 100 m

Para definir su ubicación, se debe realizar una serie de estudios y análisis geológicos, geohidrológicos, topográficos y geotécnicos para garantizar la protección del suelo, subsuelo, mantos acuíferos y la estabilidad del sitio de disposición final.

Ante el cierre eminente de la IV etapa del relleno sanitario de Bordo Poniente, el Gobierno del Distrito Federal realizó en el 2009 una identificación (en el D.F., Estado de México e Hidalgo) de terrenos viables para ser destinados a disposición final de los RSU que cumplieran con los requerimientos establecidos en la NOM-083-SEMARNAT-2003. A pesar de que se identificaron terrenos con factibilidad técnica, todos presentaron dificultades debido a la distancia, costo de suelo, costo de transporte o rechazo social, por lo que fueron descartados (GODF, 2010)

Un relleno sanitario debe contar con equipo e infraestructura para realizar durante la operación y por lo menos hasta 25 años después de la clausura, operaciones de monitoreo, captación y tratamiento de lixiviados y biogases.

Los rellenos sanitarios se pueden clasificar según el método de construcción y operación que se empleará en el proceso. También se clasifican según la maquinaria y herramienta utilizada y por el pre tratamiento que se le da a los RSU. A continuación se aborda el tema de su clasificación.

### **3.1 Clasificación de rellenos sanitarios**

De acuerdo a la NOM-083-SEMARNAT-2003 los rellenos sanitarios se pueden clasificar según el tonelaje de RSU que reciben diariamente y los niveles de compactación de residuos que se manejen como se muestra en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Categorías de los sitios de disposición final

Tipo	Tonelaje recibido ton/día	Compactación de los residuos kg/m <sup>2</sup>
A	más de 100	más de 600
B	de 50 a 100	más de 500
C	10 y menor a 50	más de 400
D	menor a 10	menos de 400

Fuente: NOM-083-SEMARNAT-2003

*Maquinaria.* Los rellenos sanitarios también se clasifican según el herramental utilizado para la colocación, homogeneización y compactación (SEEM, 2002):

- relleno sanitario mecánico
- relleno sanitario manual
- relleno sanitario mixto

Cabe mencionar que este tipo de clasificación está directamente relacionada con la cantidad de residuos que se manejen en el relleno, es decir, un relleno sanitario mecánico tiene la capacidad de manejar una mayor cantidad de residuos que un relleno manual, además se emplea maquinaria pesada para el acarreo y movimiento de los residuos y su compactación, por ende requiere de personal capacitado para la operación y mantenimiento de ésta, así como el uso de combustibles como diesel y gasolina.

*Procedimiento de construcción.* Dependiendo del procedimiento de construcción y operación, terreno disponible, los rellenos sanitarios se clasifican en:

- *Método de trinchera o zanja.* Este método se utiliza en regiones planas y consiste en excavar zanjas de dos o tres metros de profundidad con una retroexcavadora. Los RSU se depositan y acomodan dentro de la trinchera para luego compactarlos y cubrirlos con la tierra excavada.
- *Método de área.* Se aplica en áreas relativamente planas, donde no sea factible excavar fosas o trincheras para enterrar los residuos, esta puede depositarse directamente sobre el suelo previamente cubierto con una geomembrana de plástico. En estos casos, el material de cobertura deberá ser transportado desde otros sitios o extraído de la capa superficial.
- *Método de ladera.* El relleno se construye apoyando las celdas en la pendiente natural del terreno; es decir, los residuos se descargan en la base del talud, se extiende y compacta contra él y se recubre diariamente con una capa de tierra. (Tchobanoglous *et al.* 1982).

*Pre-tratamientos para un relleno sanitario.* Los RS, también se clasifican según el pre-tratamiento al que sean sometidos los residuos. Estos tienen la finalidad de aumentar la vida útil de los rellenos sanitarios además de incrementar el aprovechamiento de los gases producto de la descomposición de la materia orgánica, para su uso en sistemas de recuperación de energía. Este puede importante analizar estas tendencias para verificar bajo qué condiciones desde el punto de vista ecológico y económico, sería factible aplicarlas en México (CMIA, 2003).

*Relleno seco.* El pre-tratamiento de alta compactación, también conocido como “relleno seco”, tiene como objetivo acelerar y facilitar el control de los residuos que se depositan en rellenos sanitarios a través de la reducción de su volumen por su alto grado de com-

pactación que se logra con una prensa. Éste puede incluir algunos procesos previos adicionales como la selección manual, separación automatizada y el encapsulamiento de placas con plásticos. Esta técnica requiere de mucho equipo y maquinaria para llevar a cabo el proceso de separación, trituración, tamizado y empaqueo de materiales reciclables (papel, vidrio y plásticos, entre otros). Sin embargo, entre los beneficios que se pueden obtener se encuentran que permite aumentar hasta un 50% el tiempo de vida útil de un relleno sanitario, se reduce la cantidad de material de cobertura hasta en un 75%, elimina la necesidad de maquinaria pesada en el sitio se reducen los problemas de hundimiento en los rellenos, debido a la mayor densidad y consistencia de las celdas, así como se logra disminuir la carga orgánica y lixiviados, puesto que se separan en los escurrimientos ocasionados por la compactación.

*Relleno sanitario acelerado.* Su principal objetivo consiste en acelerar el proceso de descomposición y reducir el tiempo de estabilización de los residuos (ver siguiente capítulo). Para cumplir con este objetivo en esta alternativa se emplea la recirculación de lixiviados previamente inoculados con agentes enzimáticos, controlando la inyección en las celdas donde están depositados los residuos, en la cantidad y el tiempo que demande el proceso.

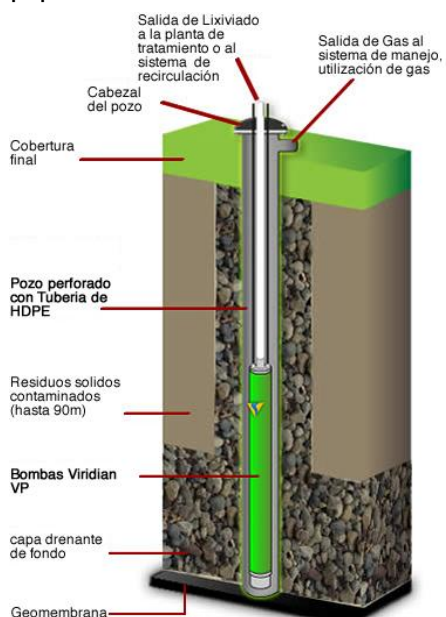
Para identificar las variables para la comparación del relleno sanitario como alternativa de manejo de residuos, en el presente trabajo se toman en cuenta los rellenos sanitarios sin pre tratamiento, ya que las alternativas de manejo de RSU que se desarrollan en los siguientes capítulos, son considerados como tratamientos previos al RS, es decir, los productos resultantes de las técnicas de incineración, biodigestores y compostaje son dispuestos en un relleno sanitario. Se asume también que el RS debe ser del tipo mecánico debido a la gran cantidad de RSU generada en la ciudad de México.

Es fundamental conocer lo que sucede dentro de un relleno sanitario, una vez que los residuos han sido confinados. Éstos están sometidos a cambios biológicos, físicos y químicos, que se llevan a cabo de manera simultánea; entre los que destacan: la descomposición biológica de materia orgánica, aerobia y anaerobia, la oxidación química de los materiales, la liberación de gases producto de la actividad microbiana sobre la materia orgánica, así como la formación y movimiento de lixiviados. Por lo que para llevar a cabo la adecuada planeación operación de un relleno sanitario, es necesario conocer los factores implicados en el proceso de descomposición y estabilización dentro del sitio.

### **3.2 Procesos de descomposición en un relleno sanitario**

Los rellenos sanitarios están expuestos a recibir agua debido a la precipitación pluvial. Al percolarse el agua a través del relleno, ésta disuelve diferentes componentes de los residuos, acción conocida como lixiviación. El líquido que resulta se llama lixiviado y tiende a acumularse al fondo del relleno, como se muestra en la figura 3.1.

Figura 3.1 Equipo de extracción vertical de lixiviados y biogás



Fuente: Viridian Colombia™, 2012

Mediante un sistema de captación vertical u horizontal, constituido por una serie de pozos, se logra la captación de biogás y lixiviados. Dichos pozos son conectados a la red que los conduce por separado a los sistemas de tratamiento. El sistema de captación debe contar con casetas de regulación y sistemas de monitoreo. Cabe mencionar que normalmente en nuestro país la captación de lixiviados es mediante un sistema horizontal. La composición típica de los lixiviados generados en un relleno sanitario se muestra en la tabla 3.2, se puede observar que la concentración de todos los componentes, así como la demanda de oxígeno disminuyen considerablemente con el paso del tiempo

Tabla 3.2 Composición típica de los lixiviados de un relleno sanitario

Componente	Relleno nuevo (menos de 2 años)	Relleno maduro (más de 10 años)
Demanda química de oxígeno (DQO)	3,000–60,000	100–500
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	2,000–30,000	100–200
Carbono orgánico total (COT) [mg/l]	1,500–20,000	80–160
Sólidos totales en suspensión (STS) [mg/l]	200–2,000	100–400
Nitrógeno total [mg/l]	20–1,600	100–160
Fósforo total [mg/l]	5–100	5–10
Alcalinidad como CaCO <sub>3</sub> [mg/l]	1,000–10,000	200–1,000
Dureza total como CaCO <sub>3</sub> [mg/l]	300–10,000	200–500
Calcio (Ca <sup>2+</sup> ) [mg/l]	200–3,000	100–400
Magnesio (Mg <sup>2+</sup> ) [mg/l]	50–1,500	50–200
Potasio (K <sup>+</sup> ) [mg/l]	200–1,000	50–400
Sodio (Na <sup>+</sup> ) [mg/l]	200–2,500	100–200
Cloro (Cl <sup>-</sup> ) [mg/l]	200–3,000	100–400
Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) [mg/l]	50–1,000	20–50
Fierro total [mg/l]	50–1,200	20–200
pH	4.7–7.5	6.6–7.5

Fuente: Kiss, 2006

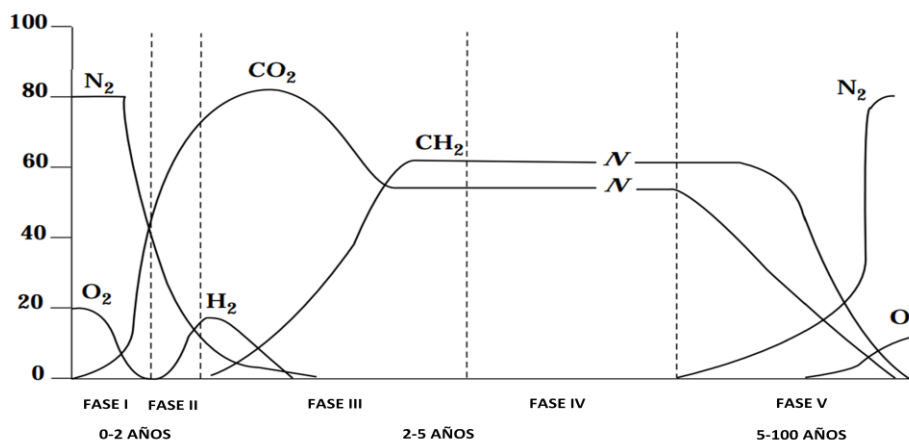
La composición típica de los lixiviados generados en un relleno sanitario se muestra en la tabla 3.2, se puede observar que la concentración de todos los componentes, así como la demanda de oxígeno disminuyen considerablemente con el paso del tiempo.

Los componentes tóxicos derivados de la lixiviación de los residuos pueden llegar a contaminar el suelo y los cuerpos de agua, afectando por ende la salud humana (Kiss, 2006). Causa por la que deben ser bombeados o conducidos por gravedad a un tanque o vaso recolector para someterlo a tratamiento. La composición de los lixiviados en un relleno sanitario varía con el tiempo, los lixiviados que se forman por los residuos que han sido recientemente depositados en el RS (menos de 2 años) pueden ser altamente contaminantes debido a su gran contenido de carga orgánica. Cabe mencionar que existen diferencias en la calidad de los lixiviados, las cuales se deben principalmente a la cantidad de materia orgánica y sus niveles de humedad; si estos niveles son altos, la materia se degrada rápidamente y produce altas concentraciones de ácidos y amoníaco, los cuales se diluyen en el lixiviado, disminuyen el pH y ayudan, con el paso del tiempo, a la solubilización de los metales presentes en los RSU dispuestos en el relleno (Giraldo, 2001).

En la figura 3.2, se muestra una idealización del proceso de descomposición en un RS, dividido en cinco fases. La fase I corresponde a la descomposición aerobia, ya que cierta cantidad de aire es atrapada dentro del relleno. Los productos de la descomposición aerobia principalmente son dióxido de carbono, amoníaco (que posteriormente se convierte en nitrato) y agua, así como productos de oxidación.

Debido a que los procesos de oxidación son exotérmicos (Kiss, 1998), la temperatura en el relleno aumenta (de 10 a 20 °C más que la temperatura ambiente), lo que ocasiona evaporación de agua y por ende, en esta fase de descomposición prácticamente no se forman lixiviados.

Figura 3.2 Fases de descomposición reflejadas en la evolución idealizada de la composición del biogás.



Fuente: Kiss, 2006.

Tan pronto se consume el oxígeno atrapado, la descomposición se convierte en un proceso anaerobio (fase II). En esta fase de transición a descomposición anaerobia, conocida como "fase ácida" ya no se genera evaporación debido a que los procesos bioquímicos de metabolismo microbiano limitan el aumento de temperatura, además de que las condicio-

nes del ambiente externo ya no influyen en el proceso (Kiss, 1998). En el proceso anaerobio las temperaturas alcanzadas (de 35 a 50° C) son menores a la temperatura de oxidación (60° C), lo que da lugar al descenso del nivel de pH.

En las fases III y IV, los ácidos son transformados en biogás, por lo que aumenta el pH y disminuye la concentración de lixiviados. En estas fases se alcanza una concentración estable de la composición del biogás; CH<sub>4</sub> 55% y CO<sub>2</sub> entre 40 y 50% (Kiss, 2006).

Finalmente la fase V es la etapa final de estabilización de los residuos. Regularmente ocurren en los rellenos sanitarios recién clausurados.

Debido a que la composición del biogás puede variar dependiendo de las características del sitio y en función del tiempo, resulta complicado determinar exactamente su composición para todas las emisiones gaseosas de los rellenos sanitarios. En la tabla 3.3 se presentan los valores más frecuentes encontrados en la literatura.

**Tabla 3.3 Composición típica del biogás producido en rellenos sanitarios**

<b>Componente</b>	<b>% en volumen</b>
metano (CH <sub>4</sub> )	40-60
dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	40-50
nitrógeno (N <sub>2</sub> )	2-3
sulfuro de hidrógeno (H <sub>2</sub> S)	1-2
hidrógeno (H <sub>2</sub> )	traza
oxígeno (O <sub>2</sub> )	traza
monóxido de carbono (CO)	traza
amoníaco (NH <sub>3</sub> )	traza
hidrocarburos aromáticos y cíclicos	traza
compuestos orgánicos volátiles (COV)	traza

Fuente: Kiss, 2006.

Se puede decir que prácticamente la mitad de los gases generados, corresponde a metano CH<sub>4</sub> y la otra mitad a dióxido de carbono CO<sub>2</sub>, presentando trazas de otros gases como amoníaco NH<sub>3</sub>, hidrógeno H<sub>2</sub> y monóxido de carbono CO.

El contenido de metano en el biogás generado decae con el paso del tiempo, disminuyendo su proporción desde 40-60% en los primeros años de un relleno hasta 25-45% en los años finales. La vida útil de los sistemas de captación puede ser bastante larga (15 años o más), sin embargo debido a que los costos por mantenimiento son elevados, regularmente sólo se emplean entre 3 y 8 años (Colmenares, 2003).

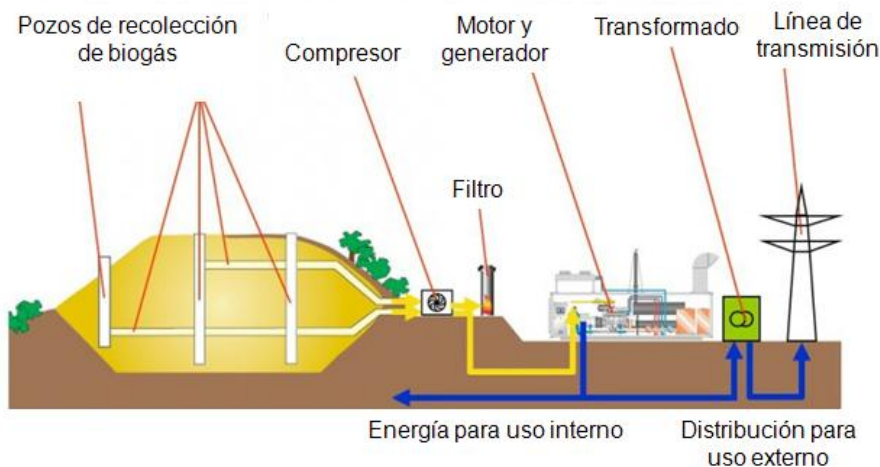
La experiencia empírica de países desarrollados demuestra que la generación de biogás se aproxima a los 200 Nm<sup>3</sup> (Nm<sup>3</sup> = metro cúbico normal) por cada tonelada de RSU depositada en un relleno sanitario. En México este cálculo se puede hacer de una manera muy aproximada con el "Modelo mexicano del biogás V 2.0" generado por la Agencia de Protección al Ambiente de Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés). El cual es un modelo complejo que considera variables como la eficiencia del sistema de captación del biogás, la composición de los RSU, las dimensiones del relleno sanitario (superficie del terreno y dimensiones de la celda diaria) y la cantidad de RSU que se depositan en el RS.

