

57

1  
2ej.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

"USOS ENERGETICOS DE LOS RESIDUOS SOLIDOS  
MUNICIPALES EN LA CIUDAD DE MEXICO"

**T E S I S**

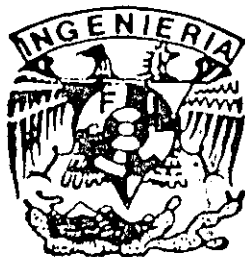
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**INGENIERO MECANICO**

P R E S E N T A :

**JOSE MARTIN ARCIGA MORALES**

DIRECTOR DE TESIS: M.I. FELIPE MUÑOZ GUTIERREZ



MEXICO, D. F.

OCTUBRE 1999

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

*Dedicada a mi Universidad que me ha dado los mejores años y los más grandes sueños; y al Instituto de Ingeniería por su invaluable orientación y apoyo*

*A mis padres, que me dieron la oportunidad de ser*

*A mis hermanos, familiares y amigos, por haber recorrido este camino conmigo*

*A mi persona, como un gran triunfo en la vida*

*De manera especial, agradezco profundamente al Ing. Felipe Muñoz Gutiérrez su gran apoyo.; así como a los ingenieros: Eduardo Hernández Goribar, Jorge Sánchez Gómez, Jorge Gutiérrez Vera, Ricardo Valadez, Adrián Valera Negrete, Esteban Barrios Bonilla, Eduardo Lemus Soto y Ma. Teresa Orta Ledesma por su colaboración y entusiasmo*

*Doy gracias a la Dirección General de Servicios Urbanos del Distrito Federal y al Instituto de Investigaciones Eléctricas por su ayuda e interés*

**Resumen**

i

**Introducción**

ii

**Capítulo 1** *Origen, composición y tipos de residuos sólidos*

---

1.1 Origen y tipos de RS

1

1.2 Composición de los RSM

7

**Capítulo 2** *Propiedades físicas, químicas y biológicas de los residuos sólidos municipales*

---

2.1 Propiedades físicas

19

2.2 Propiedades químicas

24

2.3 Propiedades biológicas

26

**Capítulo 3** *Manejo y disposición de los residuos sólidos municipales en la ciudad de México*

---

3.1 Generación de RSM

33

3.2 Recolección

39

3.3 Disposición final

41

3.4 Sistemas de tratamiento

46

3.5 Aspectos sociales y políticos

49

**Capítulo 4** *Recuperación de energía por procesos térmicos*

---

4.1 Incineración

53

4.2 Pirólisis

64

4.3 Gasificación

66

4.4 Termólisis

68

4.5 Procesos de recuperación de energía

69

4.6 Emisiones contaminantes

73

**Capítulo 5** *Recuperación de energía por procesos biológicos*

---

5.1. Producción de metano por descomposición anaeróbica	81
5.2. Generación de biogas en digestores anaeróbicos	84
5.3. Generación de biogas en rellenos sanitarios	90

**Capítulo 6** *Obtención de combustibles sólidos a partir de los residuos sólidos municipales*

---

6.1. Antecedentes	96
6.2. Caracterización del RDF	97
6.3. Tipos de RDF	98
6.4. Diseño actual de los procesos de producción	101
6.5. Descripción de las etapas del proceso de obtención	106
6.6. Recuperación de materiales	113
6.7. Aspectos sobre la combustión del RDF	115
6.8. Mercado del RDF	117

**Capítulo 7** *Alternativas para el aprovechamiento de los residuos sólidos municipales en la ciudad de México*

---

7.1. Potencial de los procesos de recuperación de energía	119
7.2. Evaluación energética de las estrategias para el manejo de los RSM	121
7.3. La necesidad de una estrategia para un mejor aprovechamiento de los RSM en la ciudad de México	124

<b>Conclusiones y recomendaciones</b>	131
---------------------------------------	-----

<b>Referencias</b>	133
--------------------	-----

## Resumen

---

En este trabajo se evalúan los residuos sólidos municipales (RSM) de la ciudad de México como una fuente de energía para resolver parcialmente la creciente demanda de energéticos, en particular de energía eléctrica.

Este estudio muestra que previo al aprovechamiento energético de los RSM en la ciudad de México, es necesaria una estrategia para el manejo integral de los RSM en donde se facilite el reciclaje y reuso de los subproductos, lo cual representa un ahorro de energía en la elaboración de nuevas manufacturas.

Para reducir el espacio requerido en los rellenos sanitarios se cita la incineración como una alternativa por la cual se puede obtener energía térmica y eléctrica a partir de aquella liberada por el proceso de combustión, así como una importante reducción en volumen.

La generación de biogas es sustancial debido a la alta concentración de materia orgánica en los rellenos sanitarios; el biogas puede ser empleado como combustible alternativo o de forma directa para generar energía eléctrica. Los requerimientos de espacio para esta práctica se minimizan en cerca del 50% gracias a la incineración y el reciclaje.

Ya sea por medio de procesos térmicos o biológicos, la generación de energía útil a partir de los RSM puede ser llevada a cabo por medio de turbinas o motores de combustión interna, no quedando excluidas las diversas posibilidades que ofrecen los sistemas de cogeneración. La factibilidad de reclamar esta energía, parte de que se encuentra disponible como consecuencia de los ya mencionados métodos de tratamiento y disposición final.

Aunque este estudio es de carácter energético, se considera la situación actual de los RSM en la ciudad de México en todos sus aspectos ya que es necesario tener un marco de referencia a partir del cual se puedan hacer observaciones y elaborar propuestas. Quizá lo más interesante en este tema es que podemos obtener diversas formas de energía a partir de un material que no posee mayor valor para la mayoría de nosotros.

La recuperación de energía a partir de los RSM en la ciudad de México junto con una estrategia bien definida que considere todos los factores técnicos, económicos y sociales que rodean a los RSM actualmente, pueden hacer posible un mejor aprovechamiento de los materiales reciclables y una oferta de energía producida a partir de fuentes no fósiles.

## Introducción

---

La ciudad de México, una de las más pobladas del mundo, cuenta con aproximadamente 8.5 millones de habitantes. Si agregamos la población de los municipios conurbados, esta cifra asciende a poco más de 20 millones. Esta sobrepoblación trae consigo una generación de RSM de 11,400 toneladas al día en promedio sólo en el Distrito Federal, lo cual plantea una serie de retos en materia ambiental al contaminar el aire, suelo y cuerpos de agua subterráneos.

La principal preocupación que ha generado este problema es dónde se hará la disposición final de los RSM a medida que los espacios en rellenos sanitarios se agotan y los terrenos aptos para esta actividad escasean. Esta situación hace necesario el estudiar otras alternativas para el tratamiento de las miles de toneladas de residuos que se producen a diario en esta ciudad.

Una opción es la recuperación de energía, en donde se transforman los subproductos por procesos térmicos, químicos y biológicos para obtener energía en forma de calor o combustibles alternativos. La ventaja de algunos de estos procesos es que como consecuencia del proceso se tiene una importante reducción en volumen, lo cual incrementa la vida útil de los rellenos sanitarios, que ha sido el método más popular para la disposición final de los RSM. La importancia del aprovechamiento de esta energía radica en su potencial de reducción en el consumo de combustibles fósiles, lo que permite conservar los recursos no renovables y atenuar los impactos al ambiente.

Es importante mencionar que en 1996, el bagazo de caña y la leña constituyeron respectivamente el 2.2 y el 6.6%, del consumo final energético en México (Secretaría de Energía, 1996). Esto nos indica que el papel de la biomasa aún es incipiente a comparación del consumo de hidrocarburos, con una dependencia de alrededor del 80%. Sin embargo, en México se comienza a tener una mayor conciencia del potencial que ofrece el aprovechamiento de los residuos sólidos (RS) dado los grandes volúmenes que se manejan en las grandes ciudades del país.

La economía mexicana tiene un crecimiento que está exigiendo un desarrollo vigoroso de su sector energético. Las cifras oficiales presentan una tasa de crecimiento esperado del 5.5% anual durante los primeros cinco años del próximo siglo XXI. Para poder cumplir con la demanda de energía eléctrica se requiere incorporar durante los primeros cinco años del próximo siglo una capacidad de generación de 13,000 MW. Esta cantidad corresponde al 38% de la capacidad actual, la cual fue instalada en los últimos 60 años.

El manejo de los RSM es una actividad que presenta muchas alternativas debido a la gran variedad y cantidad de materia que se encuentra presente en ellos. La recuperación de energía es tan sólo una de estas alternativas que ha sido practicada con éxito en las últimas décadas. Sin embargo, el reciclaje de subproductos constituye una parte muy importante dentro de los sistemas de manejo de RSM a medida que los recursos naturales necesarios para la elaboración de nuevos productos se agotan e incrementan su costo. Por lo tanto, el reciclaje genera un ahorro de energía al transformar de forma parcial los materiales y prepararlos para un nuevo uso. El reciclaje es tan solo un ejemplo

de lo que una actividad orientada al aprovechamiento de subproductos puede contribuir en materia energética.

De esta manera, si ubicamos en un solo marco la recuperación de energía y las actividades destinadas al manejo y aprovechamiento de los RSM, se tiene como resultado lo que se llama un Manejo Integral de Residuos Sólidos Municipales (MIRSM). El análisis del potencial a nivel generación y ahorro de energía bajo un esquema de MIRSM en la ciudad de México es el tema de este trabajo.

De manera introductoria, en los capítulos 1 y 2 se definen los RSM en términos de su composición y propiedades, mismos que sirven de apoyo para el análisis y diseño de los diversos procesos aplicados para su manejo y aprovechamiento. El capítulo tercero tiene como objetivo exponer la situación actual del manejo de los RSM en la ciudad de México, para comenzar a relacionar los aspectos económicos, políticos y sociales con la propuesta elaborada en materia de manejo y aprovechamiento energético de los RSM.

Como en otros países, los procesos de conversión térmicos y biológicos aplicados a la biomasa, se han presentado como una forma más limpia y económica de generar energía útil para el nuevo siglo. Los RSM, más que como un problema, pueden ser vistos como un recurso para satisfacer de manera parcial, pero importante, la demanda de energía que exige la sociedad de un país en vías de desarrollo. Es por esta razón, que en los capítulos 4, 5 y 6 se ilustran las diversas tecnologías empleadas para la recuperación de energía a partir de los RSM.

Este contenido sirve de marco teórico para la elaboración de una propuesta en donde se contemple el aprovechamiento de los distintos materiales que conforman los RSM, se simplifiquen las labores de disposición final y se considere la oferta de energía que estos mismos ofrecen al ser tratados por algunas de estas tecnologías. En el capítulo 7 se utiliza a toda la información citada en este trabajo para formular una estrategia justificada en el aspecto energético y con base en las muy particulares características de los RSM que se generan en esta ciudad.

La implantación de una estrategia de este tipo en esta ciudad es ahora necesaria, y una de las ventajas que posee un plan de esta magnitud es el crear una cultura en donde la sociedad y las autoridades hagan conciencia del creciente problema que los RSM representan por no ser mejor aprovechados en una sociedad de consumo que crece a un ritmo acelerado.



---

# 1. Origen, composición y tipos de residuos sólidos

Para establecer un estudio detallado de los residuos sólidos (RS) en una comunidad, es necesario conocer de dónde provienen, de qué materiales están compuestos y si algunos de estos representan un peligro al medio ambiente desde su punto de generación hasta su confinamiento.

Toda la información que pueda ser recabada es de gran utilidad para la elaboración de un plan de recolección, tratamiento, disposición y aprovechamiento de los RS, en este caso, como fuente alterna de energía.

El objetivo de este capítulo es el de identificar las fuentes, los tipos y la composición de los RS en la ciudad de México, como punto de partida para un análisis de su situación actual y su disponibilidad como materia prima en los diversos procesos de recuperación de energía.

## 1.1 Origen y tipos de RS

Los RS se caracterizan por ser materiales que han perdido valor o utilidad para sus propietarios y se convierten en materia de estorbo. Según la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), un residuo es *"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"*.

El origen de estos residuos en una comunidad está íntimamente relacionado con el uso de la tierra y la distribución de la población en la misma. Los residuos son clasificados de acuerdo a su origen de generación.

### 1.1.1 RS de origen domiciliario y comercial

Consisten en una parte orgánica (combustible) y una parte inorgánica (no combustible) de todos aquellos residuos generados por el uso domiciliario y por comercios establecidos, sin incluir los residuos peligrosos y de carácter especial.

Normalmente la fracción orgánica está compuesta por materiales tales como residuo alimenticio, papel, corrugado, plásticos, textiles, hule, piel, madera y residuos de jardinería. La fracción inorgánica consiste en materiales como vidrio, utensilios de cocina, latas, aluminio, metales ferrosos y cascajo.

Todos aquellos residuos que se descomponen rápidamente, especialmente en climas templados, se conocen como residuos putrescibles. La principal fuente de estos residuos radica en la preparación, cocción y el consumo de alimentos. En muchos lugares, la

naturaleza de los residuos putrescibles determina de alguna forma los criterios de diseño y operación de los sistemas de recolección.

Aunque existen más de 40 clasificaciones para el papel, el papel recolectado está compuesto típicamente por papel periódico, libros y revistas, papel publicitario, papel de oficina, papel para empaques, papel de tipo sanitario y corrugado.

Los materiales plásticos caen en las siguientes siete categorías: tereftalato polietileno (PETE), polietileno de alta densidad (HDPE), cloruro de polivinilo (PVC), polietileno de baja densidad (LDPE), polipropileno (PP) y poliestireno (PS).

Los RS especiales provenientes de usos residenciales y comerciales comprenden a todos aquellos elementos de tamaño grande, aparatos eléctricos y electrónicos, objetos de línea blanca, residuos provenientes de patios y granjas, baterías, aceites y llantas. Los elementos de gran tamaño encontrados en estos residuos, son por lo general objetos de decoración dañados, como lámparas, muebles, entre otros. Los objetos de línea blanca tales como lavadoras, secadoras, refrigeradores y lavavajillas son desmantelados para el reuso de materiales como el aluminio y el cobre.

Las baterías provenientes de uso doméstico, vienen en varios tipos y tamaños, encontrando baterías de tipo alcalinas, de mercurio, plata, zinc, níquel y cadmio. Los metales encontrados en estas baterías pueden causar la contaminación de los mantos freáticos, debido a su presencia en el lixiviado. Además, suelen estar presentes dentro de los gases producto de la combustión en las plantas de incineración. Las baterías automotrices están compuestas por aproximadamente 8.15 kg de plomo y 3.785 litros de ácido sulfúrico, ambos materiales de carácter peligroso.

El aceite que se recolecta y no se recicla es, por lo general, tirado al drenaje o vertido en el sistema de recuperación de aguas pluviales. Esto ocasiona la contaminación del agua superficial y de los suelos. La presencia de aceite, combinado junto con otros residuos, reduce el valor de estos últimos cuando son reciclados.

Anualmente, millones de llantas son recibidas en tiraderos o en rellenos sanitarios. Debido a su anatomía, estas no pueden ser bien compactadas, lo cual hace que ocupen mucho espacio y su disposición en los rellenos sanitarios sea muy costosa. De hecho, también en los tiraderos se tiene este problema, además de dar un mal aspecto y representar una amenaza al medio ambiente, ya que favorecen la aparición de incendios y de plagas de mosquitos.