En el presente trabajo se toma en cuenta un dato estimado por la EPA en el año 2010 con dicho método aplicado al relleno sanitario “La montaña” que se encuentra en Guadalajara Jalisco. Que establece que para ese año, se dispusieron 106,000 toneladas de RSU, las cuales permitieron captar aproximadamente 3,522 toneladas metano en ese año (considerando que el 50% del total de biogás generado es metano y que se cuenta con una eficiencia de captación del 46%). Por lo que se puede decir que en ese relleno se aprovecharon 33 kg de CH<sub>4</sub> por tonelada de residuos.

Para fines del presente trabajo se considera que el metano que se obtiene de un relleno sanitario sin tratamiento previo, puede utilizarse para la generación de electricidad. Según Arvizu y Huacuz en su publicación: *Biogás de rellenos sanitarios para producción de electricidad*, 2003, es posible generar 0.001 kW por tonelada de residuos confinada en un relleno sanitario.

El proceso de generación comienza con la extracción del biogás a través de pozos verticales (figura 3.1) instalados a lo largo del relleno sanitario, el biogás es conducido mediante una red superficial de tuberías hasta una estación en donde es tratado con equipos que se encargan de quitar la humedad y otras sustancias indeseables, con la finalidad de tener una mejor combustión. Posteriormente se emplea un motor de combustión que está conectado con un generador eléctrico (Figura 3.3). En el proceso se generan gases productos de combustión, principalmente CO<sub>2</sub>, sin embargo es común que no se logre una combustión completa lo que propicia la formación de monóxido de carbono CO (ver capítulo 4. Incineración).

Figura 3.3. Esquema de generación de electricidad en un relleno sanitario



Fuente: Arvizu, 2003

### **3.3 Variables de comparación**

Una vez abordado el tema de las características principales y procesos de descomposición de los residuos en un relleno sanitario, se considera que la configuración que puede satisfacer la demanda que implica la gran cantidad de generación de residuos en la Ciudad de México, es un RS de tipo mecánico y sin pre tratamiento (las alternativas que se abordan en los siguientes capítulos son consideradas tratamientos previos a la disposición final). Con el uso de maquinaria pesada es indispensable el uso de combustibles

como el diesel y la gasolina, además de contar con el personal operativo y de mantenimiento capacitados.

Cabe mencionar que se considera que la cantidad de residuos degradables destinados a un relleno sanitario equivale al 100% de los residuos degradables recolectados, para las demás alternativas dicha cantidad varía dependiendo del tratamiento.

Con estas consideraciones las variables de mayor relevancia que se identifican como posibles indicadores para comparar esta alternativa se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.4 Variables para relleno sanitario

<b>Relleno sanitario</b>	
<b>Variable</b>	<b>Observaciones</b>
Costo por tonelada de RSU	275 pesos/ton
Maquinaria pesada(movimiento y compactación de residuos)	Costo inicial, mantenimiento y operación
Equipo de captación de lixiviados	-
Equipo de captación de biogás	-
Equipo de tratamiento de biogás	-
Necesidad de personal operativo capacitado	Construcción, operación y mantenimiento
Emisión de CO <sub>2</sub> por tonelada de RSU	33 kg/ton (sin considerar la maquinaria)
Emisión de CH <sub>4</sub> por tonelada de RSU	33 kg/ton
Emisión de CO	Principalmente debido a la maquinaria
Formación de lixiviados	Con gran carga orgánica y metales pesados
Requerimiento de separación previa	Los residuos no se separan
Tiempo de estabilización de los residuos	5 a 10 años
Generación de olores	rechazo social y pérdida de bienestar
Deterioro estético	pérdida de bienestar y devaluó de predio
Generación de energía eléctrica por tonelada de residuos	0.001 kW/ton
Empleo de combustibles	En maquinaria (diesel y/o gasolina)
Volumen de desechos degradables llevados a disposición final	100%
Tiempo de vida del sitio de disposición final	Entre 7 y 15 años (Smith, 2001)

Un rubro importante a ser considerado para la comparación de alternativas de manejo de residuos es el costo por tonelada de residuos. En el caso de los rellenos sanitarios, normalmente se toma en cuenta desde la recolección, la separación, el trayecto de la estación de transferencia al sitio de disposición final. En el año 2007 se llevó a cabo una evaluación de costos en un relleno sanitario de la ciudad de Toluca en el Estado de México, con el que se determinó una generación de aproximadamente 723.3 toneladas diarias de residuos. El costo estimado en este estudio por tonelada recolectada diariamente es aproximadamente de \$236.00 y por tonelada en disposición final de \$275.00. Lo que implica que es más cara la disposición que la recolección (Iglesias, 2007).

El tiempo de vida del sitio de disposición final se ha seleccionado como posible indicador, ya que al aplicar algún tratamiento como los que se desarrollan en los siguientes capítulos, el tiempo de vida de los rellenos sanitarios aumenta.

En la siguiente tabla se muestran las ventajas y limitaciones identificadas para el relleno sanitario como alternativa de manejo de los RSU de la ciudad de México.



Tabla 3.5 Ventajas y limitaciones del Relleno Sanitario

Alternativa	Ventajas	Limitaciones
<b>Relleno Sanitario</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Genera empleo de mano de obra poco calificada</li> <li>• Permite recolectar biogás para posteriormente generar energía eléctrica</li> <li>• Puede tratar toda clase de RSU</li> <li>• Al cierre, la superficie puede ser empleada como área de recreación</li> <li>• No requiere de separación previa</li> <li>• Prácticamente no requiere del empleo de energía eléctrica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No es aplicable en todo tipo de suelos</li> <li>• Requiere de grandes extensiones de terreno</li> <li>• Los predios situados alrededor, se devalúan</li> <li>• Se requiere de impermeabilidad en el suelo para que los lixiviados no contaminen</li> <li>• Requiere de maquinaria pesada</li> <li>• No puede ubicarse dentro de la zonas urbanas</li> <li>• Los sistemas de captación de biogás no son lo suficientemente para evitar la emisión de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub></li> </ul>

A continuación se analizan tres alternativas de manejo que se basan en la estabilización de los residuos previa a su disposición en un relleno sanitario consideradas en este trabajo pues en países como Alemania, Dinamarca y Suiza se les da preferencia sobre el relleno sanitario sin tratamiento previo y resulta interesante determinar si son aplicables considerando que las características de los RSU de la Ciudad de México son distintas a las de los países antes mencionados.

## **Capítulo 4. Compostaje, biodigestión y tratamiento mecánico-biológico**

Debido a la gran cantidad de generación de residuos sólidos urbanos, la baja disponibilidad de terrenos para depositarlos y el rechazo social a los rellenos sanitarios, alrededor del mundo se han desarrollado técnicas de tratamiento que se aplican a los RSU antes de ser llevados a la disposición final. Dichas alternativas se enfocan en acelerar el proceso de descomposición de la materia degradable contenida en los residuos, reduciendo su volumen y carga orgánica.

A continuación se determinan las características y los procesos correspondientes a las tres técnicas consideradas en este capítulo: compostaje, digestión anaerobia y tratamiento mecánico-biológico como posibles alternativas para disminuir el impacto ambiental, económico y social que pueden generar los RSU de la Ciudad de México.

### **4.1 Compostaje**

El compostaje tiene como objetivo transformar la materia biodegradable en un producto útil que se puede aplicar a la tierra como mejorador de suelo para aumentar su fertilidad. Al producto de la descomposición biológica aerobia de residuos orgánicos en condiciones controladas se le conoce como composta, mientras que al proceso de descomposición en ausencia de oxígeno libre se le conoce como digestión anaerobia. La composta es un material inodoro que no presenta riesgo sanitario para el ambiente (SEMARNAT-INE, 2006b).

#### **4.1.1 Proceso de descomposición en el compostaje.**

El compostaje por efecto de la actividad microbiológica presenta variaciones en la temperatura debido a la degradación de la materia orgánica. Este proceso normalmente se divide en dos fases: termófila y de maduración. En la fase termófila se produce un aumento progresivo de temperatura que se genera debido a un alto grado de actividad microbiológica. A medida que se desarrolla la población microbiana en la materia, aumenta la demanda de nutrientes mismos que comienzan a agotarse y debido a esto, la cantidad de bacterias comienza a disminuir y con ello la actividad microbiológica se ve reducida. Es en la etapa de maduración cuando la temperatura es más estable y entonces se dice que la composta se estabiliza. El proceso de compostaje presenta variaciones debido a la actividad combinada de una amplia gama de poblaciones de bacterias y hongos, ligados a una sucesión de ambientes que son definidos por factores como la temperatura, humedad y composición de la materia orgánica. Cada población bacteriana requiere de ciertas condiciones ambientales para su desarrollo, es por eso que simultáneamente cuando una población comienza su aparición, otras se encuentran en el momento más elevado de actividad y otras empiezan a desaparecer. De esta forma se complementan las actividades de los diversos grupos (MTASE, 2009).

La principal diferencia entre el proceso de compostaje y el proceso de descomposición natural, es que en el compostaje se ejerce un control sobre el proceso. Es precisamente controlando ciertos parámetros, que se puede proporcionar a los microorganismos condiciones idóneas para que realicen su actividad de una manera más rápida y eficaz.

Entre los parámetros más importantes en el proceso de compostaje, destacan la temperatura, humedad, oxígeno, balance de nutrientes y pH.

- *Temperatura.* Los microorganismos que toman parte en la descomposición de los residuos sólidos son principalmente hongos y bacterias, mantienen su actividad en un determinado intervalo de temperatura, de esta manera, es posible distinguir entre organismos mesófilos y termófilos que desarrollan su actividad de 15°-45°C y de 45°-70°C respectivamente. La velocidad con que se incrementa la temperatura depende de la composición de la materia orgánica y de los factores ambientales, pero en general se considera que como mínimo, dos días después de haberse depositado los residuos orgánicos en la pila de compostaje, la temperatura debe haber llegado a los 55°C. Los grupos que son beneficiados con esta temperatura descomponen la materia orgánica y la utilizan como fuente de energía, desprendiendo calor y CO<sub>2</sub> (MTASE, 2009).

Es conveniente que la temperatura se mantenga entre los 50 y 70°C durante los primeros días, con la finalidad de eliminar parásitos y microorganismos patógenos y conseguir un control adecuado del producto. Sin embargo, si la temperatura se incrementa en demasía podría producir la muerte de los microorganismos implicados en el desarrollo del proceso. Con esto se produciría una reducción de la actividad microbiológica y en consecuencia una disminución en la velocidad de descomposición de los residuos (MTASE, 2009).

- *Humedad.* Este factor afecta la composición y la actividad microbiológica, ya que está relacionada directamente con la temperatura y el grado de descomposición de la materia orgánica. Es deseable que la humedad no rebase un valor del 70%, ya que si se excede, el agua comenzaría a desplazar al aire, entonces el proceso de descomposición variaría hacia reacciones anaerobias. Por otra parte, si la humedad baja a menos del 40% disminuye la actividad de los microorganismos y en efecto, el proceso de descomposición se retrasa. Es por eso que el intervalo más conveniente de humedad para un adecuado compostaje es entre 40% y 70% (SEMARNAT-INE, 2006b). Al final del proceso la humedad se encuentra normalmente entre el 30% o 40%.

El valor de humedad varía según el método de compostaje, el tamaño de pila y la composición de la materia orgánica. En caso de haber humedad excesiva se debe airear la mezcla o agregar elementos secos como paja y papel. Si falta humedad, se puede regar la mezcla o taparla con plástico para reducir la evaporación de agua.

- *pH.* Los grupos de bacterias y hongos se desarrollan en rangos de pH diferentes, esto influye directamente en el proceso de descomposición. En general los hongos se desarrollan en un rango de pH, que va de 5 a 8, mientras que las bacterias requieren un rango de pH entre 6 y 7.5.  
El pH inicial depende del tipo de residuo o mezcla de residuos y varía conforme avanza el proceso. Inicialmente el pH disminuye por la formación de ácidos que se originan debido a la acción de los microorganismos, con esto se favorece al crecimiento de hongos. Posteriormente el pH aumenta hasta valores de 8 a 9

debido a que se forma amoníaco por la desaminación de las proteínas. Después el pH se estabiliza manteniéndose en un rango de 7 a 8 (MTASE, 2009).

Dependiendo de la composición de la materia orgánica a descomponer, a veces es necesario alterar los niveles de pH en la materia prima, esto se puede hacer de varias formas entre las que destaca añadir cal u otros productos para alcanzar un pH entre 7 y 8 sobre la escala.

- *Relación carbono/nitrógeno.* El carbono y el nitrógeno son dos elementos esenciales para la nutrición de cualquier organismo vivo y por ende deben encontrarse en proporciones adecuadas para un buen proceso de compostaje. Los microorganismos en el compostaje adquieren energía de los enlaces de carbono, mientras que el nitrógeno lo emplean para la síntesis de proteínas. La relación carbono/nitrógeno (C/N) es el parámetro que mide la proporción de dichos elementos, los valores ideales en un buen proceso de compostaje se encuentran entre 25 y 35, es decir 25 partes de carbono por una de nitrógeno (SEMARNAT-INE, 2006b).

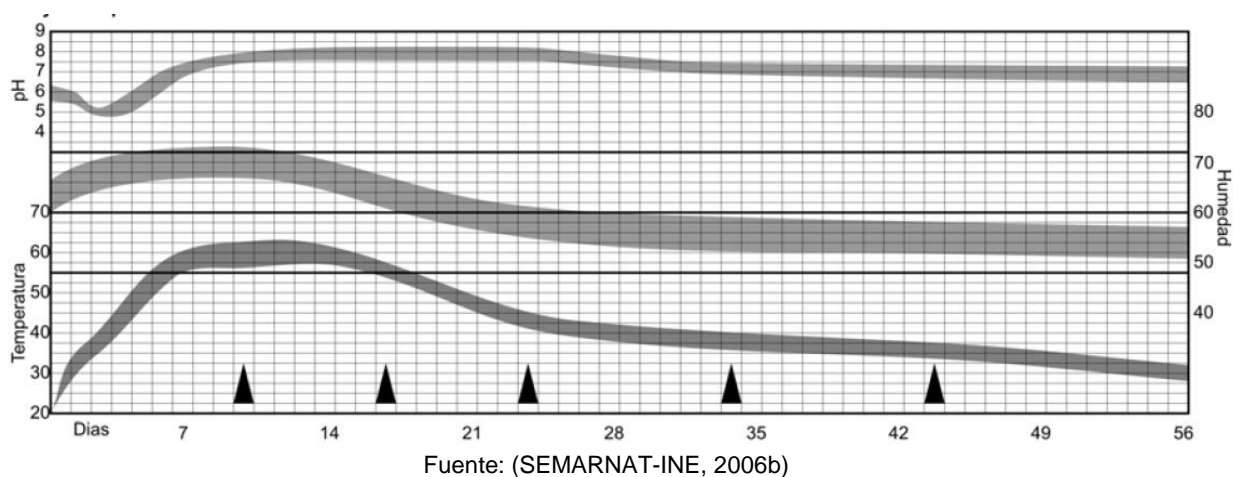
Si el material que será destinado a compostaje contiene demasiado carbono, el valor de C/N se incrementa y esto disminuye la velocidad de compostaje ya que la temperatura no se incrementará y se perderá el exceso de carbono en forma de CO<sub>2</sub>. Por el contrario, si existe un exceso de nitrógeno, la relación C/N disminuye y se generan pérdidas de N en forma de amoníaco (NH<sub>3</sub>). Para contrarrestar el exceso de carbono en los residuos, se debe añadir materia rica en nitrógeno, como estiércol y lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales. En cambio cuando la relación C/N es baja se deben añadir componentes con altos niveles de carbono como paja y desperdicios de papel.

Durante el proceso de compostaje se genera CO<sub>2</sub> lo que produce que la relación C/N disminuya paulatinamente hasta alcanzar un valor que normalmente se encuentra entre 8 y 12 en el producto final (SEMARNAT-INE, 2006b).

Según la EPA, en el proceso de compostaje se generan 17.5 kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de residuos tratados, por lo cual si en la ciudad de México los residuos degradables que se generan diariamente (7,870 toneladas. GODF, 2011) fueran sometidos al proceso de compostaje, se generarían aproximadamente 137 toneladas de CO<sub>2</sub> (EPA, 2006).

- *Oxígeno.* Es el elemento esencial para que exista una descomposición aerobia en la generación de composta. El oxígeno debe ser el suficiente para mantener la actividad microbiológica. Si llegase a faltar el oxígeno necesario, las bacterias aerobias comienzan a agotarse y con ella el rendimiento del proceso (SEMARNAT-INE, 2006b). Para asegurar la suficiencia de oxígeno se utiliza la granulometría, es decir, incluir partículas de diferentes tamaños en la pila de composta para generar espacios por donde circula el aire (aireación natural). Así mismo se puede utilizar el volteo de pilas (aireación mecánica o manual), o bien, introducir tuberías en la mezcla, a través de las cuales el aire es forzado a circular (aireación forzada). En la figura 4.1 se muestra la variación de la temperatura, pH y humedad en función del tiempo de composteo.

Figura 4.1 Valores sugeridos para los parámetros del compostaje.



Todos estos parámetros se pueden controlar según el tipo de compostaje que se lleve a cabo. Este proceso se clasifica principalmente por la cantidad de residuos que son tratados, en compostaje doméstico y compostaje en planta. En el siguiente apartado se aborda el tema de las características que se requieren en una planta de compostaje.

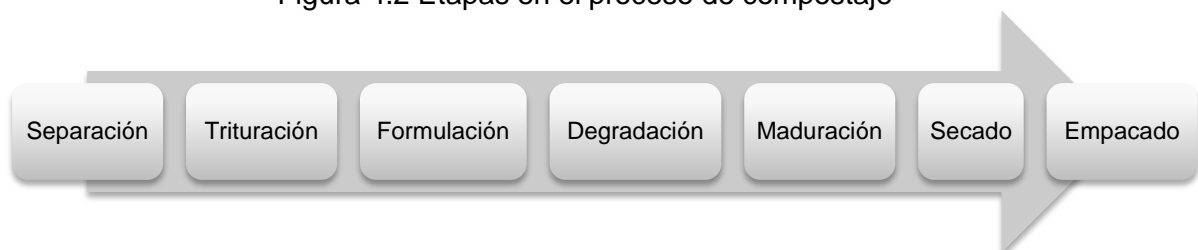
#### 4.1.2 Características de construcción y operación de una planta de compostaje

Para la selección de un lugar adecuado donde establecer una planta de compostaje se deben considerar diversos factores, entre los que destacan:

- *Restricciones normativas.* Las principales son las relacionadas con el uso del suelo, como los planes de desarrollo urbano, los programas de ordenamiento ecológico y territorial o las declaratorias de áreas naturales protegidas.
- *Distancia promedio que recorren las materias primas.* Esta distancia debe ser la más corta posible para evitar altos costos de transporte. Incluye la distancia desde el punto de generación de los RSU, la distancia a la planta de compostaje y la distancia al sitio de disposición final.
- *Distancia a la fuente de agua.* Durante las temporadas de baja actividad pluvial, es necesario adicionar agua al proceso de compostaje y por tal motivo debe existir una fuente que abastezca del líquido. En caso de no contar con esto, se debe considerar una disminución de las actividades durante la época seca y el almacenamiento de agua en temporada de lluvias para su almacenamiento posterior en el proceso.
- *Tamaño de predio.* Una planta de compostaje requiere de una gran extensión territorial, por lo que es necesario contar con un área mínima de una hectárea para tratar de 10 a 30 toneladas diarias de residuos (SEMARNAT-INE, 2006).

En una planta de compostaje de residuos se llevan a cabo varios procesos. Los más comunes son: separación de residuos, trituración, formulación, degradación, maduración, secado y empaclado.

Figura 4.2 Etapas en el proceso de compostaje



Las plantas de compostaje son diseñadas con base al tipo de operación que se llevará a cabo. A continuación se describen brevemente los tipos de plantas más comunes.

- *Planta de operación manual.* Es el tipo más sencillo de planta, se diseña para una operación 100% manual y el mínimo de personal posible. Este tipo de plantas puede producir hasta 50 t/año de composta. Los procesos se llevan a cabo manualmente únicamente con herramientas, excluyendo los procesos que requieran de maquinaria.
- *Plantas parcialmente mecanizadas.* Este tipo de planta cuenta con equipo (cargador frontal o retroexcavadora) para facilitar las operaciones en el proceso de compostaje. Puede producir hasta 500 ton/año de producto. También es posible contar con bombas y tanques de agua, generadores de electricidad, equipo de control (termómetro y medidor de pH y humedad), báscula, entre otros.
- *Plantas mecanizadas.* A diferencia de las plantas parcialmente mecanizadas, en este tipo de plantas se cuenta con un equipo especializado para realizar cada operación. Se pueden procesar hasta 1000 ton/año de composta. Debido a su capacidad de producción es necesario contar con un mercado de composta suficiente para poder comercializar el producto. En la figura 4.3 se puede observar el diagrama de proceso de una planta de este tipo.

Figura 4.3 Diagrama de proceso de una planta de compostaje mecanizada.



- |   |   |
|---|---|
| 1) Edificio de servicios y oficinas                     | 6) Cosechado y cribado                      |
| 2) Zona de recepción de los residuos orgánicos líquidos | 7) Separación y empaçado                    |
| 3) Zona de pretratamiento y mezclado                    | 8) Tanque de recolección de aguas pluviales |
| 4) Fase de descomposición                               | 9) Tanque de lixiviados                     |
| 5) Fase de maduración en pilas de aireación             | 10) Zona de monitoreo del proceso           |

Fuente: (ARC, 2009).

Para determinar las variables que permitan comparar para esta alternativa se considera una planta de compostaje mecanizada dada la cantidad de RSU que se generan en la Ciudad de México.

En México las plantas de compostaje comenzaron a construirse alrededor de los años 60's, generaron grandes expectativas. Su objetivo era el mismo que se tiene hoy en día: prolongar la vida útil de los sitios de disposición final. Actualmente en México, una tercera parte de las plantas instaladas se encuentran fuera de servicio debido a razones administrativas, políticas y sociales principalmente (SEMARNAT-INE, 2006b), por ejemplo, la falta de continuidad de los proyectos de administración municipal, delegacional o estatal, la falta de cultura del uso y manejo de la composta, la carencia de equipo y maquinaria adecuada para la operación en la planta y la vulnerabilidad de las plantas ante la probabilidad de incendio.

Cerca de la ciudad de México, existen hoy en día varias plantas que continúan en operación y que disminuyen la cantidad de residuos sólidos urbanos que llegan a uno de los sitios de disposición final existentes, entre las que destacan: Bordo Poniente, Cuautitlán Izcalli, Atizapán de Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Universidad Autónoma Metropolitana y Jiutepec. Como se mencionó anteriormente, hasta diciembre de 2011 fecha en que cesó sus actividades, la mayor parte de los RSU generados en la ciudad de México eran llevados a Bordo Poniente, ahí se contaba con una planta de compostaje. La planta tiene capacidad para recibir 10 toneladas de residuos orgánicos al día, cantidad que resulta pequeña si se compara con la cantidad total de RS orgánicos generados en la Ciudad de México (15 mil toneladas diarias aprox.). La composta generada en esta planta se utiliza principalmente en escuelas, parques y jardines públicos del Distrito Federal y para sanear las celdas del relleno sanitario que se ubican en el mismo sitio.

Una planta de compostaje puede amortizar los costos del proceso vendiendo el producto final. En Europa según la Comisión Europea del Ambiente el precio que se estima por tratar en una planta de compostaje una tonelada de residuos oscila entre los 35 y los 50 Euros/ton (aproximadamente entre 560 y 800 pesos mexicanos/ton a tasa de cambio: 16.09 pesos/euro, 12 de agosto del 2012). En el proceso de compostaje los costos más significativos son en el traslado a la planta, el equipo que se utiliza en el volteo, empaçado y secado.

#### 4.1.3 Variables de comparación

En la siguiente tabla se presentan las variables más importantes que se deben considerar para esta alternativa de manejo de RSU tomando en cuenta una planta de compostaje mecanizada (la de mayor capacidad)

Tabla 4.1 Variables para compostaje

Compostaje	
Variable	Observaciones
Costo por tonelada de residuos tratados	de 800 a 1200 pesos/ton
Equipo de monitoreo de temperatura	-
Equipo de monitoreo de humedad	-
Equipo de monitoreo de pH	-
Equipo de captación de lixiviados	-
Necesidad de personal operativo	Construcción, operación, monitoreo y mantenimiento
Emisión de CO <sub>2</sub> por tonelada de RSU	17.5 kg/ton
Control de nutrientes (relación C/N)	Personal y equipo
Uso de maquinaria pesada	Costo inicial, mantenimiento y operación
Equipo de control de oxígeno	Aireación mecánica o manual y/o tuberías
Requerimiento de separación previa	Requiere de una separación entre degradables y no degradables
Equipo de trituración de residuos	-
Uso de combustibles	En maquinaria y proceso de secado
Formación de lixiviados	Se aprovechan para inocular los residuos que inician el proceso
Remuneración económica	Mercado de composta
Tiempo de estabilización de los residuos	56 días (actividad microbiológica estable)
Deterioro estético	pérdida de bienestar

Se puede observar que en la tabla se seleccionan como indicadores los equipos necesarios para monitorear los parámetros que garanticen un adecuado proceso de compostaje, esto porque implican un costo inicial y de mantenimiento, además de personal operativo.

Para el caso de compostaje y a diferencia del relleno sanitario, la remuneración económica es un aspecto a considerar como variable ya que existe la posibilidad de vender un producto, sin embargo, es importante señalar que depende directamente del tamaño del mercado de composta. Ésta y otras ventajas, así como las limitaciones identificadas para en el compostaje se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4.2 Ventajas y limitaciones del compostaje

Alternativa	Ventajas	Limitaciones
<b>Compostaje</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acelera el proceso de descomposición de los residuos</li> <li>• Se obtiene un producto que se puede comercializar</li> <li>• Genera empleo por operación y mano de obra</li> <li>• No requiere grandes extensiones de terreno</li> <li>• Puede situarse en zonas urbanas</li> <li>• Reduce el volumen de RSU destinados a disposición final</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Únicamente se aplica a los desechos degradables</li> <li>• Requiere separación previa</li> <li>• Requiere de personal especializado</li> <li>• Requiere de equipo para aireación</li> <li>• Se requiere de un estricto control del proceso</li> <li>• Se emplean combustibles fósiles en el proceso</li> <li>• Se emite CO<sub>2</sub></li> </ul>



Cabe mencionar que una planta de compostaje que opera adecuadamente no genera olores desagradables, sin embargo puede llegar a perturbar la comodidad de la población aledaña ya que una planta de este tipo implica el tráfico de camiones transportadores de residuos y composta, generación de ruido y deterioro estético.

#### **4.2 Digestión anaerobia**

La digestión anaerobia (DA) es un proceso biológico en el que a diferencia del compostaje, la materia orgánica en ausencia de oxígeno y mediante la actividad microbiológica, se descompone en biogás y en producto digerido. El producto digerido es una mezcla de materiales de difícil degradación y minerales como potasio, sodio y calcio.

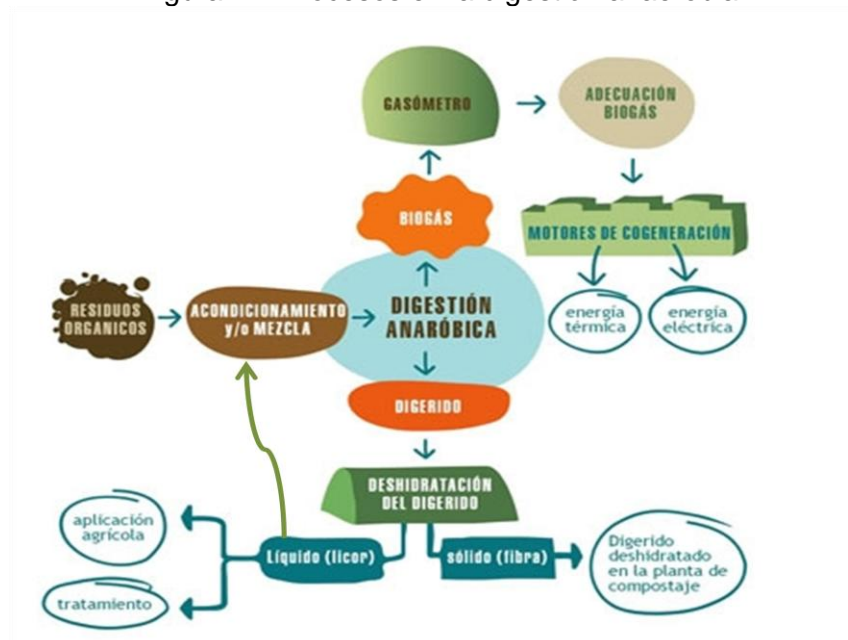
La digestión anaerobia es un proceso que ayuda a reducir emisiones de gas de efecto invernadero, el aprovechamiento energético de los residuos orgánicos y mejora el valor fertilizante de los productos tratados.

La digestión anaerobia ha sido empleada para el tratamiento de residuos agrícolas, de ganadería e industriales. Este proceso también es adecuado para el tratamiento de aguas residuales con alta carga orgánica, como las que se producen en industrias alimentarias.

##### **4.2.1 Procesos en la digestión anaerobia**

Los residuos que son sometidos a digestión anaerobia requieren ser previamente separados en fracción fermentable y fracción no fermentable. Esta alternativa únicamente trabaja con residuos degradables por lo que en el presente trabajo la fracción no fermentable se somete al proceso mencionado en el apartado de *Tratamiento mecánico biológico* en el que son separados en reciclables y no reciclables y son sometidos a una valorización y llevados a un sitio de disposición final.

Figura 4.4 Procesos en la digestión anaerobia



Fuente: (ARC, 2009).

Normalmente en el proceso de digestión anaerobia se busca lograr una consistencia de los residuos en forma de lodos por lo que los residuos fermentables son inoculados mezclándolos con lixiviados con alto contenido de bacterias para lograr la consistencia y población microbiológica adecuadas. La mezcla homogénea es bombeada a un contenedor debidamente sellado conocido como digestor.

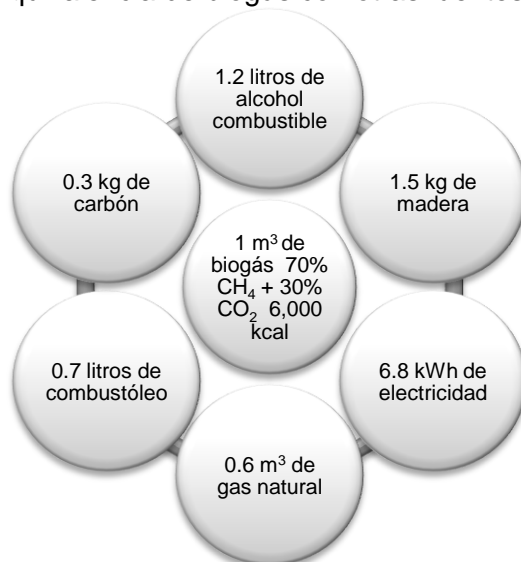
Los reactores de una planta, para lograr un adecuado proceso de descomposición, requieren de una distribución homogénea de bacterias. Es por eso que cuentan con sistemas de agitación que normalmente son mecánicos o hidráulicos y sistemas de recirculación, estos últimos se emplean en el tratamiento de aguas residuales.

En el proceso de degradación anaerobia, la materia orgánica se mantiene dentro del digestor de 2 a 3 semanas (Smith *et al.* 2007), tiempo durante el cual el biogás formado es extraído y llevado al proceso de tratamiento.

*Composición del biogás.* El biogás producto de la descomposición de compuestos orgánicos, varía su composición respecto a las características de los residuos y el tipo de tecnología empleada, como se mencionó en el capítulo 3 (Relleno sanitario), no es posible determinar una composición que se considere igual para todos los procesos, sin embargo en general se puede considerar como: 50 a 70% de metano ( $\text{CH}_4$ ), 30 a 40% dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y menos del 5% de hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y trazas de otros gases como el amoníaco y nitrógeno.

Debido a su alto contenido de metano, el biogás tiene un *poder calorífico* (PC) mayor de la mitad del PC del gas natural. Un biogás con contenido de 60% posee un PC de aproximadamente 6.4 kWh/Nm. Es decir que excepto porque contiene  $\text{H}_2\text{S}$ , es un combustible viable con equivalencias energéticas que se muestran en la siguiente figura:

Figura 4.5 Equivalencia de biogás con otras fuentes de energía



Datos: (IDAE, 2007).

El biogás se puede emplear de diversas formas, por ejemplo:

- En caldera, para generar calor.
- En motores o turbinas para generar electricidad.
- En pilas de combustible, con su previa limpieza de  $H_2S$  y otros contaminantes.
- Purificarlo y añadir los aditivos necesarios para introducirlo en una red de transporte de gas natural y su uso doméstico.

Además del  $H_2S$ , el biogás contiene compuestos que se comportan como impurezas, como agua y COV's. Por lo tanto es necesario realizar una limpieza del biogás y esta depende del uso final. En el presente trabajo se toma en cuenta esta alternativa con el uso de generación de energía eléctrica en un ciclo Rankine, es decir, a partir de la combustión generar vapor de agua e inducirlo a través de turbinas de vapor.

#### 4.2.2 Configuración de una planta de digestión anaerobia.

En la siguiente figura se muestra el flujo de la materia orgánica desde que llega a la planta y se mezcla con los lixiviados hasta la producción, extracción, acondicionamiento y aprovechamiento de gases.

Después de haber sido obtenido el biogás, la materia orgánica degradada se extrae del biodigestor y es sometida a un proceso de deshidratación mediante una prensa, con el objeto de reducir la humedad en el producto digerido hasta un 50%. El lixiviado extraído posee una alta carga de bacterias, por lo que es aprovechado para acondicionar los residuos que iniciarán el proceso de digestión. La fracción de lixiviado que no cumple con los requerimientos para ser aprovechada en la planta de digestión anaerobia, es llevada a tratamiento o utilizada para la agricultura.

En la figura 4.6 es posible visualizar las etapas que se llevan a cabo en una planta de DA de RSU. Por medidas de prevención, la planta debe contar con una antorcha de seguridad que funciona para quemar excesos de gas y contenido de  $H_2S$  a fin de evitar que sean emitidos a la atmósfera. El proceso de adecuación de biogás normalmente es un proceso en el que se extraen las impurezas que puedan dificultar su combustión o conducción a través de ductos.