### **1.1.2 RS provenientes de los servicios públicos**

Son aquellos provenientes de las instituciones gubernamentales, escuelas, centros de readaptación social y hospitales. Sin embargo los residuos generados por algunos hospitales son manejados por separado por ser de carácter peligroso.

### **1.1.3 RS de los servicios municipales**

Aquí se encuentran todos los residuos producto del barrido de las calles, recolección de basura en contenedores, recolección de escombros resultado de la poda de jardines y parques, retiro de animales muertos y vehículos abandonados. Debido a que no se puede

predecir en qué lugar estos últimos serán encontrados, el origen de estos se considera como no especificado.

#### **1.1.4 Residuos de las plantas de tratamiento de otros residuos**

Todos los RS y semisólidos provenientes del tratamiento de aguas residuales y del tratamiento de residuos industriales se encuentran dentro de este grupo. Las características específicas de estos materiales varían según el tipo de tratamiento empleado. Los residuos que provienen de las plantas de tratamiento de aguas negras, suelen ser dispuestos junto con los residuos municipales en los rellenos sanitarios.

Aquellos materiales producto de la combustión de la madera, carbón mineral, coque y otros combustibles sólidos, se denominan cenizas. Los residuos de las plantas generadoras de energía eléctrica no se incluyen en esta categoría, ya que son manejados y tratados por separado. Estos residuos están compuestos por materiales finos en polvo, carbonilla, escoria de hulla y por pequeños montos de otros materiales parcial o totalmente incinerados. Vidrio, loza y varios metales suelen aparecer en los residuos de incineradores municipales. Generalmente, estos residuos se confinan por separado por ser la mayoría de las veces de carácter peligroso.

#### **1.1.5 RS de origen industrial**

Las industrias son una de las principales fuentes de generación de residuos. Aunque no se tienen datos exactos, se estima que se producen más de 200,000 toneladas diarias de RS en todo el país; muchos de éstos como ya se mencionó son peligrosos.

Todos los residuos industriales son una fuente de contaminación tanto del suelo como del aire y del agua, pero existen algunos procesos que dañan el medio ambiente mucho más que otros. Un ejemplo de ello es la industria del papel, que no sólo vierte en el agua fragmentos de celulosa, sino también algunas sustancias químicas que disminuyen la posibilidad de uso de este recurso para consumo humano. Los residuos industriales que no se depositan ni en los tiraderos ni en los cuerpos de agua, suelen quemarse en plantas de incineración.

Ultimamente se han iniciado programas que contemplan el reuso de los residuos, pero la mayor parte de los residuos generados por las grandes industrias y los pequeños talleres, aún se entrega a los servicios municipales de recolección.

Las fuentes y los tipos de residuos generados por las diferentes industrias, excluyendo los residuos provenientes de procesos industriales y los residuos peligrosos, se encuentran en la tabla 1.1.

#### **1.1.6 Residuos agrícolas**

Los residuos de la siembra y la cosecha de productos alimenticios, la producción de leche, la cría de animales para sacrificio y el mantenimiento de granjas, son considerados como residuos agrícolas. En muchas zonas su disposición, especialmente del estiércol, se ha convertido en un problema en los criaderos y granjas.

Tabla 1.1 Origen y tipos de residuos industriales \*

Actividad Industrial	Residuos generados
Manufactura y ensamble	Metales, plásticos, hule, papel, madera, telas, residuos químicos
Procesamiento, empaque, y transporte de alimentos	Carnes, grasas, aceites, huesos, desperdicios de comida, vegetales, frutas, semillas, cereales
Tejido, procesamiento, y transporte de telas	Restos de telas y fibras
Corte y conformado de productos terminados	Telas, fibras, metales, plásticos, hule
Corte y manufactura de productos de madera	Trozos de madera, viruta, aserrín, y en algunos casos metales, plásticos, fibras, adhesivos, pinturas y solventes
Fabricación de muebles e indumentaria de madera	Mismos residuos generados que en el caso anterior, además de telas y residuos de relleno
Fabricación de utilerías de metal	Metales, plásticos, resinas, vidrio, madera, hule, adhesivos, telas, papel
Manufactura de papel y cartón	Residuos de papel y fibras, químicos, material de relleno y recubrimientos para papel, tintas, pegamentos, sujetapapeles
Impresión en papel periódico, publicidad, litografía, grabado, encuadernado	Papel, restos de periódico, corrugado, metales, químicos, tela, tintas, pegamentos
Preparación de químicos, desde medicamentos hasta pinturas, barnices y explosivos	Químicos orgánicos e inorgánicos, metales, plásticos, hule, vidrio, aceites, pinturas, solventes, pigmentos
Manufactura de materiales para pavimento y lechado	Asfalto, chapopote, fieltro, asbestos, papel, tela, fibras
Manufactura de hules y productos de plástico	Desperdicios de hule y plástico, negros de humo, compuestos vulcanizados, tintes
Corte y confección, manufactura de productos de piel	Desperdicios de pieles, hilos, aceites
Manufactura de productos de vidrio, concreto, yeso, conformado y procesado de productos de piedra, abrasivos, asbestos y productos macelaneos no minerales	Vidrio, cemento, cerámicos, yeso, asbestos, piedra, papel, abrasivos
Procesos de fundido, vaciado, forja, troquelado, laminado y extrusión en la industria primaria del metal	Restos de metales ferrosos y no ferrosos, escoria, arenas, corazones, moldes y agentes aglutinantes
Manufactura de productos de metal, como latas, herramientas de mano, aparatos no eléctricos, accesorios de plomo, estructuras, alambre, maquinaria y equipo para el campo, grabado y recubrimiento de metales	Metales, cerámicos, arenas, escoria, recubrimientos, solventes, lubricantes, salmueras
Manufactura de equipo para la construcción, miniera, elevadores, transportadores, camiones, tractores, herramientas de máquinas, etc	Escoria, arenas, corazones, pedacería de metal, madera, plásticos, resinas, hule, telas, pinturas, solventes y productos de petróleo
Fabricación de equipo eléctrico y aparatos de comunicación, soldadura, estampado, enrollado, pintado y homeado	Restos de metal, negros de humo, vidrio, metales especiales, plásticos, operaciones de maquinado, formado, resinas, fibras, residuos de tela

\* Ref de [1]

### **1.1.7 Residuos peligrosos**

De acuerdo con la definición dada por la Norma Oficial Mexicana NOM-CRP-001-ECOL/93, referente a la caracterización de los residuos peligrosos, son *"aquellos residuos en cualquier estado físico que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, venenosas, biológico infecciosas, representan un peligro para el equilibrio ecológico"*.

Esto se debe a que: (1) estos residuos no son degradables, (2) pueden desarrollarse biológicamente, (3) pueden ser letales, o (4) pueden crear efectos acumulativos perjudiciales. Los términos inflamable, corrosivo, reactivo, tóxico y cancerígeno han sido empleados por las autoridades sanitarias para definir a los residuos peligrosos.

La Agencia de Protección al Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA) clasifica a estos residuos en residuos peligrosos "con registro", "residuos peligrosos característicos" y en "otros". Basados en el criterio definido en el *Code of Federal Regulations* (40 CFR 261.11), la EPA creó una lista de residuos peligrosos específicos que se muestra en la tabla 1.2.

Si un material de desecho cumple con alguno de estos criterios, se considera como peligroso sin importar la concentración. Los residuos peligrosos característicos se definen según su inflamabilidad, poder corrosivo, reactividad y toxicidad.

La categoría de "otros residuos peligrosos" incluye a los residuos derivados de las plantas de tratamiento de aguas y aquellos materiales peligrosos que se encuentran junto con residuos no peligrosos. Los residuos médico-infecciosos y los residuos con baja radioactividad se consideran residuos peligrosos especiales, aunque estos se manejan y regulan de forma independiente.

Muchos de los productos usados en el hogar, tales como los limpiadores y desengrasantes, algunos productos personales, productos automotrices, pinturas y productos para jardines son tóxicos y pueden ser peligrosos para la salud y el medio ambiente. La mayoría de estos productos, una vez que se desechan, deben ser dispuestos en tiraderos especiales para residuos peligrosos. El carácter de estos productos puede ser corrosivo, tóxico, flamable o venenoso.

Los residuos peligrosos generados por los comercios están estrechamente ligados a los servicios que estos prestan. Algunos ejemplos son las tintas que se usan en los servicios de impresión, solventes usados en tintorerías con lavado en seco, otros solventes empleados en los centros de servicio automotriz, pinturas y adelgazadores de uso común. Aquellos establecimientos donde se genera una cantidad considerable de estos residuos, pueden estar sujetos a ciertas regulaciones federales. Esto es, que los residuos que generan deberán ser dispuestos en tiraderos especiales a excepción de aquellos comercios que generen una cierta cantidad de residuos por debajo de algún límite establecido.

En México, existen alrededor de 10,600 empresas que generan más de 3.5 millones de toneladas de residuos peligrosos. De estas empresas 1,245 se encuentran en el Distrito Federal y 1,030 en el Estado de México. Algunas de las industrias que generan mayor cantidad de residuos peligrosos son las que se dedican a la química básica (ya sea orgánica ó inorgánica), las que se dedican a procesos siderúrgicos y emplean chatarra.

las de los metales básicos no ferrosos, la industria del petróleo y la petroquímica, así como las industrias dedicadas a la producción de plaguicidas.<sup>[8]</sup>

**Tabla 1.2 Categorías de los residuos peligrosos \***

Con registro	Característicos	Otros
De fuentes no especificadas	Inflamables	Mezclas (peligrosos + no peligrosos)
De fuentes específicas	Corrosivos	Residuos derivados del tratamiento de otros residuos
Productos químicos comerciales (agudamente peligrosos)	Reactivos	
Productos químicos comerciales (no agudamente peligrosos)	Tóxicos	Materiales que contienen residuos peligrosos con registro

\* Ref. de [1]

La cantidad emitida de estos residuos, varía también según la época del año. Aproximadamente de un 75 a un 85% de los residuos peligrosos encontrados en los RSM, son de origen residencial. La figura 1.4 muestra la composición típica de los RSM potencialmente peligrosos encontrados en el Distrito Federal.

#### 1.1.7.1 Efectos de la presencia de residuos peligrosos en los RSM

Aunque relativamente pequeña, la cantidad de residuos peligrosos encontrados en los RSM es importante por los inconvenientes que presentan en las plantas de selección y aprovechamiento, además de los efectos que causan al ser arrojados al medio ambiente.

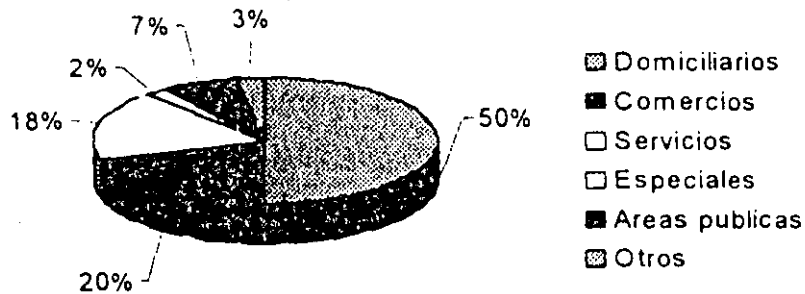
Los pequeños montos de componentes sólidos, semisólidos y líquidos de los residuos peligrosos, así como los compuestos gaseosos derivados de ellos, influyen en las actividades de recuperación de materiales, en la producción de composta, en los productos de la combustión y en la operación de rellenos sanitarios.

Rastros de materia orgánica de residuos peligrosos han sido encontrados en los componentes de los RSM previamente separados por medios mecánicos. Asimismo, se han encontrado estos restos de materia en la composta. Esto provoca que la mayor parte de estos productos sea inservible. Algunos de los componentes más problemáticos son los metales pesados como bario, cadmio, cromo, plomo, mercurio y plata.

#### 1.1.8 Los RSM

Según la Norma Oficial Mexicana NOM-083-ECOL-1996, que establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los RSM, estos se definen como: "los residuos sólidos que provienen de actividades que se desarrollan en casa-habitación, sitios y servicios públicos, demoliciones, construcciones, establecimientos comerciales y de servicios, así como residuos industriales que no se deriven de su proceso".

La figura 1.1 muestra el origen de los RSM en la ciudad de México. Cabe mencionar el alto porcentaje de residuos de origen domiciliario, que conforman la mitad de la cantidad total de residuos generados actualmente en esta ciudad.



**Figura 1.1** Origen de los RSM en el Distrito Federal (datos de 1998)  
Elaborada a partir de los datos de la tabla 1.4

Una clasificación general de los RS municipales se muestra en la figura 1.2. Aquí se muestra de una forma más clara los tipos de residuos involucrados así como sus respectivas fuentes. Como es de notarse, los RSM engloban a la mayor parte de los RS anteriormente mencionados.

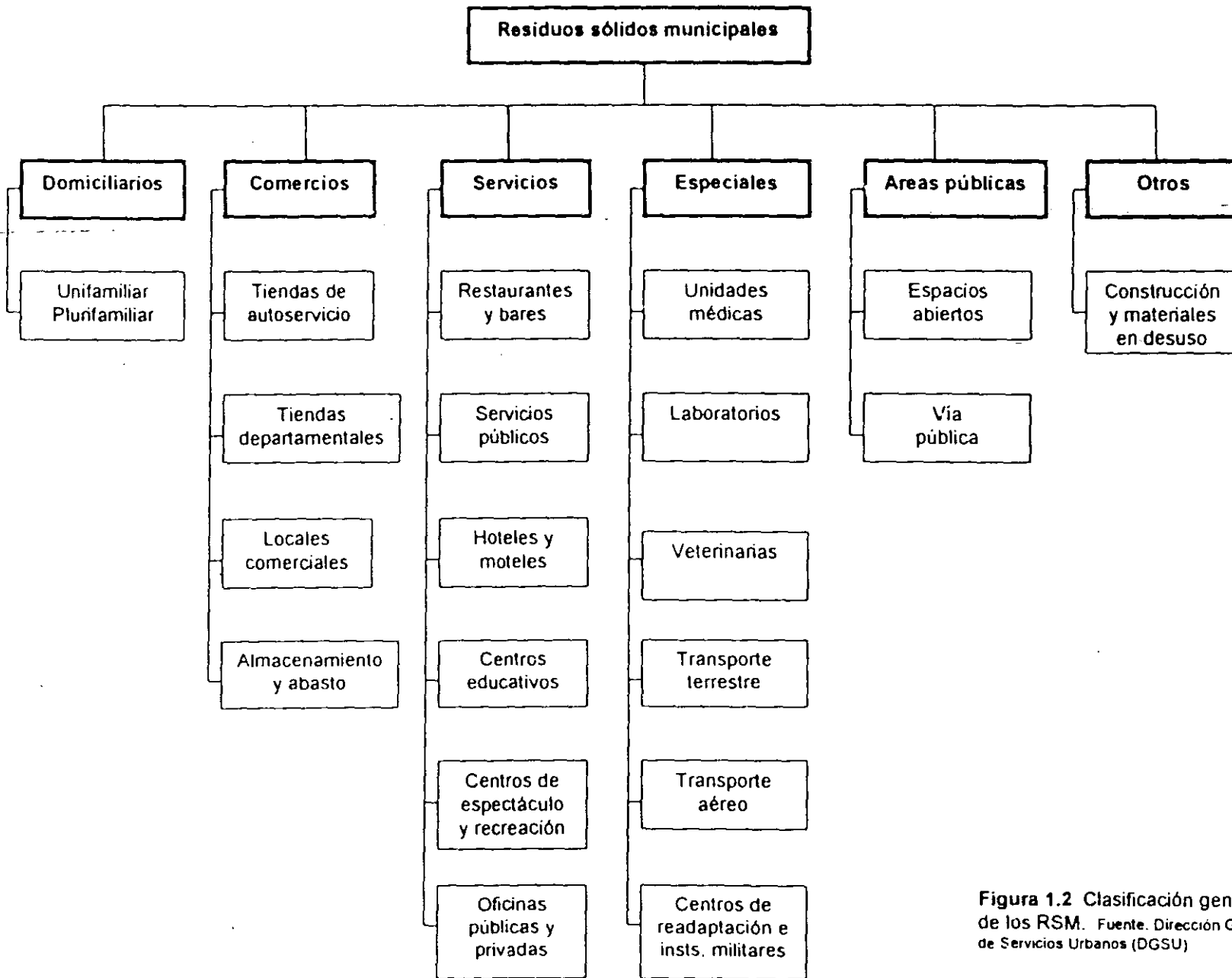
Por tratarse de aquel conjunto de subproductos generados típicamente en una comunidad, son ampliamente tratados en la literatura bajo el nombre común de "basura", siendo el primero un término técnicamente más adecuado.