Los residuos que son digeridos y deshidratados, son llevados al proceso final de estabilización, que comúnmente se realiza en pilas de composta. La fracción de producto estabilizado que no cumple con las características para ser considerado como composta, es llevada a un sitio de disposición final, mientras que el resto se utiliza como fertilizante.

Figura 4.6 Ejemplo de configuración de una planta de DA



- |  |  |
|--|--|
| 11) Edificio de servicios y oficinas                     | 19) Fracción líquida                     |
| 12) Zona de recepción de los residuos orgánicos líquidos | 20) Gasómetro                            |
| 13) Zona de recepción de los residuos orgánicos sólidos  | 21) Antorcha de seguridad                |
| 14) Acondicionamiento y/o mezcla de residuos             | 22) Adecuación del biogás                |
| 15) Alimentación del digestor                            | 23) Motores de cogeneración              |
| 16) Digestor   | 24) Distribución de energía eléctrica    |
| 17) Deshidratador del digerido                           | 25) Aprovechamiento de energía eléctrica |
| 18) Digerido deshidratado (fibra)                        |  |

Fuente: (ARC, 2009).

Para asegurar un adecuado proceso de descomposición anaerobia es necesario monitorear y controlar los siguientes parámetros:

- **pH.** Para efectos del desarrollo microbiológico es conveniente mantenerlo en valores que tiendan a la neutralidad, es decir, en un intervalo de 6.5 a 7.5 sobre la escala.
- **Temperatura.** Es un factor crucial ya que está directamente relacionado con la velocidad de crecimiento de los microorganismos y por ende del tiempo que tarda en descomponerse y estabilizarse la materia orgánica. Smith *et al.* sugieren que la temperatura se mantenga por arriba de los 30°C, ya que al descender de dicho valor, decrece considerablemente la formación de metano.
- **Nutrientes.** Como en el proceso de compostaje, la relación carbono nitrógeno es fundamental, se recomienda mantener una relación C/N de 15-30/1. En este proceso también es importante la cantidad de fósforo en la materia orgánica por lo que se recomienda mantener una relación de carbono/fósforo (C/F) de 75-113/1 (GTZ, 2006).

En la Unión Europea el uso de las plantas de digestión anaerobia se da en países como Francia, Finlandia, Suecia, Bélgica, Holanda y Alemania, en las que se aprovecha el biogás para la generación de energía eléctrica.

*Aprovechamiento del biogás.* Según Smith, el promedio de biogás generado en las plantas de DA que operan en la Unión Europea es de 100 m<sup>3</sup> por tonelada de residuos fermentables tratados.

Al realizar la combustión del metano generado por una tonelada de residuos degradables (60% CH<sub>4</sub> y 40% CO<sub>2</sub>) se pueden generar 600 kW de calor ó 180 kW de electricidad a una eficiencia de 30%.

Se estiman costos de operación que se encuentran en el rango de 60 a 70 Euros por tonelada de residuos tratada (Smith *et al.* 2007), lo que equivale a un costo de entre \$965 y \$1,1126 pesos a tasa de cambio del 12 de agosto de 2012 (16.09 pesos/Euro).

En México la digestión anaerobia no ha sido empleada como una alternativa para el manejo de los RSU, si no que se emplea principalmente en el tratamiento de aguas residuales producto de la industria. Según Monroy hasta el año 1998, se contaba con 85 reactores anaerobios con la capacidad de tratar 2.50 m<sup>3</sup> de aguas residuales. También hay un campo de aplicación de los reactores anaerobios en el sector agrícola, en los que se aprovecha el estiércol y los residuos orgánicos para la generación de biogás.

#### 4.2.3 Variables de comparación

Al momento de evaluar o comparar la digestión anaerobia se debe tomar en cuenta que esta alternativa permite una remuneración económica debido a que es posible aprovechar el biogás para generar energía eléctrica para autosuministrarla a la planta de tratamiento. Así mismo es importante hacer mención de que una planta de digestión anaerobia puede generar olores desagradables debido a un descuido en el proceso ya sea alguna fuga o falta de nutrientes (relación C/N).

Tabla 4.3 Variables para digestión anaerobia

<b>Digestión anaerobia</b>	
<b>Variable</b>	<b>Observaciones</b>
Costo por tonelada de residuos tratados	\$965-\$1,126 pesos
Equipo de monitoreo de temperatura	-
Equipo de monitoreo de pH	-
Control de nutrientes (relación C/N, C/F)	-
Equipo de captación y recirculación de lixiviados	-
Equipo de captación y adecuación de biogás	-
Necesidad de personal operativo	Construcción, operación, monitoreo y mantenimiento
Equipo para agitación y recirculación	Personal y equipo
Uso de maquinaria pesada	Costo inicial, mantenimiento y operación
Equipo de control de oxígeno	Aireación mecánica o manual y/o tuberías
Requerimiento de separación previa	Requiere de una separación entre degradables y no degradables
Emisión de metano (CH <sub>4</sub> )	La cantidad emitida es mínima ya que éste se capta y aprovecha
Generación de electricidad	180 kW/ton

Generación de olores	A pesar de tener control sobre el proceso se pueden llegar a generar olores desagradables
Deterioro estético	-
Remuneración económica	Al generar energía eléctrica

Los equipos de monitoreo se han considerado como parámetro ya que las demás alternativas requieren de equipo de diferentes características, para el caso de la digestión anaerobia se requiere de equipo de control de temperatura, pH y nutrientes, sin embargo para propiciar un proceso de descomposición adecuado para la formación de biogás también es necesario implementar equipo y maquinaria para la agitación y recirculación, así como de captación y adecuación de biogás hecho que se identifica como una limitante.

Tabla 4.4 Ventajas y limitaciones de la digestión anaerobia

Alternativa	Ventajas	Limitaciones
<b>Digestión anaerobia</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El metano generado puede captarse para la generación de energía eléctrica</li> <li>• No requiere de grandes extensiones de terreno</li> <li>• Generación de empleo por operación y monitoreo</li> <li>• Los lixiviados pueden utilizarse como inoculadores para el proceso</li> <li>• Reduce el volumen de RSU destinados a disposición final</li> <li>• Puede situarse en zonas urbanas</li> <li>• No genera CO<sub>2</sub></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Únicamente se aplica a los desechos degradables</li> <li>• Requiere separación previa</li> <li>• Requiere de personal especializado</li> <li>• Se requiere de un estricto control del proceso</li> <li>• Es factible que se generen malos olores y por lo tanto rechazo social</li> <li>• Se emplean combustibles fósiles en el proceso</li> <li>• Se emiten cantidades mínimas de CH<sub>4</sub></li> </ul>

### **4.3 Tratamiento mecánico biológico**

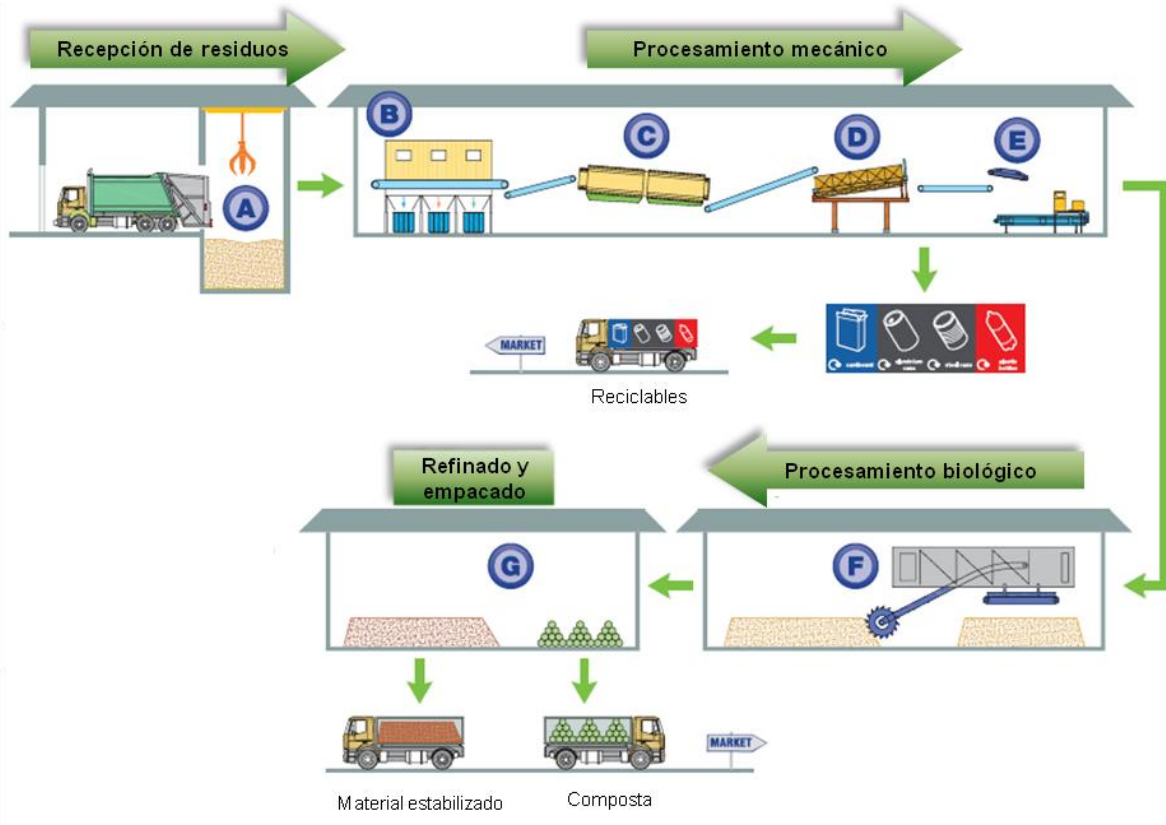
El objetivo principal de este tratamiento es mejorar el aprovechamiento de los residuos y hacer más eficientes los rellenos sanitarios.

La alternativa del tratamiento mecánico biológico (TMB) consiste en la separación mecánica de los residuos en una fracción biodegradable y una fracción de rechazo. La fracción biodegradable es sometida al proceso de descomposición aerobia o anaerobia antes ser llevada al sitio de disposición final. La parte rechazada está compuesta por residuos reciclables y residuos no fermentables, ésta es valorizada y llevada a plantas de reciclaje o incineración (Smith *et al.* 2001). El TMB se enfoca en la degradación de los residuos fermentables y se emplean procesos similares a los mencionados en el apartado de *compostaje y biodigestión*.

#### **4.3.1 Procesos en el TMB**

El tratamiento mecánico biológico puede variar dependiendo de la configuración de cada planta. Un ejemplo de configuración es el de una empresa de la Unión Soviética y se muestra en la siguiente figura.

Figura 4.7 Tratamiento mecánico biológico



- |                                |  |
|--------------------------------|--|
| A) Depósito de residuos        | E) Otros medios de separación mecánica |
| B) Módulo de separación manual | F) Procesamiento biológico             |
| C) Tromel                      | G) Refinación del producto             |
| D) Separador balístico         |  |

Fuente: [www.ubbsex.co.uk](http://www.ubbsex.co.uk)

Una vez que los RSM llegan a la planta, entre los procesos que se llevan a cabo en el TMB están:

- *recepción*, es importante contar con espacio suficiente para almacenar los residuos que llegan y poder dosificar la cantidad que es tratada de acuerdo a la capacidad de la planta.
- *separación*
  - *separación manual* que se realiza por medio de bandas transportadoras por las que circulan los residuos y personal con el equipo necesario separa los residuos que no son fermentables.
  - *separación por tamaño*, los residuos se hacen pasar por un tambor rotatorio que consigue separar los residuos en dos o tres tamaños diferentes, fracción fina compuesta por materiales húmedos y degradables que se llevan al proceso biológico, fracción intermedia entre la que se encuentran los reciclables como el PET, PEAD, botes pequeños y latas, y la fracción gruesa que principalmente son residuos de mayor tamaño como cartón y papel.

- *separación por forma y densidad*, se lleva a cabo una separación con un sistema de rampas y ejes rotatorios en diferentes posiciones y se consigue separar los residuos en tres categorías: planos, finos y rodantes.
- *separación de metales*. mediante un electroimán o un rotor magnético situado al final de una banda transportadora se extraen los residuos metálicos para ser sometidos a reciclaje.
- *trituración*, los residuos que no han sido rechazados son sometidos a una trituración con la que se obtienen partículas no mayores a los 15 centímetros.
- *proceso biológico*. Una vez separados y triturados los residuos son llevados a una etapa de descomposición que como se mencionó anteriormente puede ser de compostaje y de biodigestión. En esta etapa se puede realizar un proceso similar al compostaje mecanizado, ya que se emplea maquinaria para realizar el volteo de las pilas para una adecuada aireación. Dependiendo del tratamiento que se emplea el tiempo que tarda y las propiedades del producto estabilizado pueden variar.

Es precisamente la separación de residuos lo que destaca en esta etapa, ya que para lograr una adecuada separación es necesario emplear equipo y maquinaria especial, además de bandas transportadoras y personal operativo.

Independientemente de la técnica de degradación utilizada, los productos generados por el tratamiento son llevados a un relleno sanitario. Según los resultados del estudio realizado por Smith y sus colaboradores en el año 2001, el TMB reduce el potencial de emisión de biogás en un relleno sanitario hasta 90% comparado con un RS en el que los residuos no son previamente tratados. Además permite la aumentar el grado de compactación en el relleno sanitario hasta valores de 1.5 toneladas por metro cúbico. Y como consecuencia del alto grado de compactación, la infiltración de agua a través de los residuos se reduce y por ende la producción de lixiviados disminuye. Aunque según Molleda (2011) la cantidad de lixiviados depende más de las condiciones meteorológicas del sitio que de un pre tratamiento al que se sometan los RSM, aún así la cantidad de lixiviados en un RS se reduce hasta un 31% menos que en un RS sin pre tratamiento.

Según Smith a partir de información alemana, se estima que el *costo* del tratamiento mecánico biológico con compostaje es de 75 euros por tonelada de residuos, incluyendo ya la disposición final en relleno sanitario, lo que equivale a \$1,206 con tasa de cambio del 12 de agosto de 2012 (16.09 pesos/Euro).

El TMB se ha adoptado como alternativa para el manejo de residuos principalmente en Alemania y en Austria. Con la finalidad de aumentar la densidad de los residuos en el relleno sanitario a todos los residuos que no pueden ser reciclados se les somete a un tratamiento previo. Estos países tienen la variante de que además de la estabilización de los residuos con compostaje o digestión anaerobia, utilizan un tratamiento térmico. Inclusive en Austria desde el año 2004 no se permite la disposición de residuos en un relleno sanitario sin haber sido sometidos a un pre tratamiento (Smith *et al.* 2001).

Además de que se aumenta la vida útil de un relleno sanitario y se reduce la emisión de gases de efecto invernadero, el TMB con tratamiento térmico permite generar energía a partir de la combustión de residuos, los cuales alcanzan un poder calorífico de aproximadamente 6 MJ por kilogramo de residuo sólido tratado. En México, el TMB sólo



ha sido realizado en programas piloto, en el año 2003 una empresa alemana ejecutó un programa de TMB para el municipio de Atlacomulco, Estado de México, con el que se consiguió probar que utilizando esta tecnología se logra reducir los posibles efectos ambientales negativos que puede causar la inadecuada disposición de residuos (PGRSU, 2006).

#### 4.3.2 Variables de comparación

Para identificar las variables que permitan comparar el tratamiento mecánico-biológico se debe tomar en cuenta que este proceso es versátil en cuanto al proceso de estabilización de residuos y aprovechamiento de los mismos, ya que como se menciona anteriormente una planta de TMB puede ser configurada para realizar descomposición aerobia y anaerobia, se puede formar composta o biogás y se puede generar energía a partir de la combustión de los residuos, entre otras variantes.

Para el TMB se plantean las variables que independientemente del proceso de descomposición y manejo de residuos, representan a esta alternativa.

Tabla 4.5 Variables para TMB

<b>Tratamiento mecánico-biológico</b>	
<b>Variable</b>	<b>Observaciones</b>
Necesidad de personal operativo	Construcción, operación, monitoreo y mantenimiento
Uso de maquinaria	Para el proceso de separación e implican costo inicial y de mantenimiento
Utilización de bandas transportadoras	Para el proceso de separación e implican costo inicial y de mantenimiento
Empleo de maquinaria para trituración	
Costo del tratamiento por tonelada de residuos	\$965 a \$1206 pesos
Requerimiento separación previa	No es necesario realizarla
Recuperación económica	Al separar los residuos se pueden recuperar materiales reciclables o reutilizables
Deterioro estético	Independientemente de la configuración de la planta se genera pérdida de bienestar.
Versatilidad en el proceso de descomposición	Se puede

Cabe mencionar que además de las variables que se muestran en la tabla, se tendrían que agregar aquellas que corresponden al proceso biológico de descomposición ya sea aerobio o anaerobio (emisión de CO<sub>2</sub>, emisión de CH<sub>4</sub>, uso de equipos de control de temperatura, humedad y/o pH, entre otras), y por ende las variables que implica producir composta o biogás respectivamente.

Tabla 4.6 Ventajas y limitaciones del tratamiento mecánico-biológico

Alternativa	Ventajas	Limitaciones
<b>Tratamiento mecánico-biológico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se aplica a RSU sin previa separación</li> <li>• Abarca residuos degradables y no degradables</li> <li>• Versatilidad (procesos aerobios y anaerobios)</li> <li>• Se capta biogás para la generación de energía eléctrica</li> <li>• Se obtiene composta</li> <li>• Se reduce el volumen de los residuos</li> <li>• Disminuye la actividad biológica de los RSU destinados a disposición final</li> <li>• Generación de empleo por operación y monitoreo</li> <li>• Se pueden recuperar materiales reciclables o reutilizables</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se emplean diversos tipos de maquinaria</li> <li>• Generación de ruido</li> <li>• Empleo de energía eléctrica y combustibles fósiles en procesos de separación y trituración</li> <li>• Pueden generarse malos olores y deterioro estético</li> </ul>

En este capítulo se analizaron el compostaje, la descomposición anaerobia y el tratamiento mecánico biológico como tratamientos previos a la disposición final que permiten obtener productos como biogás y composta, sin embargo existen métodos que además de reducir el volumen de los residuos, permiten la recuperación energética. Tal es el caso de la incineración que en el siguiente capítulo se aborda.

## Capítulo 5. Incineración

La incineración se puede definir como un proceso exotérmico de oxidación química a alta temperatura. Tiene como finalidad reducir el volumen de los residuos para realizar su disposición final en un relleno.

Durante las últimas décadas, para el tratamiento de los RSU muchos países desarrollados han empleado la incineración como procedimiento alternativo al relleno sanitario. La utilización de esta tecnología permite reducir el peso (75%) y el volumen (90%) de los residuos a tratar (Romero, 2012), además, es posible recuperar energía mediante el intercambio del calor procedente de los gases de combustión.

### 5.1 Proceso de incineración de RSU

El proceso de incineración se puede dividir en tres etapas principales: alimentación, incineración y control de emisiones contaminantes.

- *Alimentación.* En la etapa de recepción, los RSU son colocados en una fosa de almacenamiento, donde se debe garantizar que los residuos se encontrarán en condiciones de baja humedad. Posteriormente éstos son trasladados por medio de grúas y puentes rodantes hacia la cámara de combustión.
- *Incineración.* En esta etapa, se lleva a cabo la combustión de los residuos. Ésta consta de dos fases, combustión primaria y combustión secundaria. La combustión primaria se lleva a cabo a una temperatura de entre 500 y 800 °C, en ella ocurren los procesos de secado, calentamiento, liberación de sustancia volátiles y transformación en cenizas de los residuos sólidos. Ésta fase se realiza en un tiempo aproximado de entre 30 y 120 minutos (EPA, 1998) y se requiere del suministro en cantidad suficiente de aire para conseguir una combustión completa. En la combustión secundaria se busca la destrucción de las sustancias volátiles y parte de las partículas. En esta etapa los gases, vapores y partículas volantes liberadas en la combustión primaria se llevan a la cámara de post-combustión que se encuentra a una temperatura de aproximadamente 1000 °C, en ella dichos productos permanecen poco menos de 2 segundos. En la etapa de incineración hay factores que tienen que ser controlados para lograr un adecuado proceso de combustión completa, entre los que destacan:
  - *Temperatura.* Es necesario contar con un control automático que mantenga la temperatura en los rangos necesarios para lograr la ruptura de enlaces entre los átomos de los residuos.
  - *Tiempo.* Dependiendo de la cantidad y composición de los residuos sólidos a incinerar, cambia el tiempo de residencia dentro de las cámaras de combustión y post combustión.
  - *Exceso de aire.* El exceso de aire se determina tomando en consideración la relación entre el aire teórico y el aire real suministrado, para asegurar una oxidación completa sin una reducción en exceso de temperatura.
  - *Turbulencia.* El flujo de aire debe contribuir a lograr ciertas condiciones de mezclado en los residuos, lo que favorece una combustión completa. También es en esta etapa cuando se forman las cenizas, que son producto de la combustión incompleta de RSU y metales contenidos en los residuos. Hay dos tipos de cenizas, las cenizas de fondo, que son las que caen

directamente en las parrillas de las cámaras de combustión y las cenizas volantes, que son recogidas en los sistemas de tratamiento de gases.

- *Control de emisiones contaminantes.* Durante el proceso de incineración de los residuos sólidos urbanos generan gases con un alto contenido de agentes contaminantes y potencialmente tóxicos, cuya composición depende en gran medida de la heterogeneidad del combustible. Con el fin de controlar y regular estas emisiones, en México se ha decretado la Norma Oficial Mexicana NOM-098-SEMARNAT-2002, que establece las especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes para la incineración de residuos. Por ello es necesario que el proceso de incineración de residuos cuente con el equipo de proceso y monitoreo, así como con las instalaciones necesarias para una adecuada combustión y limpieza de gases de combustión.

En seguida se aborda el tema de los incineradores y los equipos que permiten la recuperación de energía.

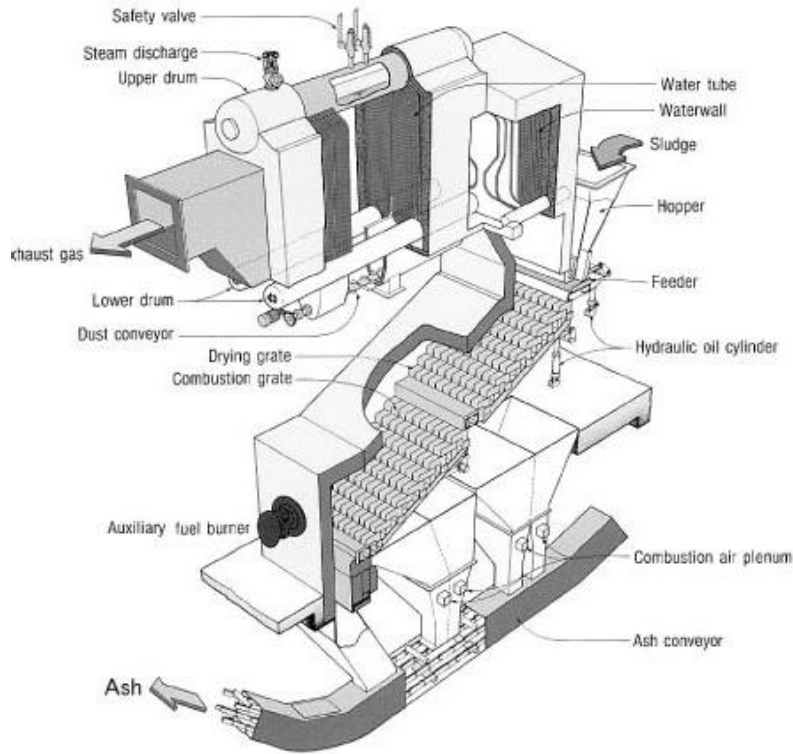
### **5.2 Equipos de incineración y aprovechamiento de energía**

Para llevar a cabo el proceso de combustión se requiere de un horno cuyas características dependen de la composición, cantidad y humedad de los residuos a incinerar. Existen muchos tipos de hornos, los más comunes en la incineración de residuos sólidos son:

- Horno de parrillas
- Horno rotatorio
- Horno de lecho fluidizado

En el presente trabajo se considera el horno de parrillas que se muestra en la figura 5.1, es el más utilizado para la incineración en bruto de RSU ya que los residuos requieren de un mínimo tratamiento previo. El elemento principal de este tipo de hornos son las parrillas, en donde los residuos sólidos son secados y quemados. Las parrillas permiten que a través y por debajo de ellas sea suministrado entre el 40% y 60% del aire necesario para la combustión (Camacho, 2003). Cuando los residuos son convertidos en escorias y cenizas, son conducidas por las parrillas a una zona de recolección. Estos hornos cuentan con un quemador de combustible auxiliar que opera según la cantidad y las características caloríficas y de humedad de los residuos.

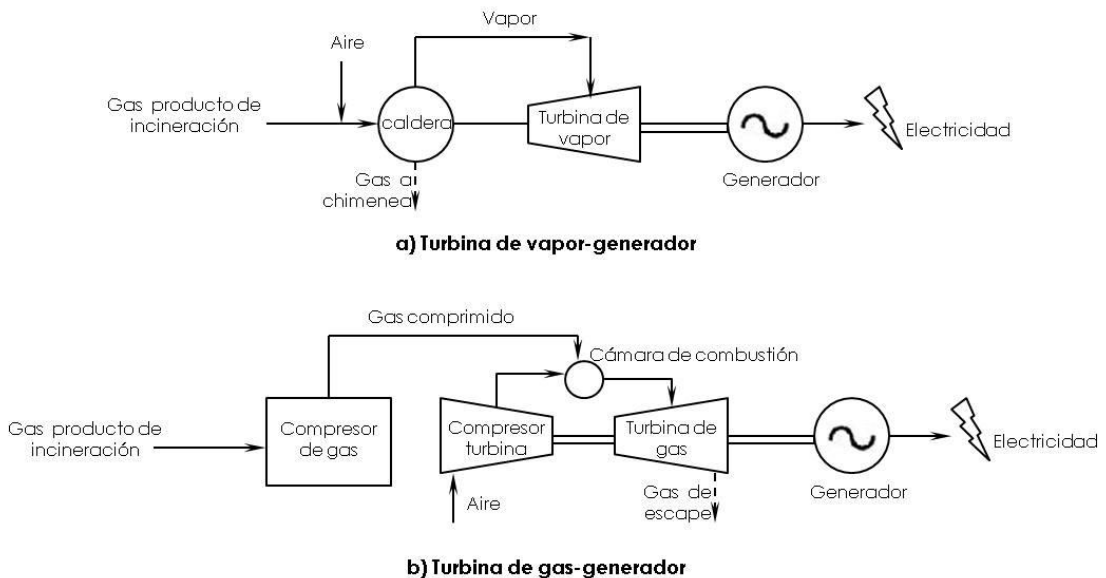
Figura 5.1 Quemador de parrillas rodantes



Fuente: [http://www.gec.jp/JSIM\\_DATA/WASTE/WASTE\\_5/html/Doc\\_515.html](http://www.gec.jp/JSIM_DATA/WASTE/WASTE_5/html/Doc_515.html)

En cuanto al aprovechamiento de la energía contenida en el calor generado por la combustión, se emplean sistemas compuestos por calderas para la producción de vapor, turbinas de vapor y gas para obtener la fuerza motriz y generadores eléctricos para la conversión de fuerza motriz en electricidad. En la siguiente figura se muestra un ejemplo de dos diferentes configuraciones para la recuperación de energía.

Figura 5.2 Sistemas de recuperación de energía



La figura 5.2a representa un sistema compuesto por una caldera y una turbina de vapor, en éste los gases calientes producto de la incineración se aprovechan para generar vapor de agua a alta presión mediante el intercambiador de calor de la caldera, este vapor permite que la turbina gire accionando el eje del generador eléctrico. Un segundo ejemplo es el mostrado en la figura 5.2b, se trata de un sistema con turbina de gas y compresor, en el cual se emplea un compresor para obtener gases a alta presión que permitan el funcionamiento de la turbina de gas.

Además de la generación de energía eléctrica, el calor contenido en los gases de incineración puede ser aprovechado para pre-calentar aire antes de ser inyectado a las cámaras de combustión, lo que favorece a un mayor aprovechamiento de energía.

Además de los sistemas de combustión y aprovechamiento de energía, otro componente importante en una incineradora es el sistema mediante el cual se realiza el control de emisiones contaminantes, es por ello que a continuación se aborda el tema de los contaminantes producidos por la incineración y su control.

### **5.3 Control de contaminantes en el proceso de incineración de RSU**

La generación de contaminantes en los procesos de incineración es función de muchas variables, entre las que destacan las siguientes:

- composición de los residuos
- velocidad y método de carga
- tipo y diseño de quemador
- condiciones de combustión (temperatura, tiempo y turbulencia)
- exceso de aire

A continuación se mencionan las principales características de los contaminantes más comunes presentados en las descargas en la incineración de residuos.

- *Monóxido de carbono (CO)*. Se forma durante la combustión de materiales carbonosos cuando no hay oxígeno suficiente.
- *Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)*. Hay dos principales tipos de NO<sub>x</sub> en la combustión: el NO<sub>x</sub> térmico que es formado a altas temperaturas debido a la reacción entre el nitrógeno y el oxígeno contenidos en el aire y el NO<sub>x</sub> combustible que es formado por la reacción entre el oxígeno del aire y el nitrógeno orgánico presente en el residuo. Los más comunes son NO (monóxido de nitrógeno) y NO<sub>2</sub> (dióxido de nitrógeno).
- *Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)*. Se forma por la incineración de materiales que contienen azufre.
- *Partículas volantes*. Son producidas por una combustión incompleta, además del arrastre físico de los residuos sólidos que no son combustibles.
- *Metales pesados*. En la incineración se presentan después del proceso de combustión como partículas o en forma de vapores. Se originan principalmente a partir de residuos como: polímeros y pilas. Los metales pesados de mayor preocupación debido a su potencial dañino a la salud humana son: cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg) y plomo (Pb).
- *Gases ácidos*. Son formados por la incineración de residuos que contienen azufre, nitrógeno, flúor y cloro. Estos últimos forman ácido fluorhídrico (HF) y clorhídrico (HCl) respectivamente.

- *Dioxinas y furanos.* Estos compuestos son formados por la combustión de hidrocarburos clorados. Son moléculas formadas por un núcleo básico de dos anillos de benceno con uno o varios átomos de cloro, unidos por puentes de oxígeno (ADRNC, 2012 y Camacho, 2003).

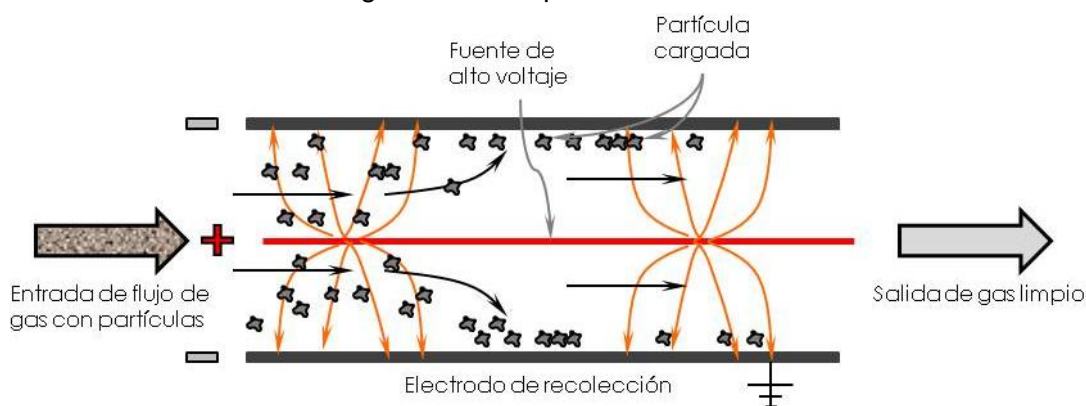
Es indispensable evitar la emisión de esta amplia gama de contaminantes ya que pueden dañar el ambiente y la salud humana debido a que presentan características como: que son bioacumulables, tóxicos, precursores de ozono y precursores de lluvia ácida. Es por eso que los sistemas de incineración han evolucionado hacia procedimientos capaces de alcanzar mayores rendimientos en la combustión y mayor eficacia en la eliminación de contaminantes.

Dado que la formación de gran parte de los contaminantes dependen del proceso de combustión, el control de las emisiones se puede realizar durante dicha etapa. Como se mencionó al inicio de este capítulo, la cantidad y composición de los residuos, la cantidad de oxígeno, el tiempo de residencia y la temperatura son los factores que determinan que las condiciones permiten lograr una combustión completa. Posteriormente en la cámara de combustión secundaria se emplean equipos de control de los gases producidos para remover trazas de metales y gases ácidos.

Para controlar las partículas suspendidas o volantes, se emplean equipos que se basan en la velocidad y la dirección del flujo, el tamaño de las partículas y las fuerzas electrostáticas. A continuación se mencionan algunos de los más comúnmente utilizados dada su alta eficiencia (Camacho, 2003).

*Precipitador.* El Precipitador electrostático funciona bajo el principio de la atracción electrostática. Este dispositivo hace pasar el flujo de gases a través de una serie de descargas eléctricas de hasta 6000 Volts, logrando cargar las partículas para después atraerlas a través de un colector conectado a tierra. Una vez que son separadas del flujo de gases, las partículas son retiradas del colector mediante vibraciones mecánicas.

Figura 5.3 Precipitador electrostático

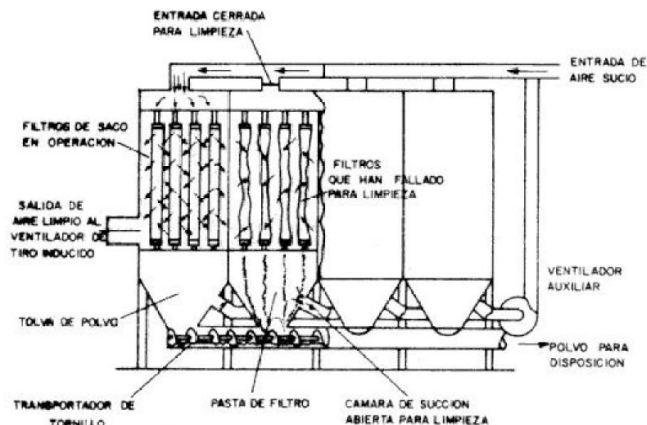


Existen también precipitadores húmedos que emplean un aspersor de agua, haciendo pasar la corriente de gases con la finalidad de lavar las partículas y reducir la temperatura.