## 1.2 Composición de los RSM

"Composición" es el término empleado para describir cada uno de los subproductos que conforman el conjunto de los RSM así como su distribución relativa. Toda información acerca de la composición de los RSM es muy importante para determinar la infraestructura necesaria y la planeación correcta en su manejo.

La composición de los RSM dependerá de: las actividades en materia de construcción y demolición en la comunidad, los servicios municipales con los que se cuente, el nivel socioeconómico de la población y los tipos de procesos en el tratamiento de aguas residuales existentes.

Todos estos datos deben manejarse e interpretarse con sumo cuidado, ya que los efectos de las actividades de reciclaje por lo regular no se reflejan en esta información. Esto lleva a la necesidad de tener a la mano información reciente contemplando todas aquellas actividades relacionadas con el manejo de los RS existentes y que también se esperen tener en un cierto futuro. La tabla 1.3 muestra la composición física, por tipo de fuente, de los RSM que se generan en la ciudad de México



**Figura 1.2** Clasificación general de los RSM. Fuente: Dirección General de Servicios Urbanos (DGSU)



Tabla 1.3 Composición física de los RSM generados en la ciudad de México \* (Cifras en toneladas por día)

Subproductos	Domiciliarios			Comercios			
	Unifamiliar Plurifamiliar	Tiendas de autoservicio	Tiendas departamentales	Locales Comerciales	Almacenamiento y abasto	Concentraciones	Mercado sobre ruedas-tiangulis
Abatelenguas	-	-	-	-	-	-	-
Algodón	120 498	0 330	0 180	0 268	-	2.864	0.615
Cartón	300 405	30 749	33 039	58 937	49.769	4.079	0.876
Cuero	6 165	-	0 030	-	3.128	-	-
Envase de cartón	109 850	2 528	0 318	18 155	11.660	4.343	0.933
Fibra dura vegetal	3 363	1 468	0 108	17 529	18.675	-	-
Fibra sintética	80 145	2 558	0 533	-	10.807	-	-
Gasa	-	-	-	-	-	-	-
Hueso	4 484	0 830	0 057	3 846	17.538	0.018	-
Hule	11 209	3 768	2 736	4 919	13.936	0.035	-
Jeringa desechable	-	-	-	-	-	-	-
Lata	88 552	1 029	0 296	1 967	15.546	0.299	0.065
Loza y cerámica	20 737	0 999	0 130	0 179	5.973	-	-
Madera	5 605	7 625	4 565	0 626	12.892	0.018	-
Mat de construcción	35 309	-	-	-	-	-	-
Material ferroso	77 904	1 229	0 957	25 399	4 266	0.035	-
Material no ferroso	3 363	0 799	0 217	4 472	9 006	0.018	-
Papel Bond	66 694	6 066	3 551	47 043	-	0.088	-
Papel periódico	258 371	3 698	1 008	58 759	27.870	7 208	1.548
Papel sanitario	492 081	2 099	1 598	16 993	3.792	8.895	1.912
Pañal desechable	188 874	0 769	0 690	0 690	-	-	-
Placas radiológicas	-	-	-	-	-	-	-
Película plástica	349 725	4 067	5 263	48 026	5.403	3 762	0.808
Plástico rígido	242 678	4 867	5 178	32 018	11.850	3 692	0.794
Poliuretano	8 966	0 330	-	0 805	8.153	0.141	0.031
Poliestireno expandido	43 716	0.400	0 921	-	-	0.458	0.100
Residuo alimenticio	1.942 544	12 221	6 056	394 677	569.641	133.783	28 753
Residuo de jardinería	286 954	-	1 470	0 089	94.798	-	-
Toallas sanitarias	-	0 5	0 367	0 894	0.095	-	-
Trapo	35 869	0 669	0 568	0 894	4.835	-	-
Vendas	-	-	-	-	-	-	-
Vidrio de color	224 183	2 698	0 965	15 204	11 944	0 070	0 014
Vidrio transparente	379 429	4 567	0 886	49 815	19.244	0 317	0 068
Residuo fino	67 815	0 599	0 130	-	16.685	4 851	1 044
Otros	149 082	2 468	0 194	92 834	0.474	0.826	0 222
Subtotal	5.604.570	99.930	72.010	894.360	847.980	176.801	37.784
Total	5.604.570						2.227.864

(CONTINUA)

## Servicios

Subproductos	Servicios					
	Restaurantes y bares	Servicios públicos	Hoteles y moteles	Centros educativos y de investigación	Centros de espectáculos y recreativos	Oficinas públicas y privadas
Abatelenguas	-	-	-	-	-	-
Algodón	-	0 174	0 038	0 187	-	13 011
Cartón	74 895	10 634	4 765	9 901	0 823	48 737
Cuero	0 250	1 693	-	0 044	-	-
Envase de cartón	17 941	0 908	0 960	6 670	0 386	-
Fibra dura vegetal	-	0 518	0 102	0 860	-	0 043
Fibra sintética	0 502	-	0 012	-	-	1 045
Gasa	-	-	-	-	-	-
Hueso	-	0 096	-	0 739	-	-
Hule	-	0 165	0 228	1 466	-	3 611
Jeringa desechable	-	-	-	-	-	-
Lata	3 136	1 422	0 657	5 392	0 092	1 219
Loza y cerámica	5 646	-	0 228	2 216	0 022	0 349
Madera	8 405	3 083	-	4 322	-	0 043
Mat de construcción	6 523	-	3 652	-	0 007	-
Material ferroso	11 541	0 326	2 262	0 442	0 421	0 653
Material no ferroso	-	0 596	-	-	-	28 458
Papel Bond	19 319	8 601	11 639	15 799	0 266	163 661
Papel periódico	11 918	7 110	6 623	7 707	0 236	51 826
Papel sanitario	42 653	1 927	10 312	11 819	0 715	8 660
Pañal desechable	1 005	0 147	1 125	0 331	0 007	-
Placas radiológicas	-	-	-	-	-	-
Película plástica	38 639	0 982	4 525	2 150	0 532	0 696
Plástico rígido	15 807	0 638	2 135	2 966	1 144	3 830
Poliuretano	0 375	1 239	0 001	0 738	-	-
Poliestireno expandido	4 391	0 849	0 202	0 507	0 054	0 479
Residuo alimenticio	933 727	2 619	54 633	17 662	1 206	92 339
Residuo de jardinería	1 005	0 271	4 625	6 968	0 031	1 306
Toallas sanitarias	-	-	-	0 695	-	0 174
Trapo	1 505	-	2 174	1 124	0 085	1 349
Vendas	-	-	-	-	-	-
Vidrio de color	19 194	1 289	3 905	2 690	0 348	1 132
Vidrio transparente	35 378	0 587	10 767	5 137	0 877	3 307
Residuo fino	0 376	-	0 329	0 805	0 205	0 044
Otros	0 374	-	0 479	0 915	-	9 182
Subtotal	1,254,605	46,874	126,377	110,263	7,467	436,162
Total						1,979,618

(CONTINUA)

## Especiales

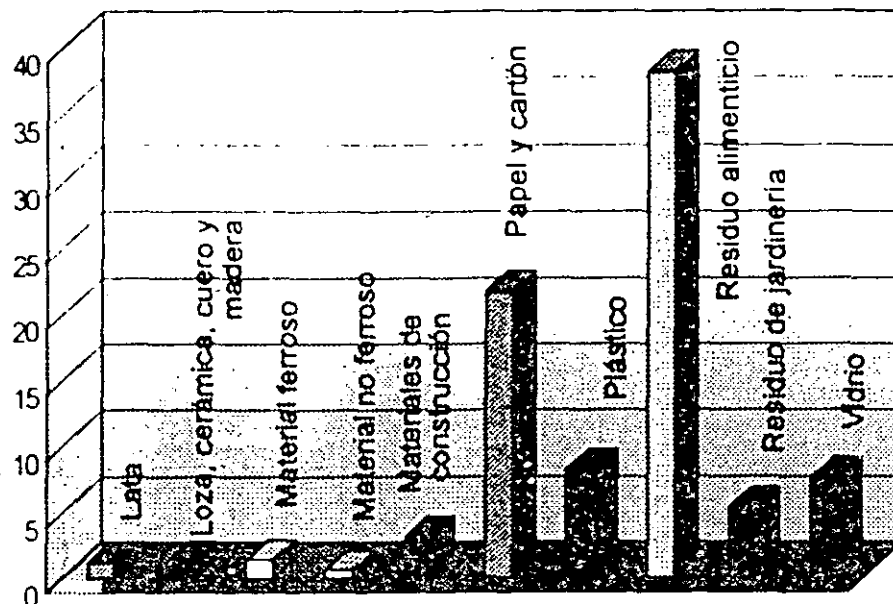
Subproductos	Unidades médicas	Laboratorios	Veterinarias	Transportes terrestres	Transporte aéreo	Centros de readaptaciones e instituciones militares
Abatelenguas	2 940	-	-	-	-	-
Algodón	2 940	2 566	0 171	-	-	-
Cartón	12 388	1 977	0 079	0.477	1 519	0.264
Cuero	-	-	-	-	-	-
Envase de cartón	1 597	-	0 022	0.060	-	0.027
Fibra dura vegetal	0 298	-	-	-	-	-
Fibra sintética	0 403	0 766	-	-	-	-
Gasa	5 627	1 419	0 182	-	-	-
Hueso	0.104	-	0 011	-	-	-
Hule	3 089	-	-	-	-	-
Jeringa desechable	4 179	0 326	0 042	-	-	-
Lata	2 582	-	0 071	0 499	0 907	-
Loza y cerámica	-	-	-	-	-	-
Madera	0 342	-	0 148	0 032	-	-
Mal de construcción	-	-	-	0 137	-	-
Material ferroso	2 836	-	0 022	-	-	-
Material no ferroso	0 105	0 294	0 040	-	-	-
Papel Bond	9 806	4 259	0 303	1 001	1 833	0.162
Papel periódico	6 522	2 959	0 633	0 668	4 387	0.404
Papel sanitario	16 417	2 378	0 226	1 672	2 551	0 243
Fañal desechable	2 134	-	-	0 214	-	-
Placas radiológicas	0 448	-	-	-	-	-
Película plástica	4 880	-	0 014	0 588	1 118	0 104
Plástico rígido	1 448	2 136	0 049	0 338	1 562	0 066
Poliuretano	1 134	0 536	0 079	-	-	-
Poliestireno expandido	2 537	0 559	0 032	0 121	0 337	-
Residuo alimenticio	40 237	0 430	0 102	3 348	4 668	2 218
Residuo de jardinería	1 940	0 470	0 018	-	0 438	0 389
Toallas sanitarias	-	0 398	-	0 001	-	0 104
Trapo	0 746	0 455	-	-	1 396	0 156
Vendas	0 537	-	-	-	-	-
Vidrio de color	10 000	1 201	0 062	0 379	2 308	0 022
Vidrio transparente	8 403	0 756	0 028	0 857	2 043	0 050
Residuo fino	0 642	0 005	-	-	1 032	-
Otros	1 686	0 828	0 735	0 608	2 503	1 012
<b>Subtotal</b>	<b>149.247</b>	<b>24.719</b>	<b>3.067</b>	<b>11.001</b>	<b>29.600</b>	<b>5.221</b>
<b>Total</b>						<b>221.884</b>

(CONTINUA)

Subproductos	Áreas públicas		Otros	Total	%
	Espacios abiertos	Vía pública			
Abatelenguas	-	-	-	2 940	0.026
Algodón	-	-	-	143 842	1.291
Cartón	3 855	27 885	-	676 051	6.069
Cuero	-	-	-	11 310	0.102
Envase de cartón	6 874	21 750	-	204 982	1.840
Fibra dura vegetal	-	-	-	42 965	0.386
Fibra sintética	0 100	-	-	96 871	0.870
Gasa	-	-	-	7 227	0.065
Hueso	-	-	-	27 723	0.249
Hule	-	-	-	45 163	0.405
Jeringa desechable	-	-	-	4 548	0.041
Lata	5 024	-	-	128 756	1.156
Loza y cerámica	-	-	-	36 477	0.327
Madera	-	35 693	-	83 698	0.751
Material de construcción	-	-	303 955	349 583	3.138
Material ferroso	0 432	19 938	-	148 662	1.334
Material no ferroso	-	15 964	-	63 332	0.568
Papel Bond	5 700	47 545	-	413 336	3.710
Papel periódico	10 231	15 476	-	485 163	4.355
Papel sanitario	10 024	-	-	636 967	5.718
Pañal desechable	-	-	-	195 295	1.753
Placas radiológicas	-	-	-	0 448	0.004
Película plástica	5 667	64 763	-	541 714	4.863
Plástico rígido	6 971	27 885	-	368 051	3.304
Poliuretano	-	-	-	22 529	0.202
Poliestireno expandido	1 280	8 574	-	65 515	0.588
Residuo alimenticio	8 079	-	-	4 248 943	38.140
Residuo de jardinería	12 065	176 791	-	589 627	5.293
Toallas sanitarias	-	-	-	3 229	0.029
Trapo	-	-	-	51 826	0.465
Vendas	0 021	-	-	0 558	0.005
Vidrio de color	9 096	-	-	306 703	2.753
Vidrio transparente	8 820	5 926	-	537 264	4.823
Residuo fino	4 239	183 345	-	282 147	2.533
Otros	6 846	45 594	-	316 861	2.844
Subtotal	106 326	697 129	303 955	11 140 309	100.00
Total		802 468	303 955	11 140 309	

\* Fuente: DGSU. Datos de 1997

Total materia orgánica. 80.5 %  
Total materia inorgánica. 19.5 %



Subproductos	%
Lata	1.156
Loza, cerámica, cuero y madera	1.180
Material ferroso	1.334
Material no ferroso	0.558
Materiales de construcción	3.138
Papel y cartón	21.692
Plásticos	8.157
Residuo alimenticio	38.140
Residuo de jardinería	5.293
Vidrio	7.576
Otros	11.756
Total	100.000