*Filtros de bolsas.* Son equipos que emplean filtros de fibras a través de los cuales circulan las corrientes de gases de combustión, separando las partículas volantes. Estos

dispositivos emplean principios como la fuerza de gravedad, la intercepción de la dirección y el impacto inercial para remover el material volante de la corriente de gas, un ejemplo de este equipo se muestra a continuación.

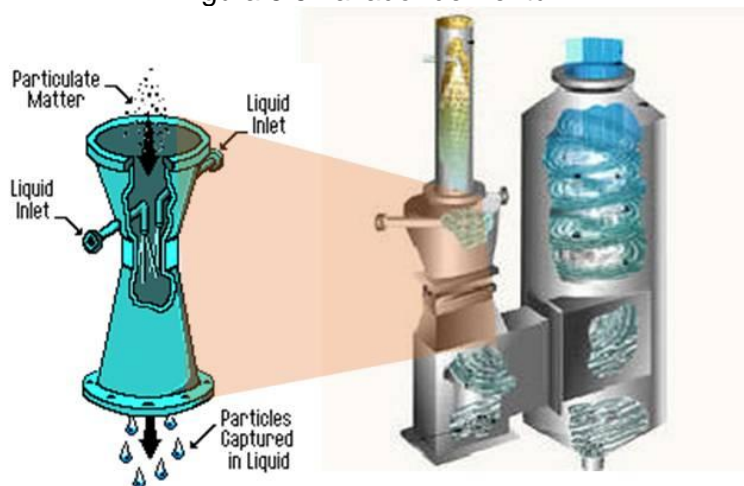
Figura 5.4 Filtro de maya recolector de bolsas



Fuente: Tchobanoglous, 1982.

*Lavador de Venturi.* Este dispositivo aprovecha la dinámica del flujo de gases, emplea una garganta de Venturi reduciendo y ampliando el área de flujo con lo que consigue una caída de presión y una desaceleración del flujo, además se inyecta líquido en forma perpendicular al flujo en la garganta con lo que se consigue que las partículas contenidas en el flujo de gas choquen con el líquido y debido a la diferencia de velocidades entre el gas y el líquido se forman gotas (figura 5.5.). Con esto las partículas quedan contenidas en las gotas de líquido y estas desaceleran y caen por acción de la gravedad. Posteriormente el flujo es sometido a un centrifugado, con lo que se consigue la recolección de las gotas de líquido arrastradas por el flujo de gases.

Figura 5.5 Lavador de Venturi



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

Otro contaminante generado en la incineración que es indispensable tratar, son las escorias y cenizas. Como se mencionó anteriormente estas son consideradas como el remanente del proceso y están formadas por minerales y carbono no quemado. Las



cenizas de fondo (recolectadas directamente en las cámaras de combustión) son un indicador de la eficiencia del proceso, una incineradora de RSU adecuadamente operada debe lograr un índice de material quemado mínimo de 95%.

Las cenizas volantes (recogidas en los sistemas de depuración de gases) contienen contaminantes peligrosos como: Arsénico (As), bario (Ba), cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb), mercurio (Hg), selenio (Se), plata (Ag) y dioxinas y furanos (Camacho, 2003).

En el proceso de incineración de residuos también se forman lodos activados, que son producto de los procesos húmedos para el control de emisiones a la atmósfera. Estos lodos contienen las partículas separadas de los gases y son extraídos y sometidos a tratamientos específicos.

Dada la complejidad de los equipos estos representan grandes costos tanto de inversión inicial como de mantenimiento, a continuación se presentan datos acerca del uso de plantas incineradoras de RSU en el mundo.

#### **5.4 Incineración de RSU en el mundo**

El proceso de incineración como tratamiento a los residuos sólidos urbanos previo a su disposición final, ha sido utilizado por países como: Austria, Bélgica, Dinamarca, Finlandia, Francia, Alemania, Luxemburgo, Holanda, España, Suiza y Reino Unido, en donde se cuenta con plantas incineradoras de entre 100,000 y un millón de toneladas de residuos al año de capacidad (Smith *et al.* 2001).

Según Smith y sus colaboradores en su investigación acerca de la emisión de gases de efecto invernadero en el manejo de residuos en Europa, para iniciar una planta incineradora de RSU, se requiere de una inversión de entre €75 y €150 millones, el tiempo de vida de una planta es entre 20 y 30 años (de 1,200 a 2,400 millones de pesos). El costo promedio por tonelada es de €65, equivalentes a \$1,145.85 pesos (16.09 pesos/euro, 12 de agosto del 2012).

Austria es uno de los países que practican la incineración como principal tratamiento de RSU. Según datos de Schuster (1999), la incineradora austriaca de residuos más grande tiene capacidad para 260 000 toneladas al año, cuenta con más de 80 trabajadores, se generan 249 kg de escoria y cenizas por tonelada de residuos, tiene un sistema de recuperación de energía para generar electricidad, en la cual a partir una tonelada de residuos se producen 116 kW/h de energía eléctrica. Esta planta de incineración cuenta con un quemador auxiliar de gas que tiene un consumo de aproximadamente 20 kg de gas por tonelada incinerada. Dentro de los límites permisibles en Austria, al año se realizan emisiones totales del orden de 5,800 kg de SO<sub>2</sub>, 32,000 kg de CO y 32,000 kg de NO<sub>x</sub>. En cuanto a emisiones de CO<sub>2</sub>, los valores oscilan entre 177 y 255 kg por tonelada de residuos (Smith *et al.* 2001)

#### **5.5 Variables de comparación**

Para la alternativa de incineración de RSU, se plantea una planta incineradora con horno de parrillas rodantes (mayor capacidad e incineración en bruto).

Al comparar la incineración es importante tomar en cuenta los equipos que se requieren para lograr un adecuado proceso de combustión, lo que permite reducir la emisión de contaminantes a la atmósfera, en este caso se requieren equipos de monitoreo y control de temperatura y aire, además de los limpiadores de gases producto de la combustión.

Así mismo, cabe destacar que la incineración permite aumentar la vida útil de un relleno sanitario ya que reduce el peso y el volumen de los residuos a ser dispuestos. En la siguientes tabla se proponen las variables a considerar para incineración y las ventajas y limitaciones identificadas para ésta alternativa.

Tabla 5.1 Variables para incineración

Incineración	
Variable	Observaciones
Requerimiento de separación previa	Prácticamente no es necesaria
Equipo y maquinaria para el movimiento de residuos	
Equipo de monitoreo y control de temperatura	
Equipo de monitoreo y control de flujos de aire	
Equipo para limpieza de gases	
Necesidad de personal operativo	Mínimo personal en la operación
Uso de combustible	Para encendido y para incinerar los residuos de bajo PC
Tiempo de vida de una planta de incineración de RSU	20-30 años
Generación de energía eléctrica por tonelada de residuos	116 kWh/ton
Costo por tonelada de residuos	\$1,145
Costo de inversión inicial	\$1,200 a \$2,400 millones de pesos
Generación de escorias y cenizas por tonelada de residuos	Reduce el volumen 90% y el peso 75%
Emisión de NO <sub>x</sub> por tonelada de residuos	0.12 kg/ton
Emisión de CO por tonelada de residuos	0.12 kg/ton
Emisión de SO <sub>2</sub> por tonelada de residuos	0.02 kg/ton
Emisión de CO <sub>2</sub> por tonelada de residuos	117-255 kg/ton
Deterioro estético	
Remuneración económica	Al generar energía eléctrica propia

Tabla 5.2 Ventajas y desventajas de la Incineración

Alternativa	Ventajas	Limitaciones
<b>Incineración</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reducción del 90% del volumen de los RSU</li> <li>Prácticamente no se requiere separación previa de RSU</li> <li>Mínimo personal en la operación</li> <li>Permite la recuperación de energía calorífica para generar energía eléctrica</li> <li>No se genera CH<sub>4</sub></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Requiere de un estricto control del proceso de incineración</li> <li>Empleo de equipo de control de contaminantes</li> <li>Quema de combustibles fósiles</li> <li>Mínimas emisiones de NO<sub>x</sub>, CO y SO<sub>2</sub></li> </ul>

Una vez planteadas las características de cada alternativa de tratamiento consideradas en el presente trabajo e identificadas las posibles ventajas y limitaciones que presentaría cada una de éstas, se procede a plantear las posibles mecánicas de comparación de estos tratamientos mediante los métodos y criterios mencionados en el capítulo 1. Comparación que permitirá determinar las ventajas y desventajas de cada método de comparación al ser considerado para las alternativas de manejo de los RSU de la Ciudad de México.

## Capítulo 6. Alternativas de comparación para el manejo de RSU

Como se mencionó en el capítulo uno, para evaluar los efectos ambientales de las actividades humanas se han desarrollado distintos métodos. La medición directa de la producción de contaminantes es la alternativa por la que debería optarse siempre por ser la más confiable para determinar la magnitud del daño o afectación al ambiente, sin embargo, esta alternativa generalmente implica procedimientos de muestreo complicados, así como personal especializado y equipo costoso.

Considerando lo anterior en el presente trabajo se plantean cinco alternativas (figura 6.1) para estimar de manera indirecta los efectos ambientales consecuencia del tratamiento de RSU, considerando aspectos de bienestar, salud, preferencia de la población y emisiones a la atmósfera, entre otros. Para respetar el orden con que fueron mencionadas en el capítulo uno, se comienza por analizar la aplicación de la función dosis-respuesta para el manejo de RSU en la Ciudad de México.

Figura 6.1 Alternativas de valoración aplicables a la gestión de RSU



### **6.1 Función dosis-respuesta**

Este método se basa en estadísticas de mortalidad y morbilidad para establecer una relación entre la cantidad de emisiones y los daños que causan a los receptores humanos.

En el año 2004 el DEFRA (Department for Environment, Food and Rural Affairs) en conjunto con la Universidad de Birmingham publicó una revisión de los efectos ambientales producidos por el manejo de los residuos sólidos urbanos en el Reino Unido, con la finalidad de determinar qué alternativa representaba mayores afectaciones a la

salud de la población aledaña al sitio de tratamiento o disposición final de RSU (DEFRA, 2004). Para este estudio el DEFRA consultó bases de datos de organizaciones ambientales, para obtener los registros de emisiones por planta de tratamiento de residuos. En la tabla 6.1 se muestran los datos obtenidos para diferentes contaminantes por alternativa.

Tabla 6.1. Emisiones por alternativa (DEFRA)

CONTAMINANTE	UNIDAD	RS	CP	DA	TMB	INC
NO <sub>x</sub>	g/s	1.249	n/a	0.149	0.115	4.950
SO <sub>2</sub>	g/s	0.097	n/a	traza	0.044	0.872
PM <sub>10</sub>	g/s	traza	n/a	*	*	0.111
dioxinas	g/s	*	n/a	n/a	n/a	traza
arsénico	g/s	traza	0.028	traza	n/a	0.003
romo	g/s	n/a	n/a	n/a	n/a	traza
níquel	g/s	traza	0.011	traza	n/a	traza

\* No disponible, n/a no aplica, traza valores menores a 0.003 g/s, (g/s=gramos/segundo)

RS-relleno sanitario, CP-compostaje, DA-digestión anaerobia, TMB-tratamiento mecánico-biológico, INC-incineración

Fuente: DEFRA (2004)

Cabe mencionar que en el estudio del DEFRA, para comparar las alternativas se seleccionaron plantas con capacidad aproximad de 50 mil toneladas al año. Se observa que prácticamente todos los contaminantes que son emitidos cuentan con un registro sobre las cantidades generadas por cada planta de tratamiento de residuos.

En nuestro país las emisiones son regidas por la NOM-085-SEMARNAT-2011, que establece los límites, en fuentes fijas, de emisión de contaminantes a la atmósfera como el humo, monóxido de carbono, partículas suspendidas, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno, producidos por la combustión. En el manejo de residuos esta norma aplica únicamente para la incineración o para aquellas plantas de tratamiento que utilicen la combustión para generar energía eléctrica.

Aunque el relleno sanitario es la alternativa más recurrida para disponer de los residuos generados en la Ciudad de México, no se cuenta con una norma que establezca los límites de emisión de contaminantes de un relleno sanitario.

En la Ciudad de México se han realizado estudios para estimar las emisiones en rellenos sanitarios, plantas de compostaje y plantas de digestión anaerobia, sin embargo el TMB e incineración han sido empleadas únicamente como programas piloto, por lo que no se cuenta con registros de emisión de contaminantes. En la tabla 6.2 se muestra la disponibilidad de datos para las alternativas evaluadas.

Tabla 6.2. Disponibilidad de datos de alternativas aplicables a la Ciudad de México

CONTAMINANTE	RS	CP	DA	TMB	INC
NO <sub>x</sub>	n/a	n/a	n/a	x	x
SO <sub>2</sub>	✓	x	x	x	x
PM <sub>10</sub>	✓	x	x	x	x
dioxinas	n/a	n/a	n/a	x	x
CO <sub>2</sub>	✓	✓	✓	x	x
CO	✓	n/a	n/a	x	x
CH <sub>4</sub>	✓	n/a	✓	x	n/a

x No disponible, n/a no aplica, RS-relleno sanitario, CP-compostaje, DA-digestión anaerobia, TMB-tratamiento mecánico-biológico, INC-incineración

Se puede observar que los contaminantes emitidos de algunas de las alternativas no se tienen registros de emisión, además, en caso de contar con una estimación, se presenta la complicación de que éstas no se realizaron bajo las mismas consideraciones ni para la misma cantidad de residuos sólidos tratados.

En el método de función dosis-respuesta, una vez obtenida la tabla de emisiones por alternativa, se procede a plantear una nueva tabla en la que se muestren los números de casos al año de enfermedades respiratorias, cáncer y muertes asociadas al manejo de los RSU. Posteriormente se debe establecer una función entre la cantidad de emisión de contaminante y los daños causados a la salud. En la siguiente tabla se muestra como ejemplo los resultados obtenidos por DEFRA.

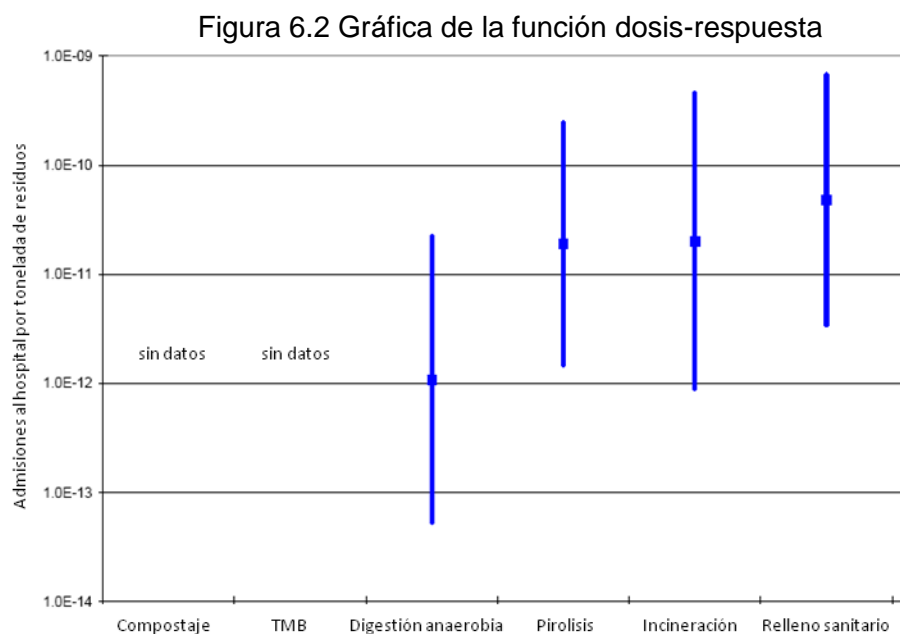
Tabla 6.3. Tasas de mortalidad y morbilidad (casos/ton de RSU\*año)

		CP	TMB	DA	INC	RS	
<b>Mortalidad</b>	PM <sub>10</sub>	x	n/a	n/a	0.00005	0.0007	
	SO <sub>2</sub>	x	0.00091	0.00074	0.00079	0.0055	
<b>Morbilidad</b>	<b>Problemas respiratorios</b>	PM <sub>10</sub>	x	x	x	0.00005	0.00011
		SO <sub>2</sub>	n/a	0.00068	0.00005	0.0057	0.00068
		NO <sub>x</sub>	n/a	0.00179	0.0035	0.186	0.00876
		PM <sub>10</sub>	x	x	x	0.00005	0.000089
	<b>Casos de cáncer</b>	arsenico	x	x	4.7E-8	7.0E-7	7.81E-8
		romo	x	x	x	7.0E-7	x
		níquel	x	x	7.1E-9	7.0E-7	1.62E-7
		benzeno	x	n/a	n/a	n/a	9.51E-6

x No disponible, n/a no aplica, RS-relleno sanitario, CP-compostaje, DA-digestión anaerobia, TMB-tratamiento mecánico-biológico, INC-incineración

Fuente: DEFRA (2004)

En la tabla anterior se puede observar el número de casos de problemas respiratorios, cardiovasculares y de cáncer, así como el número de muertes causadas por las emisiones de cada alternativa, lo que permite visualizar de manera más explícita los efectos a la salud causados por el manejo de residuos. Las funciones que describen los efectos a la salud a partir de las dosis de contaminantes producidos por las diferentes plantas de tratamiento, se presentan para el caso del Reino Unido, en la figura 6.2 siguiente.



Fuente: DEFRA (2004)

Cabe mencionar que en México se han llevado a cabo estimaciones de tasas de morbilidad y mortalidad por emisiones de actividades diferentes al manejo de RSU (industria cementera y tabquera, tabaquismo y transporte público), estimando el número de enfermedades respiratorias, casos de cáncer y número de muertes relacionadas solo con algunas emisiones atmosféricas (COFEPRIS, 2002). Es por eso que este método presenta aún grandes limitaciones en cuanto a la información que se requiere para realizar la comparación de alternativas de manejo.

### **6.2 Encuesta directa**

En este método, como su nombre lo indica, se realiza una encuesta en la que se pregunta directamente al público sus preferencias y disponibilidad a pagar por algún servicio en específico.

Este método ha sido aplicado en Europa, África y América para distintos fines. En febrero de 2012 el Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública (CESOP) elaboró un reporte acerca de los residuos sólidos en México basado en una encuesta telefónica realizada a nivel nacional para conocer la opinión pública acerca de la problemática de los residuos y cuantificar el nivel de preocupación y disposición a tomar acciones para reducir los impactos que se generan debido al mal manejo de los mismos (CESOP, 2012). Por ejemplo la siguiente tabla muestra la opinión del público acerca de la separación de residuos.

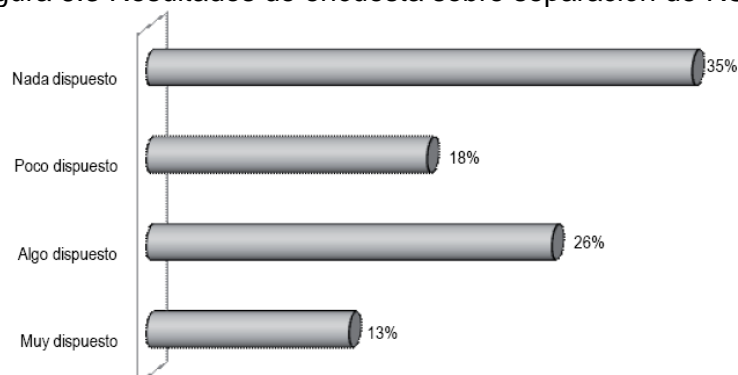
Tabla 6.4 Resultados de encuesta sobre separación de RSU

<i>¿Qué tan importantes son los siguientes factores para motivarlo a separar sus residuos?</i>	Muy importante	Algo importante	Poco importante	Nada importante	Otro
	%	%	%	%	%
Es benéfico para el medio ambiente	85	11	1	1	2
Existencia de más lugares para separar desechos (contenedores)	83	13	0	1	3
Información sobre como separar y/o reciclar	79	16	1	1	3
Multas del gobierno por no hacerlo	50	27	6	6	11

Fuente: CESOP, 2012

Se puede observar que la mayoría de las personas encuestadas están de acuerdo en que la separación de residuos es benéfica (85%), sin embargo sólo la mitad estarían dispuestos a que se impusieran multas por no hacerlo. También resulta interesante revisar los resultados de preguntarle a la gente su disponibilidad a pagar por un adecuado manejo de residuos.

Figura 6.3 Resultados de encuesta sobre separación de RSU



Pregunta. ¿Qué tan dispuesto estaría usted a pagar para que los recolectores separen la basura?

El 8% de los encuestados no contestó

Fuente: CESOP, 2012

En el gráfico anterior se muestra de manera clara que prácticamente no existe una disponibilidad a pagar para que los residuos sólidos reciban un mejor tratamiento. Esta opinión varía dependiendo del estatus socioeconómico y el nivel educativo.

En el caso de la comparación de alternativas de manejo de los residuos sólidos urbanos es conveniente que en la encuesta se consideren características de las personas como escolaridad, nivel de ingresos, edad y tiempo de residencia en la zona, entre otros aspectos, ya que éstas brindan un mejor marco de referencia al análisis. A continuación se plantea un breve modelo de encuesta.

Figura 6.4 Propuesta de encuesta

- 1) Sexo \_\_\_\_\_ Edad \_\_\_\_\_ Nivel máximo de estudios \_\_\_\_\_
- 2) Ingreso mensual promedio \_\_\_\_\_ Tiempo de residencia en actual domicilio \_\_\_\_\_
- 3) ¿Consideras que los RSU de tu colonia son un problema?
- 4) ¿Conoces los procesos a los que son sometidos los RSU?
- 5) ¿Consideras que el manejo actual que reciben los RSU es adecuado? ¿Porqué?
- 6) ¿Sabes a donde son llevados tus RSU?
- 7) ¿Sabías que más del 40% de los RSU son llevados a sitios inadecuados?
- 8) ¿Conoces las actividades que se llevan a cabo en un relleno sanitario?
- 9) ¿Conoces los procesos en una planta de compostaje o de digestión anaerobia?
- 10) ¿Qué sabes acerca de la incineración de residuos?
- 11) Si tuviesen que construir junto a tu casa un sitio donde fueran llevados los RSU de tu colonia, jerarquiza en orden de menor rechazo las siguientes alternativas:  
 \_\_relleno sanitario \_\_planta de compostaje \_\_planta de digestión anaerobia  
 \_\_planta de tratamiento-mecánico biológico \_\_planta de incineración
- 12) ¿Estarías dispuesto a pagar por evitar que se construyera junto a tu casa?  
 ¿Cuánto?
- 13) ¿Pagarías \$200.00 mensuales por evitar que se emitan 200 kg de CO<sub>2</sub> que son emitidos en un relleno sanitario?
- 14) ¿Pagarías \$100.00 por un costal de composta elaborado con los RSU de tu colonia?
- 15) ¿Estarías dispuesto a separar los residuos en siete diferentes clasificaciones?

Las primeras dos preguntas establecerían el marco social y económico en que se encuentra el encuestado, las siguientes (3 a 10) el nivel de conocimiento acerca del manejo que reciben actualmente los RSU y las últimas cinco la disponibilidad para pagar o modificar sus hábitos con la finalidad de que los RSU reciban un tratamiento adecuado, además de conocer sus preferencias hacia alguna de las alternativas que se comparan.

Una vez realizada la encuesta se analizan estadísticamente los datos para determinar los efectos ambientales, sociales y económicos causados por el manejo actual de los RSU y la disponibilidad a pagar (WTP).

Sin embargo dado que no siempre las personas conocen acerca de las alternativas de tratamiento de residuos, una encuesta directa no siempre es confiable.

### **6.3 Precio Hedónico**

Este método se basa en las preferencias individuales para determinar el valor implícito de los bienes ambientales a partir de encuestas o revisión de información de los productos consumidos o servicios solicitados por la población. Ha sido aplicado principalmente en Europa para estimar los efectos generados por actividades como el manejo de residuos, la construcción de zonas residenciales, el sistema de transporte público y la construcción de puertos aéreos. La aplicación de este método comienza con la determinación de los bienes o servicios a evaluar, en el caso del manejo de residuos estos bienes pueden ser los terrenos o edificios cuyo precio varía según su cercanía al sitio de manejo de RSU.



Un ejemplo de precio hedónico se puede visualizar analizando un par de viviendas nuevas con las mismas características y misma superficie, pero ubicados en diferentes zonas: la primera se ubica en la calle Marina Nacional, en la delegación Miguel Hidalgo, mientras que la segunda se encuentra en la colonia Agrícola Pantitlán, en Iztacalco, el precio de dichas propiedades es de \$1,450,000 y \$770,500 respectivamente (Casas Geo, 2012). Esta diferencia se asocia con la existencia de parques, centros comerciales, escuelas y el valor estético de la zona.

En el caso del manejo de residuos, además de realizar una investigación del costo de las propiedades según sus características de ubicación, se sugiere realizar una encuesta de preferencia sobre los servicios y sitios públicos, la estética de la comunidad, las condiciones ambientales, el nivel socioeconómico y las comodidades del sitio. Para facilitar la interpretación de esta encuesta se sugiere plantear una escala numérica (1 al 10) para calificar los rubros mencionados (ver tabla 6.5).

Tabla 6.5 Encuesta de preferencias

En un rango del 1 al 10, ¿en qué rango ubicas en tu colonia? respecto a:	
1)	limpieza
2)	servicios (escuelas, hospitales, bibliotecas, entre otros)
3)	áreas verdes (parques, deportivos y zonas de recreo)
4)	zonas comerciales (plazas, centros comerciales mercados y supermercados)
5)	nivel socioeconómico
6)	niveles de ruido

Como se puede observar en ninguna de las preguntas anteriores se mencionan los residuos sólidos, pero se tiene conocimiento de que estos se relacionan directamente con los aspectos incluidos en la encuesta.

Estas encuestas deben aplicarse en zonas aledañas a plantas de tratamiento y disposición de RSU, no solo para comparar alternativas entre sí sino para verificar que operan adecuadamente. La tabla 6.6 muestra un ejemplo de la información obtenida de estas encuestas y otros aspectos importantes para realizar la comparación.

Tabla 6.6 Tabla para estimar el precio hedónico

Parámetro	Tipo información	Unidad	RS	CP	DA	TMB	INC
Costo casa-hab	Investigación en bienes raíces	\$/m <sup>2</sup>					
Costo oficina	Investigación en bienes raíces	\$/m <sup>2</sup>					
Distancia predio-planta/relleno	Plano	km					
Limpieza	Encuesta	1-10					
Nivel socioeconómico	Encuesta	1-10					
Comercio	Encuesta	1-10					
Servicios	Encuesta	1-10					
Ruido	Encuesta	1-10					
Áreas verdes	Encuesta	1-10					

RS-relleno sanitario, CO-compostaje, DA-digestión anaerobia, TMB-tratamiento mecánico-biológico, INC-incineración

La principal complicación para aplicar este método es que en México no se cuente con plantas de tratamiento de cada una de las alternativas de manejo de RSU que se

analizan, sin embargo el precio hedónico podría ser muy útil al estimar los efectos indirectos que causa un relleno sanitario.

Dado que los métodos que se basan en encuestas al público en general presentan complicaciones al ser aplicados para la comparación de formas de manejo de RSU, el siguiente método que se presenta se basa en el criterio y experiencia de un grupo de expertos en el ramo ambiental.

#### **6.4 Evaluación de expertos**

Esta opción consiste en la identificación, clasificación, jerarquización y valoración según el punto de vista de personal especializado en el marco de análisis, de los impactos y efectos (sociales, económicos o ambientales) generados por las actividades antropogénicas. En el caso del manejo de RSU, se sugiere analizar los efectos/actividades generados durante las etapas de construcción, operación y cierre de las instalaciones de tratamiento y disposición final (ver tabla 6.7).

Tabla 6.7 Variables de comparación entre alternativas

Efecto\Actividad	Alternativa				
	RS	CO	DA	TMB	INC
maquinaria pesada (vehículos para manejo de residuos)					
necesidad de personal operativo					
emisión de CO					
emisión de CO <sub>2</sub>					
emisión de SO <sub>2</sub>					
emisión de NO <sub>x</sub>					
emisión de CH <sub>4</sub>					
reducción de volumen de residuos					
control de nutrientes (relación C/N)					
tiempo de estabilización de los residuos					
tiempo de vida de planta					
requerimientos de separación previa de RS					
remuneración económica					
generación de energía eléctrica					
consumo de combustibles fósiles					
generación de olores					
deterioro estético					
generación de ruido					
aceptación social					
costo de inversión inicial					
costo por tonelada de residuos tratados					

RS-relleno sanitario, CO-compostaje, DA-digestión anaerobia, TMB-tratamiento mecánico-biológico, INC-incineración

En la tabla 6.7 se presentan algunos de los efectos asociados al tratamiento de residuos tales como la emisión de gases de efecto invernadero o precursores de lluvia ácida, el deterioro estético y la generación de ruido. Así mismo se seleccionaron aspectos que están relacionados con la eficiencia y complejidad del tratamiento, por ejemplo el hecho de que los residuos requieran una separación previa implica un insumo económico, ya

sea por la inversión y mantenimiento de maquinaria o el pago de mano de obra, aunque también puede resultar en un beneficio al ser una fuente de empleo.

Es evidente que la mayoría de los efectos/actividades seleccionados son cualitativos, razón por la cual una vez identificados, se debe establecer la manera en que serán jerarquizados y la escala para calificar la magnitud o grado de perjuicio al ambiente. Por ejemplo en 2009, Mary Carmen Leyva en su *Análisis ambiental de la incineración de residuos sólidos municipales de Querétaro*, elaboró una matriz de impacto ambiental mediante la cual realizó la comparación entre un relleno sanitario y una planta incineradora de residuos., analizando las etapas de construcción, operación y cierre de ambas alternativas (Leyva, 2009). Mientras que el criterio empleado por Irene Camacho (2003) consiste en asignar un valor numérico (entre -3 y 3), al efectos más adverso (-3) o más benéfico (3) sobre el ambiente o la salud.

Es importante señalar que entre mayor sea el rango de valores en la escala seleccionada, se presentará una mayor dificultad para que el grupo de expertos llegue a un acuerdo. Es recomendable que los integrantes de este grupo posean conocimientos específicos sobre ingeniería ambiental, ingeniería química, ingeniería civil, economía, biología y otras áreas relacionadas con el manejo de RSU y los efectos asociados.

Una vez que se establezcan los criterios de evaluación y se califique cada efecto/actividad, es posible clasificar estos últimos según su entorno de mayor afectación en ambientales, sociales o económicos.

La existencia de expertos ambientales en nuestro país impulsa este método como uno de los más viables. Sin embargo, su principal dificultad es que los recursos humanos expertos resultan costosos, además de que el tiempo de análisis y evaluación es largo.

Con la finalidad de ahorrar instrumentación, recursos humanos y tiempo se creó la transferencia de beneficios que se aborda a continuación.

### **6.5 Transferencia de beneficios.**

Es la adaptación de la información derivada desde una investigación original para su aplicación en un contexto diferente (Osorio, 2006). En el ámbito ambiental o de salud al realizar un análisis para estimar de manera económica los efectos causados por diversas actividades, se presentan adversidades como la carencia de instrumentación para realizar muestreos, de personal calificado o de tiempo por lo que es necesario aplicar los resultados obtenidos en investigaciones previas o en situaciones similares.

Es importante señalar que la transferencia de beneficios es aplicable cuando las características del sitio de estudio son similares a las del sitio en que se tomará una decisión, de lo contrario se presenta el riesgo de obtener resultados con gran discrepancia a la realidad.

Un ejemplo de aplicación de la transferencia de valores (ver sección 1.1), se puede efectuar al recopilar datos de emisiones y pérdida de bienestar causados por plantas de tratamiento de residuos en estudios realizados por otros países y analizarlos en el contexto de México, para ello es necesaria la revisión de artículos, publicaciones gubernamentales, datos de instituciones de salud e instituciones ambientales.

Por ejemplo del estudio realizado por Smith y colaboradores (2001), en el que se presenta una recopilación de información referente a las emisiones generadas por el manejo de residuos RSU en plantas de compostaje, digestión anaerobia, tratamiento mecánico biológico e incineración, así como rellenos sanitarios con o sin tratamiento previo, se pueden transferir las tasas de emisión al año. En cambio si del mismo estudio original, se realizara una transferencia de funciones, se establecería la relación de las emisiones respecto a la cantidad de residuos sólidos tratados (que en este caso sería considerada la variable independiente) por planta de tratamiento.

Sin embargo para el caso del manejo de RSU las estimaciones realizadas mediante la transferencia de beneficios están propensas a errores principalmente asociados con diferencias socioeconómicas y culturales, entre el sitio de obtención de información y el sitio de análisis ya que los RSU presentan fuertes diferencias en su composición.

La principal dificultad para aplicar este método es por tanto, contar estudios previos en entornos similares a los de la Ciudad de México (actualmente se cuenta con estudios para Inglaterra, Francia, Alemania, Dinamarca, Suiza, Estados Unidos, China y Japón, entre otros)

Resulta complicado emplear una transferencia de beneficios para realizar un análisis en México, debido a que principalmente se cuenta con información y estudios realizados en países con características sociales, económicas y tecnológicas muy distintas a las nuestras.

La medición directa es el método más adecuado para cuantificar los efectos ambientales causados por las emisiones, sin embargo la instrumentación, los procedimientos de muestreo y el personal especializado que requiere resulta de gran costo por lo que se descarta como principal opción a emplearse en la Ciudad de México.

La función dosis-respuesta permite visualizar de manera explícita los daños a la salud causados por la emisión de elementos contaminantes a la atmósfera, sin embargo en México resulta difícil emplearle ya que no se cuentan con suficientes registros de emisiones, datos sobre impactos a la salud para elaborar un análisis de este tipo.

Las encuestas de preferencia individual no son recomendables cuando el público en general no se encuentra informado acerca de los procesos de tratamiento y sus efectos sobre el ambiente.

Por lo tanto la opción más viable para realizar una comparación entre alternativas de manejo de RSU, es la evaluación de expertos ya que se pueden discutir y evaluar sus efectos positivos y negativos desde diferentes puntos de vista como: social, ambiental, energético, económico y tecnológico.

## ***Conclusiones y recomendaciones***

La contaminación ambiental causada por los residuos sólidos urbanos es un problema serio que no solo afecta a la Ciudad de México, sino a todo el mundo.