Figura 1.3 Valores porcentuales de los principales componentes de los RSM del Distrito Federal  
Gráfica y tabla elaboradas a partir de los datos de la tabla 1.3

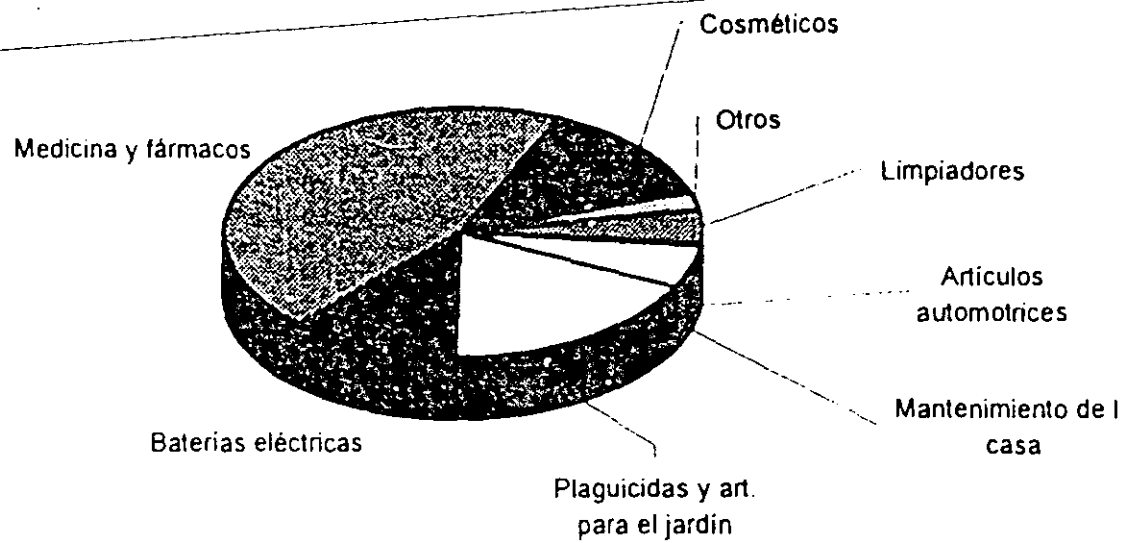


Figura 1.4 Composición física de los RSM potencialmente peligrosos en el Distrito Federal. Fuente: DGSU

Clasificación	Promedio
Limpiadores	4.42
Artículos automotrices	0.24
Mantenimiento de la casa	5.61
Plaguicidas y art. para el jardín	17.76
Baterías eléctricas	11.71
Medicina y fármacos	44.68
Cosméticos	13.28
Otros	2.30
Total	100.00

Se ha mencionado que la composición de los RSM depende, entre otros factores, del nivel socioeconómico de la población. En primera instancia, se tiene un mayor volumen de residuos en los niveles sociales altos, debido a la presencia frecuente de empaques y envolturas. Los estratos bajos, es decir, aquellos que perciben ingresos mínimos, producen hasta 15% menos de desechos inorgánicos. En cuanto a la composición de metal, papel, plástico y vidrio, en los primeros se compone del 32%, en tanto que en los niveles altos es del 45%.<sup>(10)</sup>

A nivel global y con propósitos de comparación, en la tabla 1.4 se encuentra la composición aproximada de los RSM de otros países según su ingreso económico. En esta tabla se excluyen todos los materiales reciclados.

Tabla 1.4 Distribución típica de los componentes de la fracción residencial de los RSM para otros países según su ingreso<sup>a,b</sup>

Componente	Países con ingreso bajo	Países con ingreso medio	Países con ingreso alto <sup>c</sup>
<b>Materia orgánica</b>			
Residuo alimenticio	40 - 85 <sup>d</sup>	20 - 65	6 - 30
Papel	1 - 10	8 - 30	20 - 45
Corrugado	1 - 10	8 - 30	5 - 15
Plásticos	1 - 5	2 - 6	2 - 8
Textiles	1 - 5	2 - 10	2 - 6
Hule	1 - 5	1 - 4	0 - 2
Piel	1 - 5	1 - 4	0 - 2
Residuo de jardinería	1 - 5	1 - 10	10 - 20
Madera	1 - 5	1 - 10	1 - 4
Otros orgánicos	-	-	-
<b>Materia inorgánica</b>			
Vidrio	1 - 10	1 - 10	4 - 12
Latas	1 - 5	1 - 5	2 - 8
Aluminio	1 - 5	1 - 5	0 - 1
Otros metales	1 - 5	1 - 5	1 - 4
Tierra, ceniza, etc.	1 - 40	1 - 30	0 - 10

<sup>a</sup> Ref de [1]

<sup>b</sup> Países con ingreso bajo ingreso per cápita menor a USD 750 (\$7 500)\* en 1990

Países con ingreso medio, ingreso per cápita mayor a USD 750 (\$7 500)\* y menor a USD 5,000 (\$50,000)\* en 1990

Países con ingreso alto ingreso per cápita mayor a USD 5 000 (\$50,000)\* en 1990

\*Tipo de cambio actualizado (1998) 1 USD = \$10 pesos mexicanos

<sup>c</sup> Los países con ingreso alto son los más industrializados

<sup>d</sup> Residuo alimenticio compuesto en su mayor parte por residuos de la preparación de alimentos

Es de notarse en esta tabla el alto porcentaje de residuo alimenticio en los países menos desarrollados. Esto se debe en mayor parte a que las frutas y verduras no son desde un principio separadas de sus raíces o preparadas para su comercialización, existe un gran desperdicio de frutas y legumbres en los lugares de cosecha y, finalmente, no existe el uso de trituradoras de residuo alimenticio caseras conectadas a la red de drenaje como en los países desarrollados.

Por otro lado, en comparación con los países industrializados, los porcentajes de los demás materiales de tipo orgánico son de alguna forma más bajos. Con respecto a los materiales de empaque como papel, corrugado y plástico, es claro ver por estas diferencias el grado de actividad industrial de un país desarrollado con respecto a otro del tercer mundo. Estas diferencias en términos de la composición por el nivel de ingreso de una comunidad, pueden ser vistas en la tabla 1.5. En ella se presentan los datos de composición de 8 países incluyendo a México y es posible darse cuenta de muchas diferencias en términos de los materiales presentes en sus residuos.

**Tabla 1.5 Composición física porcentual de los RSM en varios países \***

Subproducto	% en peso							
	Estados Unidos	México	Canadá	Colombia	Francia	Inglaterra	Italia	Turquía
Papel	40.00	7.31	25.00	22.00	35.30	37.00	18.80	9.30
Papel periódico	-	7.00	9.00	-	-	-	-	-
Plástico	8.00	3.69	8.00	5.00	6.90	2.00	3.70	3.00
Metales	8.50	0.92	6.00	1.00	4.80	8.00	5.60	1.50
Madera	-	1.74	5.00	-	-	-	-	-
Residuo alimenticio	17.60	24.07	24.00	56.00	21.1*	28.00*	53.50*	58.30*
Residuo de jardinería	7.40	3.54	9.00	10.00	-	-	-	-
Textiles	-	0.57	-	4.00	4.90	2.00	3.00	1.98
Vidrio	7.00	3.54	7.00	2.00	11.70	8.00	5.00	0.78
Diversos	-	-	-	-	3.60	15.00	6.80	19.00
Otros	11.50	47.62	7.00	-	11.70	-	3.60	6.14
<b>Total</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>

\* Fuente DGSU, 1998

### 1.2.1 Variaciones en la composición de los RSM

La composición de los RSM varía según la región de estudio. Existen otros factores como el clima y de algunos hábitos de consumo, los cuales afectan de forma directa este parámetro. La tabla 1.6 muestra las variaciones típicas en la composición de los RSM recolectados por efectos del clima entre dos estaciones del año.

La variación de los subproductos es un factor crítico en el manejo de los RSM en una comunidad, así como para la operación de las plantas de recuperación de energía. Por esto, se debe de contar con un buen estudio para poder predecir de alguna manera los cambios en la cantidad y la composición de los RS a lo largo del tiempo.

Sin embargo, aún con los estudios más exhaustivos, no se puede llegar a una evaluación precisa. En general, el coeficiente de variación para cada uno de los componentes es muy grande.



En el Distrito Federal no se cuenta con un estudio que cuantifique la variación aproximada de los residuos generados en esta ciudad a lo largo del año, pero debe resaltarse que dichas variaciones son muy grandes incluso en periodos muy pequeños. Por ejemplo, la composición de la basura generada en los días laborables no es la misma que la que se tiene en los fines de semana, ni la misma durante las épocas de festejo más importantes.

**Tabla 1.6 Variación típica en la composición de los RSM de tipo domiciliario recolectados entre dos estaciones del año <sup>a</sup>**

Subproducto	% en peso		% de variación <sup>b</sup>	
	En invierno	En verano	Decremento	Incremento
Residuos de comida	11.1	13.5		21.6
Papel	45.2	40.0	11.5	
Plásticos	9.1	8.2	9.9	
Otros orgánicos	4.0	4.6		15.0
Cascajo	18.7	24.0		28.3
Vidrio	3.5	2.5	28.6	
Metales	4.1	3.1	24.4	
Materia inerte y otros	4.3	4.1	4.7	
<b>Total</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>		

<sup>a</sup> Ref de [1]

<sup>b</sup> En base a invierno

Con todos los datos mostrados se concluye que un estudio serio y productivo debe considerar los valores de composición de varios años atrás y tomar muy en cuenta las tendencias futuras para estos. Para esto, cualquier información como la presentada en la tabla 1.6, puede ser de mucha utilidad.

### 1.2.2 Cambios futuros en la composición de los RSM

En términos de la planeación del manejo de los RSM, es de gran importancia saber las tendencias futuras en su composición. También a largo plazo es importante conocer si la cantidad de estos cambia de manera significativa. A medida que en una comunidad se adopten leyes que propongan el desarrollo de programas de reciclaje de materiales, o se establezca una reducción en la cantidad de ciertos componentes, sin duda la composición de los RS cambiará.

El impacto de los programas de manejo de los RSM dependerá de la existencia de otros programas afines existentes en ese lugar. Por ejemplo, una planta de incineración de RSM es creada para operar en un área comercial y es diseñada con base en un poder calorífico de los RSM de 15,000 kJ/kg. Seis años después, justo cuando la planta entra en operación, el poder calorífico de los RSM cambia y ahora es de 10,500 kJ/kg, viéndose afectado el funcionamiento de la planta por la creación de un programa de reciclaje de corrugado durante los años transcurridos.

Ya se ha visto que es importante el considerar los cambios que pueden suscitarse en torno a la composición de los RSM con el tiempo. Cuatro de los componentes que tienen gran influencia en la composición de los RS recolectados actualmente en el D.F. son los

residuos de alimentos, papel, vidrio, corrugado, los residuos jardinería y los plásticos. Como ejemplo, a principios del siglo XX no existía la categoría de residuos plásticos dentro de la clasificación general de los RSM en una comunidad.

La cantidad de residuos de alimentos recolectados ha cambiado considerablemente debido a los avances tecnológicos y a los hábitos de consumo de la población en general. Dos de los avances tecnológicos que han tenido mayor efecto son el desarrollo de la industria de procesos para alimentos y de empaque, así como el uso de trituradoras de comida en los hogares del primer mundo. Como ejemplo, en Estados Unidos el porcentaje en peso de los residuos de comida ha disminuido de un 14% a principios de los años sesenta a un 9% en 1992. El porcentaje del papel y corrugado encontrados en los RSM se ha incrementado enormemente a partir de mediados de siglo; de un 20% en los años cuarenta a un 40% en 1992. <sup>(1)</sup>

En general, se espera que el uso de papel y corrugado se mantenga constante en los próximos años. El porcentaje de residuos provenientes de terrenos y jardines se ha incrementado de igual manera en los últimos 25 años, debido en mayor parte a las leyes que prohíben la quema de estos en lugares abiertos. Las condiciones climáticas, como las sequías, han afectado esta cantidad en algunas poblaciones.

La cantidad de plásticos presente en los RSM se ha incrementado significativamente durante los últimos 50 años. El uso de los plásticos ha crecido desde cantidades insignificantes en los años cuarenta, hasta un 7 u 8% en peso en los noventa. Se prevé que el uso de estos continuará incrementándose, pero a un ritmo menor que en los pasados 25 años.

---

## **2. Propiedades físicas, químicas y biológicas de los residuos sólidos municipales**

El conocer las propiedades físicas, químicas y biológicas de los RSM es fundamental para evaluar los diversos métodos de tratamiento existentes y en estudio. Específicamente, estas propiedades conforman la base técnica para el diseño y desarrollo de los modernos sistemas integrales de manejo de RS.

Este capítulo tiene como objetivo el enunciar dichas propiedades así como su papel en las transformaciones a lo largo de su tratamiento y en aquellas destinadas a la recuperación de energía.

### **2.1 Propiedades físicas**

Dentro de las propiedades físicas más importantes de los RSM se encuentran la densidad, contenido de humedad, el tamaño y distribución de partícula y la porosidad del desecho compactado. Estas propiedades, junto con las químicas y las biológicas, deben ser conocidas para el diseño y operación de los sistemas actuales, especialmente en la fase de disposición final.

#### **2.1.1 Densidad**

La densidad se define como la masa de un material por unidad de volumen y se expresa en  $\text{kg/m}^3$ . La densidad de los componentes de los RSM varían según si se encuentran en contenedores, compactados, sin compactar, triturados, etc. En este sentido, hay que identificar la forma en que esta propiedad se encuentra expresada para un determinado componente y evitar errores de interpretación.

La densidad es un dato que se requiere continuamente para evaluar la masa y volumen total de desecho a ser manejado. Desafortunadamente, no existe uniformidad en la forma en que se reportan los datos en la literatura. Con frecuencia, se suele no hacer distinción entre la densidad de los RSM compactados y sin compactar.

En la tabla 2.1 se muestran la densidad típica de varios subproductos localizados en contenedores, compactados y sin compactar. Por otra parte, los datos de densidad *in-situ* para los residuos de la ciudad de México, se encuentran en la figura 2.1, en donde se encuentran presentados según el tipo de fuente.

#### **2.1.2 Contenido de humedad**

El contenido de humedad de los RSM, reportado en la figura 2.2, varía según la composición, los cambios climáticos a lo largo del año y la humedad del medio ambiente, en particular cuando llueve.