A partir de los resultados y el desarrollo del presente trabajo se concluye que:

- El relleno sanitario sin pre-tratamiento no debería ser la principal alternativa para el manejo de los RSU de la Ciudad de México debido a las consecuencias ambientalmente adversas causadas por su operación y particularmente porque en nuestra ciudad actualmente se cuenta con poca disponibilidad de sitios para tratamiento de los RSU.
- Es necesario fortalecer la separación de residuos para facilitar los procesos en una planta de tratamiento y su disposición final, reducir otros impactos ambientales y favorecer el aprovechamiento de materiales.
- Es indispensable realizar un análisis para evaluar la implementación de alternativas como el tratamiento mecánico-biológico que además de acelerar el proceso de degradación de los residuos, permite su aprovechamiento energético y/o material.
- La composición de los RSU de nuestra ciudad principalmente consta de materia orgánica (ver figura 2.4), lo que podría inclinar la gestión hacia la selección de un tratamiento que se enfoque a estabilizar los residuos biodegradables como la digestión anaerobia, el compostaje o el tratamiento mecánico-biológico.
- En cuestión de costos, la incineración requiere de una mayor inversión inicial que el resto de las opciones analizadas en este trabajo, sin embargo permite una recuperación energética que se traduce en la disminución del consumo de energía eléctrica.
- Queda demostrado que la toma de decisiones sobre la gestión de los RSU debe basarse en una visión más global de los impactos asociados a las diferentes alternativas, un punto de partida es su comparación como se realiza en el presente trabajo.
- Para realizar el análisis comparativo entre efectos ambientales, es posible emplear indicadores como la emisión de gases de efecto invernadero ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ), aspectos que consideren costos económicos (inversión inicial, empleo de maquinaria pesada, mantenimiento, entre otras cosas), aspectos socioeconómicos como la generación de empleo y aspectos de bienestar del usuario (generación de ruido, generación de olores y deterioro estético)

- A pesar de que no es posible valorar el ambiente en términos monetarios, es recomendable asignar un valor monetario a los daños causados por el manejo de los RSU y de esta manera se facilite la comparación entre alternativas de tratamiento de los mismos.

Cabe mencionar que este trabajo demuestra que los ingenieros mecánicos pueden realizar aportaciones importantes al estudio de tecnologías en el campo medio ambiental ya que poseen la capacidad para analizar sistemas, plantear modificaciones para reducir las emisiones y desarrollar nuevas opciones tecnológicas para incrementar el aprovechamiento energético.

En base a las habilidades de un ingeniero mecánico y las conclusiones anteriores, se derivan las siguientes recomendaciones:

- En México, la alternativa de tratamiento y disposición de los RSU que se emplea principalmente es el relleno sanitario, sin embargo las tendencias a nivel mundial se orientan hacia otros tipos de gestión que favorecen la separación in-situ, la reducción de la generación, el reciclaje y reuso de materiales. Estas formas de gestión conllevan a una mayor valorización de los materiales contenidos en los residuos y a la mejor conservación del medio ambiente. Para el caso de México, se recomienda:
  - Apoyar en mayor medida el desarrollo de un sistema de gestión de integral de RSU
  - Dar prioridad a la reducción del volumen de los residuos, antes que su tratamiento y disposición final.
  - Favorecer en mayor medida el aprovechamiento de la materia orgánica
  - Potenciar la recuperación de materiales por medio de su reciclaje y reutilización, para su reintegración a la economía.
- Es necesario elaborar una base de datos para México acerca de los principales contaminantes generados por el manejo de RSU para que en un futuro sea factible realizar los estudios y análisis pertinentes.
- Resulta indispensable que en mayor medida se impulsen las investigaciones orientadas a promover el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan reducir los efectos negativos al ambiente y aumentar la eficiencia de los procesos.
- Se requiere desarrollar programas piloto en la Ciudad de México en los que se implementen nuevas tecnologías o combinación de alternativas para un manejo de residuos y con base a los resultados se genere una mejor toma de decisiones.

- Es impostergable incorporar el estudio de las problemáticas medioambientales en los planes de estudio de todos los campos del conocimiento para fortalecer el vínculo entre los futuros profesionistas y la aplicación práctica de conocimientos en beneficio del ambiente y la sociedad misma
- Este trabajo es resultado de una colaboración multidisciplinaria entre el campo de la ingeniería y el de la economía de los recursos naturales para la realización de un proyecto doctoral en la Universidad Nacional Autónoma de México.

## Mesografía

- **AEQIG (2011).**  
*Anexo Estadístico del Quinto Informe de Gobierno.*  
Gobierno Federal de los Estados Unidos Mexicanos.  
Disponible en: [http://quinto.informe.gob.mx/archivos/anexo\\_estadistico/pdf/est\\_nac\\_desarrollo.pdf](http://quinto.informe.gob.mx/archivos/anexo_estadistico/pdf/est_nac_desarrollo.pdf)
- **ADRNC (2012).**  
*Dioxinas y furanos.*  
Asociación para la Defensa de los Recursos Naturales de Cantabria. España.  
Disponible en: <http://www.iarca.net/pdf/dioxinasyfuranos.pdf>
- **ARC (2009).**  
*Digestión anaerobia.*  
Agencia de Residuos de Cataluña. España.  
Disponible en: <http://www20.gencat.cat>
- **Arvizu J. y Huacuz J. (2003).**  
*Biogás de rellenos sanitarios para producción de electricidad*  
Instituto de Investigaciones Eléctricas. México.  
Disponible en: <http://www.iie.org.mx/boletin042003/apli.pdf>
- **Camacho I. (2003).**  
*Análisis costo–beneficio Ambiental de la incineración de residuos sólidos municipales en la ciudad de México.*  
Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México.
- **CMIA (2003).**  
*La basura en el limbo: desempeño de gobiernos locales y participación privada en el manejo de residuos urbanos.*  
Comisión Mexicana de Infraestructura Ambiental y Agencia de Cooperación Técnica Alemana. México.
- **COFEPRIS (2002)**  
*Primer Diagnóstico Nacional de Salud Ambiental y Ocupacional*  
Secretaría de Salud. México
- **CESOP (2012)**  
Residuos Sólidos en México  
Centro de estudios Sociales y de Opinión Pública. México  
Disponible en: [http://www3.diputados.gob.mx/camara/001\\_diputados/006\\_centros\\_de\\_estudio/04\\_cetro\\_de\\_estudios\\_sociales\\_y\\_de\\_opinion\\_publica/](http://www3.diputados.gob.mx/camara/001_diputados/006_centros_de_estudio/04_cetro_de_estudios_sociales_y_de_opinion_publica/)
- **Colmenares W y Santos K. (2007).**  
*Generación y manejo de gases en sitios de disposición final.*  
Disponible en [www.ingenieriaquimica.org](http://www.ingenieriaquimica.org).



- **DEFRA (2004).**  
*Review of Environmental and Health Effects of Waste Management: Municipal Solid Waste and Similar Wastes*  
 Department for Environment, Food and Rural Affairs. Reino Unido.
- **EPA (1998).**  
*On site Incineration: Overview of superfund operating experience.*  
 Environmental Protection Agency. Estados Unidos de América  
 Disponible en: <http://nepis.epa.gov/>
- **EPA (2006).**  
*Solid Waste Management and Greenhouse Gases, 3rd edition*  
 Environmental Protection Agency. Estados Unidos de América  
 Disponible en: <http://www.epa.gov/climatechange/waste/SWMGHGreport.html>
- **Giraldo E. (2001).**  
*Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: avances recientes.*  
 Universidad de los Andes. Revista de Ingeniería.  
 Disponible en: <http://revistaing.uniandes.edu.co/pdf/Rv14-A8.pdf>  
 Consulta: 25 de junio 2012
- **GODF (2010).**  
*Gaceta Oficial del Distrito Federal del 13 de septiembre del 2010.*  
 Gobierno del Distrito Federal. México  
 Disponible en <http://www.sma.df.gob.mx/rsolidos/03/local/03clave.pdf>
- **GTZ (2003).**  
*La basura en el Limbo: Desempeño de Gobiernos Locales y Participación Privada en el Manejo de Residuos.*  
 Agencia de Cooperación Técnica Alemana. México  
 Disponible en: <http://www2.gtz.de/dokumente/bib/07-0126.pdf>
- **GTZ (2006).**  
*Prevención y gestión integral de residuos sólidos urbanos.*  
 Agencia de Cooperación Técnica Alemana. México  
 Disponible en: <http://www.gtz.de/de/dokumente/>
- **Henry J. y Heike G. (1999).**  
*Ingeniería Ambiental.*  
 Prentice Hall, segunda edición.
- **IDAE (2007).**  
*Biomasa: Digestores anaerobios.*  
 Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. España  
 Disponible en: [www.idae.es](http://www.idae.es)

- **Iglesias D. (2007).**  
*Costos económicos por la generación y manejo de residuos sólidos en el municipio de Toluca, Estado de México.*  
 Equilibrio económico año VII, vol.3. México  
 Disponible en: <http://www2.uadec.mx/pub/pdf/costos.pdf>
- **INE (1997).**  
*Estadísticas e indicadores de inversión sobre residuos sólidos municipales en los principales centros urbanos de México.*  
 Instituto Nacional de Ecología. México  
 Disponible en: [www.ine.gob.mx/publicaciones/libros/128/cap3.html](http://www.ine.gob.mx/publicaciones/libros/128/cap3.html)
- **INEGI (2011).**  
*Censo de población y vivienda 2010.*  
 Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México  
 Disponible en: [http://www.inegi.org.mx/lib/olap/consulta/general\\_ver4/MDXQueryDatos.asp?proy=cpv10\\_pt](http://www.inegi.org.mx/lib/olap/consulta/general_ver4/MDXQueryDatos.asp?proy=cpv10_pt)
- **Kiss G. y Encarnación G. (2006).**  
*Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final.*  
 Instituto Nacional de Ecología. México  
 Disponible en: [www.ine.gob.mx/publicaciones/gacetas/497/kiss.html](http://www.ine.gob.mx/publicaciones/gacetas/497/kiss.html)
- **Kiss G. y Mendoza F. (1998).**  
*Generación de materias contaminantes en rellenos sanitarios de residuos sólidos municipales.*  
 Ingeniería y Ciencias Ambientales, México.
- **Leyva M.(2009).**  
*Análisis ambiental de la incineración para el manejo de residuos sólidos municipales de Querétaro.*  
 Tesis de Ingeniería Industrial, Universidad Nacional Autónoma de México.
- **LGEEPA 1998.**  
*Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.*  
 Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. México  
 Disponible en: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148.pdf>
- **LGPGIR (2003).**  
*Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.*  
 Gobierno Federal de México.  
 Disponible en: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263.pdf>
- **Medina R. y Jiménez Y. (2011).** *Guía para la gestión integral de los residuos sólidos municipales.*  
 Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.  
 Disponible en: [http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id\\_pub=344](http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub=344)

- **Molleda A, López A. y Lobo A. (2011).**  
*Efectos del tratamiento mecánico biológico en las emisiones de vertedero.*  
 Artículo: hacia la sustentabilidad; los residuos sólidos como fuente de energía y materia prima, 2011.  
 Disponible en: <http://www.redisa.uji.es/artSim2011/RellenosSanitariosYVertederos/Efectos%20del%20tratamiento%20mec%C3%A1nico%20biol%C3%B3gico%20en%20las%20emisiones%20de%20vertedero.%20Revisi%C3%B3n%20bibliogr%C3%A1fica.pdf>
- **MTASE (2009).**  
*Plantas de compostaje para el tratamiento de residuos: riesgos higiénicos.*  
 Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España. España  
 Disponible en: [http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/501a600/ntp\\_597.pdf](http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/501a600/ntp_597.pdf)
- **Nieto I. (2011).**  
*Evaluación económico-ecológica de las alternativas de gestión de los residuos sólidos municipales para mitigar Gases de Efecto Invernadero en México.*  
 Avances del segundo semestre de Proyecto doctoral en Economía de los Recursos Naturales. Universidad Nacional Autónoma de México.
- **NOM-052-SEMARNAT-1993.**  
 Norma Oficial Mexicana que establece las características de los residuos peligrosos, un listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.  
 Secretaría de Desarrollo Social. México  
 Disponible en: <http://www.bordercenter.org/pdfs/MexicanOfficialStandardNOM-052-SEMARNAT-1993.pdf>
- **OECD (2001).**  
*Environmental Indicators. Towards Sustainable Development 2001.*  
 Organisation for Economic Co-operation and Development. Francia  
 Disponible en:  
[http://www.oecd.org/LongAbstract/0,3425,en\\_2649\\_34283\\_2432411\\_119699\\_1\\_1\\_1,00.html](http://www.oecd.org/LongAbstract/0,3425,en_2649_34283_2432411_119699_1_1_1,00.html)
- **OECD (2010).**  
*Air and Land: Municipal Wastes*  
 Organisation for Economic Co-operation and Development.  
 Disponible en:  
[http://www.oecd.org/document/49/0,3746,en\\_2649\\_34283\\_39011377\\_1\\_1\\_1\\_1,00.html](http://www.oecd.org/document/49/0,3746,en_2649_34283_39011377_1_1_1_1,00.html)
- **OPS (2007)**  
 Diseño, Construcción y Operación de Rellenos Sanitarios Manuales.  
 Organización Panamericana de la Salud.  
 Disponible en: [http://www.bvsde.paho.org/cursoa\\_rsm/e/](http://www.bvsde.paho.org/cursoa_rsm/e/)

- **Osorio J. (2006)**  
*El método de transferencia de beneficios para la valoración económica de servicios ambientales: estado del arte y aplicaciones.*  
Universidad de Medellín. Colombia.  
Disponible en: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2929374>
- **Ramírez S. (2010)**  
*Análisis normativo del manejo de residuos sólidos urbanos y de manejo especial en la zona metropolitana del municipio de San Luis Potosí.*  
Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales.  
Universidad Autónoma de San Luis Potosí. México.
- **Schuster H. (1999)**  
Plantas incineradoras de residuos en Austria  
Greenpeace. Austria.  
Disponible en: <http://www.gipuzkoa.net/incineradora/IncineradorasAustria.pdf>
- **SEEM (2002).**  
*Alternativas de rellenos sanitarios-Guía de toma de decisión.*  
Secretaría de Ecología del Estado de México. México  
Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd48/alternativas.pdf>
- **SEMARNAT (2001).**  
*Guía para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Municipales.*  
Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.  
Disponible en: [http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id\\_pub=344](http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub=344)
- **SEMARNAT (2007).**  
*Política y estrategias para la prevención y gestión integral de residuos en México.*  
Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.  
Disponible en: [http://siscop.ine.gob.mx/novedades/politica\\_y\\_estrategias\\_gir.pdf](http://siscop.ine.gob.mx/novedades/politica_y_estrategias_gir.pdf)
- **SEMARNAT (2008).**  
*Residuos Peligrosos.*  
Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.  
Disponible en: <http://www.semarnat.gob.mx/TEMAS/GESTIONAMBIENTAL/MATERIALESACTIVIDADES/Paginas/ResPel.aspx>
- **SEMARNAT (2009a).**  
*Informe de la situación del medio ambiente en México.*  
Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.  
Disponible en: [http://www.semarnat.gob.mx/informacionambiental/Documents/pdf/indice\\_portada.pdf](http://www.semarnat.gob.mx/informacionambiental/Documents/pdf/indice_portada.pdf)

- **SEMARNAT (2009b).**  
*Residuos peligrosos.*  
 Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas. México.  
 Disponible en: [http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/resumen\\_2009/07\\_residuos/cap7\\_4.html](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/resumen_2009/07_residuos/cap7_4.html)
- **SEMARNAT (2011).**  
*Indicadores Básicos de Desempeño Ambiental de México.*  
 Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.  
 Disponible en: [http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/indicadores\\_2010\\_web/indicadores\\_2010/00\\_conjunto/temas.html](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/indicadores_2010_web/indicadores_2010/00_conjunto/temas.html)
- **SEMARNAT-INE (1999).**  
*Minimización y Manejo Ambiental de los Residuos Sólidos.*  
 Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales-Instituto Nacional de Ecología. México.  
 Disponible en: [http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id\\_pub=133](http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub=133)
- **SEMARNAT-INE (2006a).**  
*Diagnóstico Básico para la Prevención y Gestión Integral de Residuos.*  
 Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales-Instituto Nacional de Ecología. México.  
 Disponible en: [http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id\\_pub=495](http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub=495)
- **SEMARNAT-INE (2006b).**  
*Manual de compostaje municipal. Tratamiento de residuos sólidos.*  
 Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales-Instituto Nacional de Ecología. México.  
 Disponible en: <http://www.resol.com.br/cartilha5/Manual%20de%20Compostaje-SERMANAT-Mexico.pdf>
- **Smith A., Brown K., Ogilvie S., Rushton K. y Bates J. (2001).**  
*Waste Management Options and Climate Change.*  
 Final report to the European Commission, DG Environment.
- **Tchobanoglous G., Theissen H. y Eliassen R. (1982).**  
*Desechos sólidos - principios de ingeniería y administración.*  
 Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/acrobat/desecho2.pdf>
- **Tinoco J. (2006)**  
*Ingeniería investigación y Tecnología.*  
 Métodos de valuación de externalidades ambientales provocadas por obras de ingeniería.  
 Universidad Nacional Autónoma de México

- **VC (2012).**  
*Recirculación de lixiviados.*  
Viridian Colombia S.A.S. Colombia.  
Disponible en: [http://www.viridiancolombia.com/soluciones/manejo\\_lixiviados/recirculacion\\_lixiviados/](http://www.viridiancolombia.com/soluciones/manejo_lixiviados/recirculacion_lixiviados/)
  
- **Wark K. y Richards D. (2001).**  
*Termodinámica.*  
McGRAW-HILL, sexta edición.