**Tabla 2.1 Densidad y contenido de humedad de residuos de origen domiciliario, de comercios, industriales y agrícolas \***

Tipo de residuo	Densidad, Kg/m <sup>3</sup>		Contenido de humedad % en peso	
	Rango	Típico	Rango	Típico
<b>Residencial (no compactado)</b>				
Residuo alimenticio	130-480	290	50-80	70
Papel	40-130	90	4-10	6
Corrugado	40-80	50	4-8	5
Plásticos	40-130	65	1-4	2
Textiles	40-100	65	6-15	10
Hules	100-200	130	1-4	2
Piel	100-260	160	8-12	10
Residuo de jardinería	60-225	100	30-80	60
Madera	130-320	240	15-40	20
Vidrio	160-480	330	1-4	2
Lata	50-160	90	2-4	3
Aluminio	65-240	160	2-4	2
Otros metales	130-1150	320	2-4	3
Tierra, cenizas, etc.	320-1000	480	6-12	8
Cenizas	650-830	745	6-12	6
Escombros	90-180	130	5-20	15
<b>Residuo de jardinería</b>				
Hojarasca (suelta y seca)	30-150	60	0-40	30
Césped (suelto y húmedo)	210-300	240	40-80	60
Césped (mojado y compactado)	600-830	600	50-90	80
Residuos triturados	270-360	300	20-70	50
Residuos abonados	270-390	330	40-60	50
<b>Residuos municipales</b>				
Compactados en camiones	180-450	300	15-40	20
En rellenos sanitarios				
Compactados normalmente	360-500	450	15-40	25
Perfectamente compactados	590-740	600	15-40	25
<b>Residuos de comercios</b>				
Residuo alimenticio	475-950	540	50-80	70
Enseres	150-200	180	0-2	1
Cajas de madera	110-160	110	10-30	20
Recortes de arbustos	100-180	150	20-80	5
Desperdicio (combustible)	50-180	120	10-30	15
Desperdicio (no combustible)	180-360	300	5-15	10
Desperdicio mixto	140-180	160	10-25	15

(CONTINUA)

---

**Residuos de la  
construcción y demolición**

Varios de demolición (no combustible)	1000-1600	1420	2-10	4
Varios de demolición (combustible)	300-400	360	4-15	8
Varios de construcción (combustible)	180-360	260	4-15	8
Residuos de concreto	1200-1800	1540	0-5	-

---

**Residuos industriales**

Residuos químicos	800-1100	1000	75-99	80
Ceniza volátil	700-900	800	2-10	4
Recortes de cuero	100-250	160	6-15	10
Metales (pesados)	1500-2000	1780	0-5	-
Metales (ligeros)	500-900	740	0-5	-
Metales (mixtos)	700-1500	900	0-5	-
Acetes, breas, asfaltos	800-1000	950	0-5	-
Aserrín	100-350	290	10-40	20
Textiles	100-219	180	6-15	10
Madera (mixta)	400-680	500	30-60	25

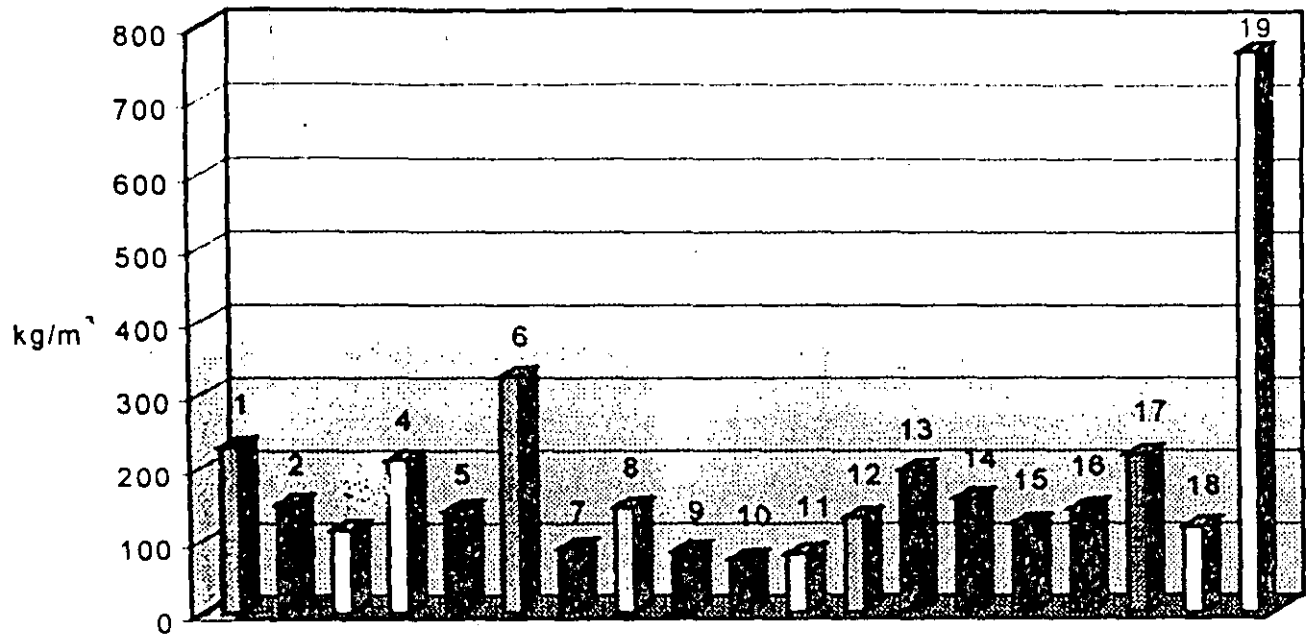
---

**Residuos agrícolas**

Residuos mixtos	400-750	560	40-80	50
Animales muertos	200-500	360	-	-
Residuos de frutas	250-750	360	60-90	75
Estiércol (húmedo)	900-1050	1000	75-96	94
Residuos de verduras	200-700	360	60-90	75

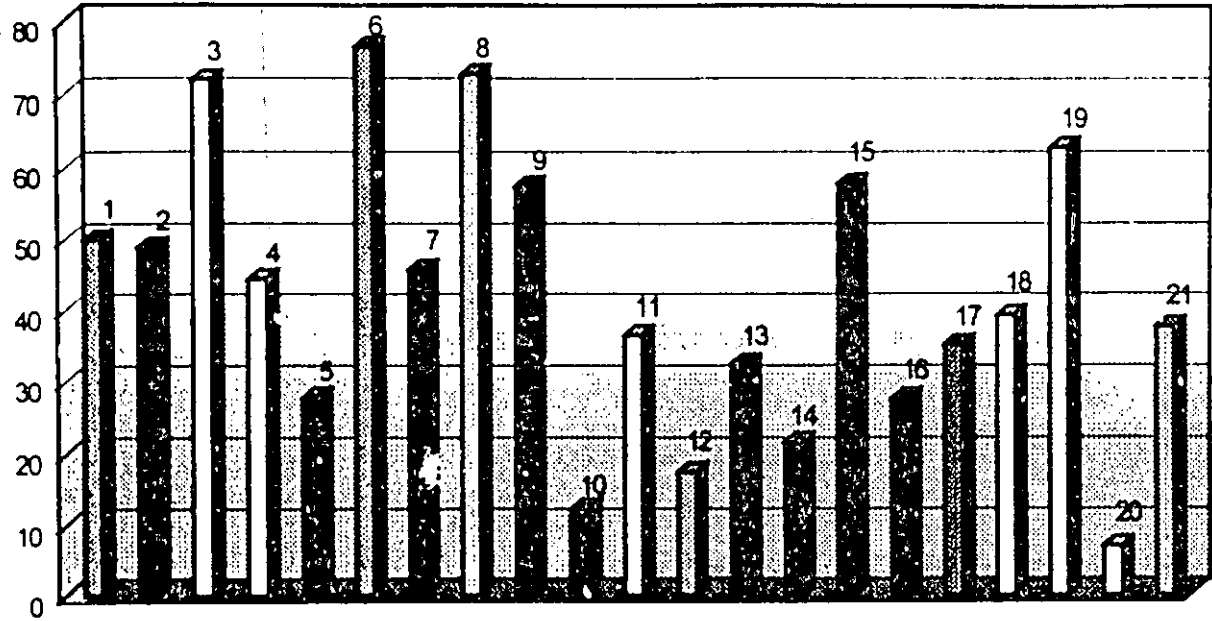
---

\* Ref de [1]



Categoría	Fuente	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
Domiciliarios	1 Unifamiliar, plurifamiliar	228
Comercios	2 Tiendas de autoservicio	148
	3 Tiendas departamentales	113
	4 Locales comerciales	209
	5 Almacenamiento y abasto	139
	6 Restaurantes y bares	324
	7 Servicios públicos	88
	Servicios	8 Hoteles y moteles
9 Centros educativos		84
10 Centros de espectáculo y recreación		73
11 Oficinas públicas y privadas		80
12 Unidades médicas		130
13 Laboratorios		196
Especiales	14 Veterinarias	157
	15 Transporte terrestre	122
	16 Transporte aéreo	142
	17 Centros de readaptación social	217
Áreas públicas	18 Espacios abiertos	117
	19 Vía pública	768

Figura 2.1 Valores de densidad *in-situ* para los RSM generados en el Distrito Federal  
Fuente DGSU



Categoría	Fuente	Contenido de humedad (% en peso)
Domicilianos	1 Unifamiliar	49.93
	2 Plurifamiliar	48.97
Comercios	3 Tiendas de autoservicio	72.00
	4 Tiendas departamentales	44.40
	5 Locales comerciales	27.80
	6 Almacenamiento y abasto	76.63
	7 Mercados de artesanías	45.79
	8 Mercado de las flores	72.80
Servicios	9 Restaurantes y bares	57.43
	10 Servicios públicos	12.30
	11 Hoteles	36.50
	12 Centros educativos	17.40
	13 Centros de espectáculos y recreación	32.47
	14 Oficinas públicas y privadas	21.53
Especiales	15 Unidades médicas	57.81
	16 Laboratorios	27.66
	17 Terminal terrestre	35.10
	18 Transporte aéreo	39.20
	19 Centros de readaptación social	62.80
Áreas públicas	20 Espacios abiertos	7.00
	21 Vía pública	37.67

Figura 2.2 Valores del contenido de humedad para los RSM generados en el Distrito Federal  
Fuente DGSU

La cantidad de humedad que puede retener un subproducto, sujeta a la fuerza de gravedad, es un factor de importancia crítica en la formación de filtraciones en los rellenos sanitarios. El agua en exceso, que no pudo ser retenida por los residuos dentro del relleno, será liberada en el lixiviado.

Esta propiedad varía según la presión aplicada y el estado de descomposición de los residuos. La retención de humedad de RS no compactados, provenientes de comercios y el sector domiciliario, se encuentra entre 50 y 60%.<sup>[1]</sup>

El contenido de humedad de un subproducto afecta el poder calorífico del mismo y es un factor muy importante de tomar en cuenta si se piensa usar como material combustible de forma directa o como materia prima para la elaboración de combustibles derivados de residuos (*Refuse-Derived Fuel*, RDF). En la figura 2.2 se muestra particularmente el contenido de humedad de los RSM generados en la ciudad de México por tipo de fuente.

### 2.1.3 Permeabilidad en residuos compactados

La permeabilidad está definida como la propiedad que posee un material para permitir el paso de un fluido a través de él sin deformar su estructura bajo la carga producida por un gradiente hidráulico. La conductividad hidráulica de los RSM compactados es una propiedad física importante que a largo plazo determina el movimiento de líquidos y gases dentro de un relleno sanitario.

La permeabilidad está expresada por un coeficiente de permeabilidad, dado por la ecuación:

$$K = C \cdot d^2 \frac{\gamma}{\mu} = k \frac{\gamma}{\mu} \quad (2.1)$$

Donde:  $K$  es el coeficiente de permeabilidad;  $C$ , un factor de forma adimensional;  $d$ , el tamaño promedio de los poros;  $\gamma$ , la densidad del agua;  $\mu$ , la viscosidad dinámica del agua;  $k$ , la permeabilidad específica. Este último factor depende de las propiedades del sólido tales como la distribución de los poros y la superficie específica. Los valores típicos para la permeabilidad específica de los RSM compactados en un relleno sanitario se encuentran dentro del rango de  $10^{-11}$  y  $10^{-12}$  m<sup>2</sup> en la dirección vertical y aproximadamente  $10^{-10}$  m<sup>2</sup> en la dirección horizontal.<sup>[1]</sup>

## 2.2 Propiedades químicas

Toda la información referente a la composición química de los componentes de los RSM es importante para evaluar procesos alternativos y opciones de recuperación de energía. Por ejemplo, la calidad de la combustión dependerá de la composición química de las distintas fracciones de los residuos.

Si los RSM van a ser usados como combustible, existen cuatro estudios muy importantes en donde se obtiene la información suficiente para determinar la calidad del proceso, y estos son:

- 1- Análisis inmediato
- 2- Punto de fusión de la ceniza
- 3- Análisis final
- 4- Poder calorífico



En lugares donde la fracción orgánica de los RSM sea convertida en restaurador de suelos (composta) o sea usada como fuente de alimentación para la producción de otros productos biológicos de transición, no sólo bastará la información obtenida por medio del análisis último, sino que será necesario un análisis más detallado para cada componente.

### **2.2.1 Análisis inmediato**

En el análisis inmediato para la fracción combustible de los RSM, se realizan las siguientes pruebas:

1. Humedad (pérdida de humedad al calentar a 105°C durante 1 hora).
2. Materia combustible volátil (pérdida adicional de peso durante la ignición a 950°C dentro de un crisol cerrado).
3. Carbono fijo (residuo combustible después de que la materia volátil ha sido removida).
4. Ceniza (peso de la materia residual después de la combustión en un crisol abierto).

Los datos aproximados arrojados por un análisis inmediato para los componentes combustibles de los RSM se encuentran en la tabla 2.2. Cabe resaltar que la prueba realizada para la determinación de la materia combustible volátil en este análisis, es diferente a la prueba que se usa para determinar los sólidos volátiles con fines biológicos.

### **2.2.2 Punto de fusión de la ceniza**

El punto de fusión de la ceniza se define como aquella temperatura a la cual la ceniza resultante de la incineración de los residuos forma un sólido (escoria) por fusión y aglomeración. Las temperaturas de fusión típicas para la formación de escoria a partir de RS varían de los 1100 a los 1200°C.

### **2.2.3 Análisis finales**

Los análisis finales de los distintos componentes de los RSM generalmente conducen a la determinación de los porcentajes de carbono (C<sub>2</sub>), hidrógeno (H<sub>2</sub>), oxígeno (O<sub>2</sub>), nitrógeno (N<sub>2</sub>), azufre (S<sub>2</sub>) y ceniza.

Debido a la preocupación que existe sobre la emisión de compuestos con cloro durante la combustión, la determinación de halógenos se considera en este análisis. Los resultados permiten conocer la composición química de la materia orgánica presente en los RSM. Estos resultados también son útiles para definir la mezcla de subproductos con el fin de obtener relaciones carbono/nitrógeno apropiadas en procesos de conversión biológica.

En la tabla 2.3 se presentan los datos obtenidos de los análisis finales de diversos materiales combustibles. La tabla 2.4 muestra valores típicos de materia inerte residual para los RS de origen domiciliario.

### **2.2.4 Poder calorífico**

El poder calorífico de la fracción orgánica de los RSM se puede determinar usando una caldera funcionando como un calorímetro, una bomba calorimétrica de laboratorio, o calculándolo si se conoce la composición elemental del material combustible.

La tabla 2.4 muestra valores del poder calorífico y materia inerte residual para los principales componentes de los RS de tipo domiciliario.

Por diversos factores ya mencionados en el capítulo anterior, la composición de los RSM varía entre una comunidad y otra. Esto trae consigo que el poder calorífico de los residuos sea diferente también debido a la composición química de estos. Los valores más altos los tienen aquellos residuos ricos en materiales de empaque como papel, cartón y algunos plásticos, y esto es de esperarse en países de alto ingreso económico per cápita y mayor actividad industrial. También influye la cantidad de residuo alimenticio presente, siendo esta la principal razón del bajo poder calorífico de los residuos generados en países subdesarrollados. En el caso de la ciudad de México, el poder calorífico promedio de los RSM con base en su composición física es de 10,260 kJ/kg.

En la figura 2.3 se muestra el contenido de humedad promedio así como el poder calorífico promedio de los RSM de varios países. En ella se pueden observar diferencias por las razones expuestas anteriormente y como punto de apoyo se puede consultar la tabla 1.5.

### **2.2.5 Nutrientes esenciales y otros elementos**

Cuando la fracción orgánica de los RSM es aprovechada para la producción de composta y la generación de metano y de metanol, es necesario tener información sobre los nutrientes esenciales y elementos que los componen para evaluar la actividad biológica presente en estos procesos.

Esta información, mostrada en la tabla 2.5, es importante cuando se manejan balances microbiológicos de nutrientes y cuando se desea saber qué hacer con la materia residual después de realizada la conversión biológica de la materia orgánica.

### **2.3 Propiedades biológicas**

Excluyendo los plásticos, hules y componentes del cuero, la fracción orgánica de la mayor parte de los RSM se puede clasificar de la siguiente manera:

1. Componentes solubles en agua como azúcares, almidones, aminoácidos y vanos ácidos de tipo orgánico.
2. Hemicelulosa, un producto de la condensación de azúcares de 5 y 6 carbonos.
3. Celulosa, un producto de la condensación de la glucosa.
4. Grasas, aceites y ceras, los cuales son ésteres de alcoholes y ácidos grasos de cadena larga.
5. Lignina, un polímero que posee anillos aromáticos con grupos metoxi ( $-\text{OCH}_3$ ), y que es de una naturaleza química aún no conocida, encontrándose en algunos productos de papel como periódico y el cartón de fibra.
6. Lignocelulosa, una combinación de lignina y celulosa.
7. Proteínas, compuestas de cadenas de aminoácidos.

Quizás, la característica biológica más importante de la fracción orgánica de los RSM es que casi todos los componentes orgánicos pueden ser convertidos biológicamente en gases y sólidos, relativamente inertes de carácter orgánico e inorgánico.

La tabla 2.4 muestra valores del poder calorífico y materia inerte residual para los principales componentes de los RS de tipo domiciliario.

Por diversos factores ya mencionados en el capítulo anterior, la composición de los RSM varía entre una comunidad y otra. Esto trae consigo que el poder calorífico de los residuos sea diferente también debido a la composición química de estos. Los valores más altos los tienen aquellos residuos ricos en materiales de empaque como papel, cartón y algunos plásticos, y esto es de esperarse en países de alto ingreso económico per cápita y mayor actividad industrial. También influye la cantidad de residuo alimenticio presente, siendo esta la principal razón del bajo poder calorífico de los residuos generados en países subdesarrollados. En el caso de la ciudad de México, el poder calorífico promedio de los RSM con base en su composición física es de 10,260 kJ/kg.

En la figura 2.3 se muestra el contenido de humedad promedio así como el poder calorífico promedio de los RSM de varios países. En ella se pueden observar diferencias por las razones expuestas anteriormente y como punto de apoyo se puede consultar la tabla 1.5.

### **2.2.5 Nutrientes esenciales y otros elementos**

Cuando la fracción orgánica de los RSM es aprovechada para la producción de composta y la generación de metano y de metanol, es necesario tener información sobre los nutrientes esenciales y elementos que los componen para evaluar la actividad biológica presente en estos procesos.

Esta información, mostrada en la tabla 2.5, es importante cuando se manejan balances microbiológicos de nutrientes y cuando se desea saber qué hacer con la materia residual después de realizada la conversión biológica de la materia orgánica.

## **2.3 Propiedades biológicas**

Excluyendo los plásticos, hules y componentes del cuero, la fracción orgánica de la mayor parte de los RSM se puede clasificar de la siguiente manera:

1. Componentes solubles en agua como azúcares, almidones, aminoácidos y varios ácidos de tipo orgánico.
2. Hemicelulosa, un producto de la condensación de azúcares de 5 y 6 carbonos.
3. Celulosa, un producto de la condensación de la glucosa.
4. Grasas, aceites y ceras, los cuales son ésteres de alcoholes y ácidos grasos de cadena larga.
5. Lignina, un polímero que posee anillos aromáticos con grupos metoxi (-OCH<sub>3</sub>), y que es de una naturaleza química aún no conocida, encontrándose en algunos productos de papel como periódico y el cartón de fibra.
6. Lignocelulosa, una combinación de lignina y celulosa.
7. Proteínas, compuestas de cadenas de aminoácidos.

Quizás, la característica biológica más importante de la fracción orgánica de los RSM es que casi todos los componentes orgánicos pueden ser convertidos biológicamente en gases y sólidos relativamente inertes de carácter orgánico e inorgánico.

Tabla 2.2 Resultados de un análisis inmediato y datos del poder calorífico de los materiales encontrados en los RS de origen domiciliario, comercial e industrial \*

Subproductos	Análisis inmediato, % en peso				Poder calorífico, KJ/Kg		
	Humedad	Materia volátil	Carbono fijo	No combustible	Al ser recolectado	Seco	Seco y libre de ceniza
<b>Residuos y productos alimenticios</b>							
Grasas	2.0	95.3	2.5	0.2	37,570	38,341	39,202
Residuos alimenticios	70.0	21.4	3.6	5.0	4,184	13,931	16,718
Residuos de frutas	78.7	16.6	4.0	0.7	3,975	18,658	19,292
Residuos de carnes	38.8	56.4	1.8	3.1	17,750	29,001	30,550
<b>Productos de papel</b>							
Corrugado	5.2	77.5	12.3	5.0	16,397	17,296	18,260
Revistas	4.1	66.4	7.0	22.5	12,234	12,756	16,665
Periódico	6.0	81.1	11.5	1.4	18,570	19,755	20,053
Papel (mezclado)	10.2	75.9	8.4	5.4	15,831	17,629	18,758
Cartones encerados	3.4	90.9	4.5	1.2	26,373	27,299	27,644
<b>Plásticos</b>							
Plásticos mezclados	0.2	95.8	2.0	2.0	32,834	33,507	37,312
Poliétileno	0.2	98.5	<0.1	1.2	43,513	43,599	44,130
Poliestireno	0.2	98.7	0.7	0.5	38,232	38,306	38,257
Poliuretano	0.2	87.1	8.3	4.4	26,089	26,140	27,346
Cloruro de polivinilo	0.2	86.9	10.8	2.1	22,715	22,759	23,250
<b>Textiles, hule, cuero</b>							
Textiles	10.0	66.0	17.5	6.5	18,535	20,593	22,882
Hule	1.2	83.9	4.9	9.9	25,357	25,665	28,524
Cuero	10.0	68.5	12.5	9.0	17,464	18,721	20,915
<b>Madera, árboles, etc.</b>							
Residuos de jardinería	60.0	30.0	9.5	0.5	6,056	15,142	15,333
Madera verde	50.0	42.3	7.3	0.4	4,890	9,780	9,859
Madera dura	12.0	75.1	12.4	0.5	17,119	19,452	19,564
Madera (mezclada)	20.0	68.1	11.3	0.6	15,461	19,364	19,520

(CONTINUA)

Vidrio, metales, etc.							
Vidrio y mineral	2.0	-	-	96-99+	84 <sup>b</sup>	86	60
Metál, latas	5.0	-	-	94-99+	301 <sup>b</sup>	319	317
Metal, ferroso	2.0	-	-	96-99+	-	-	-
Metal, no ferroso	2.0	-	-	94-99+	-	-	-
Misceláneos							
Barreduras de oficina	3.2	20.5	6.3	70.0	8,543	8,827	31,882
RSM							
de tipo domiciliario	21.0	52.0	7.0	20.0	11,643	14,553	19,403
	(15-40)	(40-60)	(4-15)	(10-30)			
RSM							
de comercios	15.0	-	-		12,807	15,065	
	(10-30)						
RSM	20.0	-	-		10,711	13,389	
	(10-30)						

<sup>a</sup> Ref. de (1)

<sup>b</sup> El poder calorífico proviene de las envolturas, etiquetas, y materiales anexos

Tabla 2.3 Resultados de un análisis último para materiales combustibles encontrados en los RS de origen domiciliario, comercial e industrial <sup>a</sup>

Subproductos	% en peso (base seca)					
	Carbono	Hidrógeno	Oxígeno	Nitrógeno	Azufre	Cenizas
Residuos y productos alimenticios						
Grasas	73.0	11.5	14.8	0.4	0.1	0.2
Residuos de comida	48.0	6.4	37.6	2.6	0.4	5.0
Residuos de frutas	48.5	6.2	39.5	1.4	0.2	4.2
Residuos de carnes	59.6	9.4	24.7	1.2	0.2	4.9
Productos de papel						
Corrugado	43.0	5.9	44.8	0.3	0.2	5.0
Revistas	32.9	5.0	38.6	0.1	0.1	23.3
Periódico	49.1	6.1	43.0	<0.1	0.2	1.5
Papel (varios)	43.4	5.8	44.3	0.3	0.2	6.0
Cartones encerados	59.2	9.3	30.1	0.1	0.1	1.2
Plásticos						
Plásticos mezclados	60.0	7.2	22.8	-	-	10.0
Poliétileno	85.2	14.2	-	<0.1	<0.1	0.4
Poliestireno	87.1	8.4	4.0	0.2	-	0.3
Poliuretano <sup>b</sup>	63.3	6.3	17.6	6.0	<0.1	4.3
Cloruro de polivinilo <sup>b</sup>	45.2	5.6	1.6	0.1	0.1	2.0
Textiles, hule, cuero						
Textiles	48.0	6.4	40.0	2.2	0.2	3.2
Hule	69.7	8.7	-	-	1.6	20.0
Cuero	60.0	8.0	11.6	10.0	0.4	10.0
Madera, arboles, etc.						
Residuos de jardinería	46.0	6.0	38.0	3.4	0.3	6.3
Madera verde	50.1	6.4	42.3	0.1	0.1	1.0
Madera dura	49.6	6.1	43.2	0.1	<0.1	0.9
Madera (mezclada)	49.5	6.0	42.7	0.2	<0.1	1.5
Virutas de madera	48.1	5.8	45.5	0.1	<0.1	0.4
Vidrio, metales, etc.						
Vidrio y mineral <sup>c</sup>	0.5	0.1	0.4	<0.1	-	98.9
Metales <sup>c</sup>	4.5	0.6	4.3	<0.1	-	90.5
Misceláneos						
Barreduras de oficina	24.3	3.0	4.0	0.5	0.2	68.0
Aceites, pinturas	66.9	9.6	5.2	2.0	-	16.3
Combustibles derivados (RDF)	44.7	6.2	38.4	0.7	<0.1	9.9

<sup>a</sup> Ref de [1]

<sup>b</sup> El resto es cloro

<sup>c</sup> El contenido orgánico se encuentra en las envolturas, etiquetas, y otros materiales anexos

**Tabla 2.4 Valores típicos de materia inerte residual y poder calorífico para RSM de origen domiciliario <sup>a</sup>**

Componente	Materia inerte residual <sup>b</sup> , %		Poder calorífico <sup>c</sup> , kJ/kg	
	Rango	Típico	Rango	Típico
<b>Orgánico</b>				
Residuo alimenticio	2 - 8	5.0	3,490 - 6,980	4,650
Papel	4 - 8	6.0	11,630 - 18,610	16,750
Corrugado	3 - 6	5.0	13,960 - 17,450	16,280
Plásticos	6 - 20	10.0	27,910 - 37,220	32,560
Textiles	2 - 4	2.5	15,120 - 18,610	17,450
Hule	8 - 20	10.0	20,940 - 27,910	23,260
Cuero	8 - 20	10.0	15,120 - 19,770	17,450
Residuos de jardinería	2 - 6	4.5	2,330 - 18,610	6,515
Madera	0.6 - 2	1.5	17,450 - 19,770	18,610
Misceláneos	-	-	-	-
<b>Inorgánico</b>				
Vidrio	96 - 99+	98.0	116 - 233 <sup>d</sup>	140
Latas	96 - 99+	98.0	233 - 1,160 <sup>d</sup>	700
Aluminio	90 - 99+	96.0	-	-
Otros metales	94 - 99+	98.0	233 - 1,160 <sup>d</sup>	700
Tierra, cenizas, etc.	60 - 80	70.0	2,330 - 11,630	6,980
<b>RSM</b>			<b>9,300 - 13,960</b>	<b>11,630 <sup>e</sup></b>

<sup>a</sup> Ref de [1]

<sup>b</sup> Después de la combustión

<sup>c</sup> Al ser desechado el componente

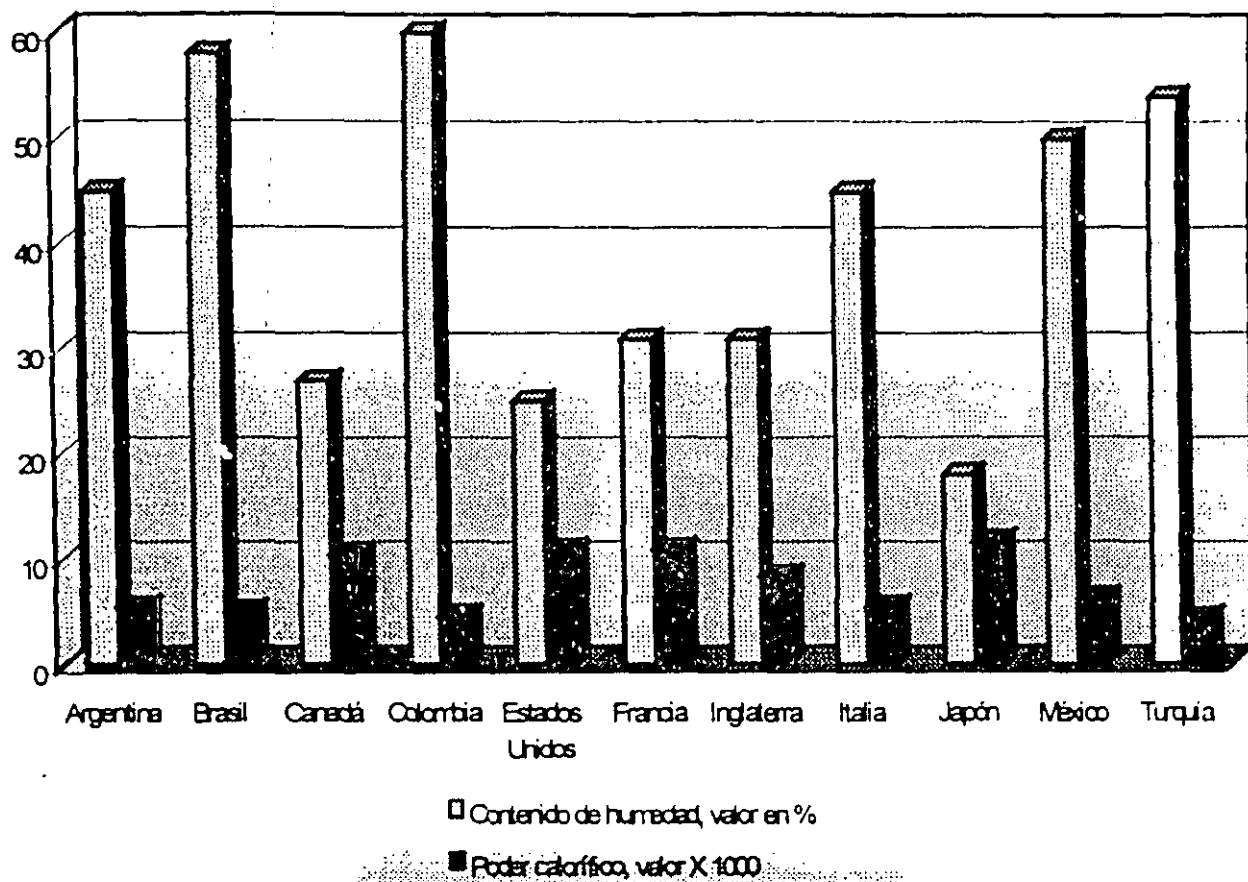
<sup>d</sup> El poder calorífico proviene de las envolturas, etiquetas, y materiales anexos

<sup>e</sup> Este valor se ha incrementado en los últimos años debido a la menor cantidad de desechos de comida presentes y el creciente uso de plásticos en el hogar

**Tabla 2.5 Análisis elemental de la materia orgánica empleada en procesos de conversión biológica <sup>a</sup>**

Componente	Unidad	Alimentación (base seca)			
		Periódico	Papel de oficina	Residuos de jardinería	Residuo alimenticio
NH <sub>4</sub> -N	ppm	4	61	149	205
NO <sub>3</sub> -N	ppm	4	218	490	4278
P	ppm	44	295	3500	4900
PO <sub>4</sub> -P	ppm	20	164	2210	3200
K	%	0.35	0.29	2.27	4.18
SO <sub>4</sub> -S	ppm	159	324	882	855
Ca	%	0.01	0.10	0.42	0.43
Mg	%	0.02	0.04	0.21	0.16
Na	%	0.74	1.05	0.06	0.15
B	ppm	14	28	88	17
Se	ppm	-	-	<1	<1
Zn	ppm	22	177	20	21
Mn	ppm	49	15	56	20
Fe	ppm	57	396	451	48
Cu	ppm	12	14	7.7	6.9
Co	ppm	-	-	5.0	3.0
Mo	ppm	-	-	1.0	<1
Ni	ppm	-	-	9.0	4.5
W	ppm	-	-	4.0	3.3

<sup>a</sup> Ref de [1]



Pais	Contenido de humedad, (% en peso)	Poder calorífico (kJ/kg)
Argentina	45	5,442
Brasil	58	5,023
Canadá	27	10,465
Colombia	60	4,605
Estados Unidos	25	10,884
Francia	31	10,884
Inglaterra	31	8,372
Italia	45	5,442
Japón	18	11,721
México	50	6,279
Turquía	54	4,395

Figura 2.3 Valores del contenido de humedad y poder calorífico de los RSM generados en varios países. Fuente DGSU



### 2.3.1 Biodegradabilidad de la materia orgánica

El contenido de sólidos volátiles, obtenido por la ignición a 550°C, se emplea con frecuencia como un parámetro de la biodegradabilidad de la fracción orgánica de los RSM. Sin embargo, su uso puede incurrir en un error ya que algunos componentes de la fracción orgánica son altamente volátiles pero con baja biodegradabilidad (como el papel periódico y algunos residuos de jardinería).

De forma alterna, se puede emplear el contenido de lignina contenido en la materia orgánica para estimar la fracción biodegradable. Esto puede ser hecho usando la siguiente ecuación empírica:

$$FB = 0.83 - 0.028 CL \quad (2.2)$$

Donde: *FB* es la fracción biodegradable expresada sobre una base de sólidos volátiles y *CL* es el contenido de lignina de los sólidos volátiles expresado en porcentaje en peso. En la tabla 2.6 se cita la biodegradabilidad de varios componentes de la fracción orgánica de los RSM con base al contenido de lignina.

**Tabla 2.6 Estimación de la biodegradabilidad de la materia orgánica de los RSM con base al contenido de lignina <sup>a</sup>**

Componente	Sólidos volátiles % de los sólidos totales	Contenido de lignina % de los sólidos volátiles	Fracción Biodegradable <sup>b</sup>
Residuo alimenticio	7-15	0.4	0.82
Papel			
Periódico	94.0	21.9	0.22
Papel de oficina	96.4	0.4	0.82
Corrugado	94.0	12.9	0.47
Residuos de jardinería	50-90	4.1	0.72

<sup>a</sup> Ref. de [1]

<sup>b</sup> Obtenido a partir de la ecuación 2.2

Como puede se puede observar, los componentes con alto contenido de lignina son de alguna forma menos biodegradables que el resto de los demás componentes orgánicos. En la realidad, el periodo de biodegradación de un componente orgánico es muy variable. Por esta razón, y para fines prácticos, la materia orgánica presente en los RSM se cataloga como de rápida o lenta descomposición. Una estimación de la rapidez de biodegradación de los RSM generados en la ciudad de México es la siguiente:

Rápidamente biodegradable: 55% de los RSM en 6 años.

Moderadamente biodegradable: 33% de los RSM en 15 años.

Lentamente biodegradable: 12% de los RSM en 60 años.

Esta estimación fue hecha a partir de la composición de los RSM de esta ciudad <sup>[25]</sup> y es de suma importancia en el estudio de la generación de biogás y lixiviado en los rellenos sanitarios.

---

### **3. Manejo y disposición de los residuos sólidos municipales en la ciudad de México**

En este capítulo se muestra de forma genérica la situación actual de los RSM en materia de generación, tratamiento, aprovechamiento y disposición final, como una serie de factores importantes en la toma de decisiones dentro de un plan de manejo integral de RS.

El campo de los RSM es muy extenso y complejo, por ello, se cubren de forma breve los diversos factores económicos, políticos y sociales que afectan de forma particular el panorama de los RS en la ciudad de México. Estos factores afectan de forma directa las estrategias y planes para el manejo integral de los residuos. Así mismo, estos aspectos deben tenerse en cuenta en un ambiente donde los RS dejen de ser "basura" y adquieran un valor como materia prima con fines de aprovechamiento energético.

#### **3.1 Generación de RSM**

La cantidad de RSM generada depende principalmente de cuatro factores: el crecimiento de la población, los avances tecnológicos, el ingreso económico y los aspectos culturales. En la ciudad de México, son estas las principales causas que intervienen de forma directa en el problema de los RSM.

##### **3.1.1 Los RSM y la población**

El crecimiento demográfico influye en la generación global de residuos. El crecimiento explosivo de la ciudad de México implicó que en sólo 55 años (de 1930 a 1985) multiplicara diecisiete veces su población, lo cual provocó que se rebasaran sus límites administrativos y un enorme avance sobre los municipios conurbados situados, principalmente, al oeste, norte y este del Distrito Federal. Es por esta razón, que la generación de RSM en el Distrito Federal se ve afectada por una cierta población "flotante" proveniente de estos municipios pertenecientes al Estado de México, y que dentro de ambas entidades genera residuos producto de sus actividades diarias.

La región conurbada registró un acelerado crecimiento demográfico en el periodo 1950-1980 con tasas de crecimiento que alcanzaron el 13.30 % anual. Este crecimiento provocó que en los últimos diez años se incorporaran aproximadamente tres millones de personas según los censos de población y vivienda realizados en 1980 y 1990 respectivamente (ver tabla 3.1).

Las actividades industriales orientaron un avance de la población en los municipios de Naucalpan y Ecatepec, y las necesidades habitacionales indujeron el crecimiento de otros municipios como Nezahualcóyotl, Coacalco, Chimalhuacán y Huixquilucan. En los años setenta el mayor volumen de los flujos migratorios tuvo como destino preferencial los municipios conurbados. Del total de la población de los 30 principales municipios que

## Manejo y disposición de los RSM en la ciudad de México

componían el Estado de México en 1990 (6,853,300), el 47% se concentró en los municipios de Ecatepec, Naucalpan y Nezahualcóyotl con 3,260,800 habitantes.

Según el Censo General de 1990, en estos municipios se registran las mayores densidades de población de todo el país, que van de 651 a 20,260 habitantes/km<sup>2</sup>, densidad muy superior a la del Estado de México cuyo promedio es de 2,206, y la registrada en el Distrito Federal, de 5,494 hab/km<sup>2</sup> (Fuente: INEGI).

**Tabla 3.1 Población total por municipio y tasa de crecimiento anual (1980-1990)\***

Municipios	Censo de 1980	Censo de 1990	Diferencia	Tasa media de crecimiento anual
Atizapán	2,250	5,356	3,106	-
Coacalco	3,984	152,082	148,098	13.00
Cuautitlán Izcali	20,509	-	-	-
Chicoloapan	4,719	57,306	52,587	9.85
Chimalhuacán	76,740	242,317	165,577	13.30
Ecatepec	40,815	1,218,135	1,177,320	9.02
Huixquilucan	16,229	131,926	115,697	7.09
Naucalpan	95,828	786,551	700,723	3.67
Nezahualcóyotl	-	1,256,115	-	3.94
Nicolás Romero	29,617	184,134	154,517	7.01
Tecamac	11,971	123,218	111,247	9.28
Tultitlán	15,479	246,464	230,985	8.06
<b>Totales</b>	<b>308,141</b>	<b>4,452,192</b>	<b>2,888,206</b>	

Fuente: Datos del INEGI. XI Censos generales de Población y Vivienda, 1980 y 1990

Mientras el Distrito Federal creció en un 2.6% anual durante el periodo 1970-1990, el Estado de México lo hizo en un 5.94% y la población de los municipios conurbados en un promedio del 8.59%, alcanzando un pico del 13.30% en el municipio de Chimalhuacán.<sup>[6]</sup>

Las proyecciones al año 2000 indican que los municipios conurbados tendrán una población de 13 millones de habitantes, constituyendo así el 50% o más del total de los habitantes de la zona metropolitana de la ciudad de México. Según estimaciones demográficas, la migración hacia los municipios conurbados seguirá su proceso como hasta la fecha. Así, éstos recibirán, además de su propio crecimiento natural, el aporte de otras entidades y de la propia parte no metropolitana del Estado de México, el impacto del traslado a corta distancia de los residentes del Distrito Federal.

De esta forma, la producción de RSM en la zona metropolitana de la ciudad de México ha ido cambiando en las últimas cuatro décadas, pues mientras que en 1950 cada persona producía 0.37 kilogramos de residuos al día, en la actualidad se produce poco más de 1 kilogramo de RS. De hecho, se calcula que a este ritmo para el año 2000 la producción diaria de desechos aumentará de 19,000 a 25,000 toneladas diarias. Se piensa que el 54% de ellas se producirán dentro del Distrito Federal y el 46% restante en los 27 municipios conurbados del Estado de México.<sup>[11]</sup>

En 1998, el Distrito Federal contó con una población total de 8,567,135 habitantes, y una generación per cápita de 1.204 kg/día de RSM (ver figura 3.1 y tablas 3.2 y 3.3).

Se puede observar cómo el sector domiciliario es el que más influye dentro del total de residuos generados en el D.F. con casi 5 millones 300 mil toneladas diarias, conformando el 46% del total. De este porcentaje, el 21.8% es generado sólo en la Delegación Iztapalapa, con una población de aproximadamente 1 millón 700 mil habitantes (ver figura 3.1).

No es difícil darse cuenta del papel que juega la población en la generación de RS en una comunidad y el Distrito Federal junto con los municipios conurbados son el mejor ejemplo. Pero también, como se verá más adelante, existen otros factores de orden social, económico y cultural relacionados con la población que tienen que ver en la composición de la basura generada. Sin embargo, queda claro que la cantidad de RS generados es directamente proporcional al incremento de población, de hecho, los datos de generación diaria proporcionados por la Dirección General de Servicios Urbanos (DGSU) están basados en las cifras de población actual en el D.F.

Así, puede concluirse que la gravedad del problema radica en los grandes asentamientos urbanos, con un crecimiento anual alarmante y que dificultan cada vez más las tareas en materia de servicios sanitarios prestados por la comunidad aunado a un grave problema ambiental que crece al mismo ritmo.

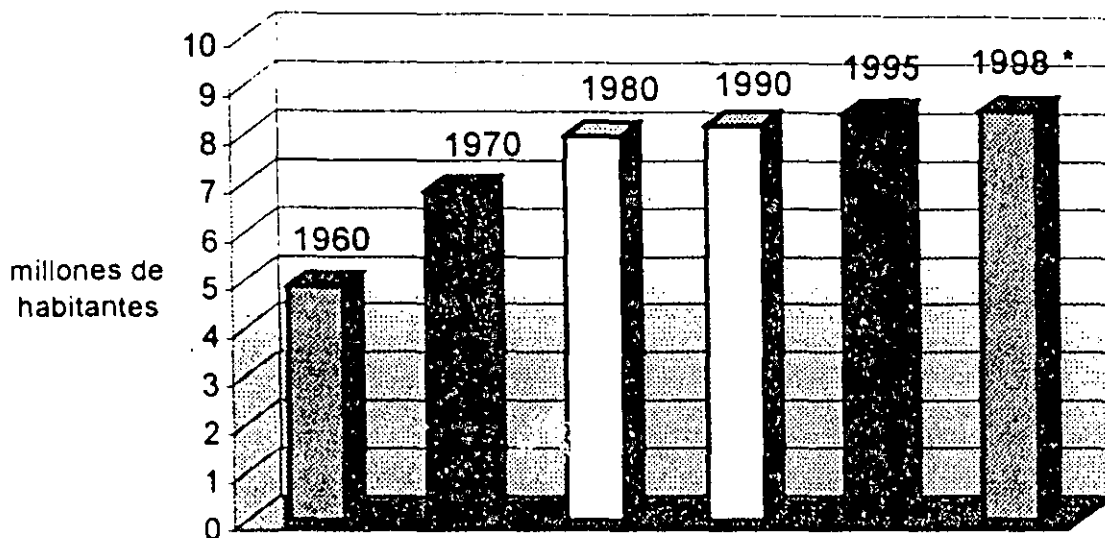
### **3.1.2 Avances tecnológicos que afectan las características de los RSM**

El incremento que ha experimentado la generación de RSM en los últimos años se caracteriza por una actividad económica concentrada en la producción y comercialización diversificada de bienes de consumo y un excesivo empleo de materiales de empaque y envases desechables.

El tipo de residuos ha ido cambiando con el paso de los años. Anteriormente casi toda era orgánica y compacta, ahora es muy voluminosa y parcialmente no degradable. Aún así se puede observar que el 80% de los RSM de la ciudad de México son de tipo orgánico.

De especial importancia son el incremento del uso de plásticos y el consumo de comidas congeladas, que reducen la cantidad de residuos de comida en las casas, pero incrementan las cantidades en las plantas agrícolas de procesamiento. El uso de comidas envasadas por ejemplo, casi no origina residuos excepto por los materiales de los envases.

Estos cambios constantes presentan una serie de problemas en el diseño de instalaciones de manejo RS porque las estructuras de ingeniería para su procesamiento implican inversiones tan grandes de capital que tienen que ser diseñadas para funcionar durante aproximadamente 25 años. Por esto es importante tener en cuenta las tendencias y los cambios tecnológicos que afectarán las características de los RSM en el futuro.



Delegación	Población					
	1960	1970	1980	1990	1995	1998*
Alvaro Obregón	220,011	456,709	570,384	642,753	676,930	688,923
Azcapotzalco	370,724	534,554	557,427	474,688	455,131	439,188
Benito Juárez	507,215	576,475	480,741	407,811	369,956	376,576
Coyoacán	169,811	339,446	541,328	640,066	653,489	703,085
Cuajimalpa	19,199	36,200	84,665	119,669	136,873	147,341
Cuauhtémoc	956,582	923,182	734,277	595,960	540,382	538,315
Gustavo A. Madero	753,966	1,234,376	1,384,431	1,268,068	1,256,913	1,214,626
Iztacalco	198,904	477,331	523,971	448,322	418,982	414,048
Iztapalapa	254,355	522,095	1,149,411	1,490,499	1,696,609	1,717,259
Magdalena Contreras	40,724	75,429	159,564	195,041	211,898	221,462
Miguel Hidalgo	611,921	605,560	501,334	406,868	364,398	367,495
Milpa Alta	24,379	33,694	47,417	63,654	81,102	75,866
Tláhuac	29,880	62,419	133,589	206,700	255,891	264,349
Tlalpan	61,195	130,719	328,800	484,866	552,516	600,703
Venustiano Carranza	581,629	749,483	634,340	519,628	485,623	471,241
Xochimilco	70,381	116,493	197,819	271,151	332,314	326,658
<b>Total</b>	<b>4.870.876</b>	<b>6.874.165</b>	<b>8.029.498</b>	<b>8.235.744</b>	<b>8.489.007</b>	<b>8.567.135</b>

Figura 3.1 Población del Distrito Federal 1960-1998. Fuente: Departamento del Distrito Federal (DDF).  
\* Dato de 1998. Fuente: DGSU

**Tabla 3.2 Generación unitaria de RSM por tipo de fuente \***

<b>Tipo de fuente generadora</b>	<b>Subclasificación</b>	<b>Generación unitaria de RS</b>
Domicilianos	Unifamiliar	0.605 kg/hab/día
	Plurfamiliar	0.772 kg/hab/día
Comercios	Tiendas de autoservicio	2.527 kg/empleado/día
	Tiendas departamentales	
	con restaurante	1.468 kg/empleado/día
	sin restaurante	0.766 kg/empleado/día
	Locales comerciales	2.875 kg/empleado/día
	Almacenamiento y abasto	
	mercados sobre ruedas	2.758 kg/local/día
	Frutas y legumbres	7.9 kg/local/día
	Abarrotes	1.03 kg/local/día
	Carnes	1.531 kg/local/día
	Preparación de alimentos	14.9 kg/local/día
	Diversos	0.803 kg/local/día
	Especializados	3.350 kg/local/día
	Comunes	2.143 kg/local/día
Servicios	Restaurantes y bares	0.850 kg/comensal/día
	Servicios públicos	0.420 kg/empleado/día
	Hoteles	1.035 kg/huésped/día
	Centros educativos	0.058 kg/alumno/turno
	Centros de espectáculos y recreación	
	Cines	0.012 kg/espectador/día
	Estadios	0.054 kg/espectador/evento
	Oficinas públicas y privadas	0.179 kg/empleado/turno
	Especiales	Unidades médicas
nivel 1		
con laboratorio		1.279 kg/consultorio/día
sin laboratorio		0.998 kg/consultorio/día
nivel 2		4.730 kg/cama/día
nivel 3		5.390 kg/cama/día
Laboratorios		0.580 kg/empleado/día
Veterinarias		1.700 kg/empleado/día
Terminal terrestre		2.418 kg/pasajero/día
Terminal aérea		5.177 kg/pasajero/día
Centros de readaptación social e instituciones militares		0.538 kg/interno/día
Áreas públicas	Espacios abiertos	0.163 kg/m <sup>2</sup> /día
	Vía pública	31.383 kg/km/día
Generación per cápita de RSM		1.204 kg/hab/día

\* Fuente DGSU

Tabla 3.3 Generación de RSM en el Distrito Federal en toneladas por día (1998) \*

Delegación	Domiciliarios	Comercios	Servicios	Especiales	Otros	Total	%
Alvaro Obregón	384.572	72.959	49.152	28.585	34.861	570.129	4.99
Azcapotzalco	244.375	119.197	82.780	14.914	28.055	489.321	4.28
Benito Juárez	203.142	196.574	143.612	30.536	39.814	613.678	5.37
Coyoacán	430.031	180.768	109.838	15.523	45.638	781.798	6.84
Cuajimalpa	86.616	27.275	9.623	4.093	7.239	134.846	1.18
Cuauhtémoc	317.638	422.726	370.249	45.382	64.543	1,220.538	10.68
Gustavo A. Madero	790.526	370.817	216.003	58.663	114.694	1,550.703	13.57
Iztacalco	216.783	106.231	77.915	15.791	27.697	444.417	3.89
Iztapalapa	1,152.803	496.948	211.308	29.782	103.088	1,993.929	17.45
Central de abastos		556.150				556.150	4.87
Magdalena Contreras	157.660	32.055	11.915	5.175	11.477	218.282	1.91
Miguel Hidalgo	211.816	160.705	138.769	34.956	100.857	647.103	5.66
Milpa Alta	43.251	11.767	9.758	3.716	4.217	72.709	0.64
Tláhuac	169.338	41.105	27.590	9.568	13.849	261.450	2.29
Tlalpan	394.829	134.448	73.382	14.570	64.376	681.605	5.97
Venustiano Carranza	286.894	299.811	161.427	44.689	47.390	840.211	7.35
Xochimilco	189.670	85.786	44.672	8.711	18.137	346.976	3.04
<b>Total</b>	<b>5,279.944</b>	<b>3,315.322</b>	<b>1,737.992</b>	<b>364.653</b>	<b>725.932</b>	<b>11,423.843</b>	<b>100.00</b>
%	46.22	29.02	15.21	3.19	6.35		

\*Fuente DGSU

### **3.1.3 Factores económicos que afectan la composición de los RSM**

Los avances tecnológicos no benefician de manera uniforme a la población. Estos afectan los patrones de consumo y por lo tanto en las características de sus residuos. Quizá lo más importante que hay que resaltar, es que en los países de menor ingreso económico así sucede, y ello se ve reflejado en las proporciones de materia orgánica e inorgánica existente en los RSM. En la tabla 1.4 se observan grandes diferencias en las cantidades de residuo alimenticio y en los materiales de empaque como cartón, papel y plásticos.

Por una parte, al ser mayor la actividad industrial, es de esperarse una fracción inorgánica mayor y viceversa. Por otro lado, los avances en términos de procesamiento y preparación de alimentos no han sido asimilados en los países con bajo ingreso, reflejándose en los hábitos de consumo de la población un alto desperdicio pero también un alto consumo. En la ciudad de México prevalece un alto porcentaje de residuo alimenticio (ver gráfica 1.2) y esto obedece a lo antes dicho.

También existe un mayor volumen en los niveles sociales altos, debido a la presencia frecuente de empaques y envolturas en los residuos que generan. Los estratos bajos, es decir, aquellos que perciben sólo el salario mínimo, producen 2.450 kg/día/hogar de residuos inorgánicos; mientras que los altos producen 2.864 kg/día/hogar, es decir, un 15% más.<sup>[10]</sup>

Globalmente, la generación de RSM más alta corresponde en mayo: parte a países desarrollados (ver figura 3.2). En la mayoría de estas comunidades el problema con sus altos índices de generación de residuos los ha llevado a desarrollar tecnologías para el reciclaje e incluso el uso de estos como material combustible como una opción para su eliminación y aprovechamiento energético.

### **3.1.4 Factores culturales**

Los factores culturales también influyen en el consumo, y por lo tanto en la generación de residuos. Tradicionalmente, la familia ha funcionado como una unidad productora de ciertos bienes como en el caso de los alimentos, sin embargo, en la actualidad ha pasado a ser una unidad de consumo que depende cada vez más de productos procesados industrialmente, y que con frecuencia presentan mayor disponibilidad.

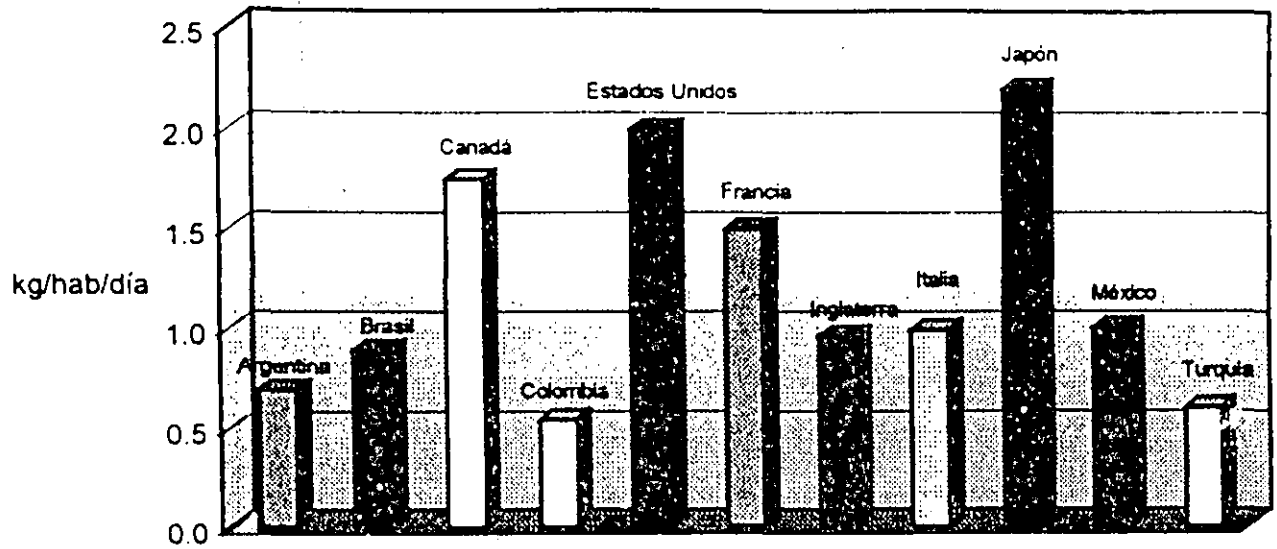
En este sentido, a pesar de que muchas familias siguen comprando productos frescos y a granel en los mercados y plazas, la publicidad de los medios de comunicación causa un gran impacto, ya que modifica los patrones de consumo generalizado.

## **3.2 Recolección**

La recolección se define como la acción de tomar los RSM de sus sitios de almacenamiento, para depositarlos dentro de los equipos destinados a conducirlos a los sitios de transferencia, tratamiento o disposición final.

La acción gubernamental se inicia con la recolección de los RS en el lugar donde se generan; ya sea en los domicilios, de donde proviene el 50% de las miles de toneladas diarias; en la vía pública el 7%; en las áreas industriales, comerciales, hospitales y otros que generan juntos el 43% (ver figura 1.1).





Pais	Generación per cápita kg/hab/día
Argentina	0.69
Brasil	0.89
Canadá	1.75
Colombia	0.54
Estados Unidos	2.00
Francia	1.50
Inglaterra	0.96
Italia	0.99
Japón	2.20
México	1.00
Turquía	0.60

Figura 3.2 Generación per cápita de RSM en varios países. Fuente DGSU

El proceso de recolección en la ciudad de México se realiza de la siguiente manera. En algunos casos, la basura se entrega al barrendero. Este la almacena en su carrito junto con la que ha ido colectando a lo largo del día. Posteriormente deposita la basura en un camión o carreta, ésta última aún utilizada en ciertas partes de la zona metropolitana de la ciudad de México. En otros casos, la basura se deposita directamente en el camión, sin pasar por el barrendero.

Dentro del camión trabajan varias personas: el chofer, los macheteros que son personas pagadas por el gobierno y su labor es ayudar a los choferes; y los voluntarios, que viven de las propinas y de lo que obtienen de la venta de los residuos útiles que encuentran. Ya que el camión se va llenando, los macheteros y voluntarios rompen las bolsas y comienzan a separar los subproductos. De esta separación ellos seleccionan algunos componentes como cartón, plástico, papel y metal ferroso, que posteriormente venden en centros de recolección cercanos a su ruta.

Después de que macheteros y voluntarios seleccionaron aproximadamente el 10% de la basura, los camiones de recolección llevan los desechos a las estaciones de transferencia, en donde todos los desperdicios se acumulan en un tractocamión. Ahí se vuelven a separar en sus distintos componentes. Los vehículos de transferencia generalmente transportan una carga útil aproximada de 20-25 toneladas de residuos y reciben un promedio de cinco a seis vehículos recolectores.

El propósito de los sistemas de transferencia es recibir los RS de vehículos recolectores para transferirlos a un vehículo de mayor capacidad y así ser transportados a la planta de tratamiento o al sitio de disposición final, estos grandes vehículos suelen ser camiones, vagones de ferrocarril o barcos. El sistema de transferencia para RSM se está volviendo una instalación necesaria en las grandes ciudades, debido al continuo alejamiento de los sitios de tratamiento y de disposición final.

Hoy en día existen en el Distrito Federal 13 estaciones de transferencia ubicadas en las delegaciones Alvaro Obregón, Azcapotzalco, Benito Juárez, Iztapalapa (Central de Abasto 1 y 2), Coyoacán, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Miguel Hidalgo, Milpa Alta, Tlalpan, Venustiano Carranza y Xochimilco (figura 3.3). Actualmente, se realiza la transferencia de alrededor de 9,000 toneladas por día de RSM en 267 tractocamiones que realizan cerca de 450 viajes en el mismo lapso de tiempo.

El Distrito Federal cuenta con 2,011 vehículos para realizar las tareas de recolección de residuos con una capacidad de recolección del 85 al 90% de las 11,420 toneladas generadas diariamente. Diariamente, se hace el barrido de casi 600 kilómetros de vialidades primarias.

La DGSU realiza de manera especializada la recolección de residuos en unidades médicas del Gobierno del D.F, recolectando alrededor de 9 toneladas al día, de las cuales el 30% corresponden a residuos biológico-infecciosos que reciben tratamiento.

### **3.3 Disposición final**

La disposición segura y confiable de los RSM a largo plazo, es un factor importante dentro de la gestión integral de residuos. Los rechazos de los RS son componentes de los residuos que no se reciclan, que quedan después del procesamiento en una instalación

para la recuperación de materiales, o que quedan después de la recuperación de productos de conversión y/o energía.

En la ciudad de México los RSM tienen diferentes destinos una vez que salen de las estaciones de transferencia. Los más comunes son las plantas de selección y el relleno sanitario.

### **3.3.1 Relleno sanitario**

Históricamente, el relleno sanitario ha sido el método más económico y ambientalmente más aceptable para la disposición de RS en muchos países. Incluso con la implantación de la reducción de residuos, del reciclaje y de las tecnologías de transformación, la evacuación en rellenos sanitarios de los rechazos procedentes del tratamiento de los RS sigue siendo un componente importante dentro de una estrategia para el manejo de los RSM.

Los rellenos sanitarios son instalaciones físicas utilizadas para depositar los RS y sus rechazos en tierra. Actualmente, este concepto se refiere a una instalación ingenieril, considerada como una obra planeada y ejecutada técnicamente para la disposición de residuos, diseñada y explotada para minimizar los impactos ambientales y sobre la salud pública. La operación de un relleno sanitario incluye la supervisión del flujo de residuos entrante, la colocación y compactación de los residuos y la implantación de instalaciones para el control y la supervisión ambiental.

El término celda se emplea para describir el volumen de material depositado durante un periodo de explotación, normalmente un día (celda diaria). Una celda incluye los RS depositados y el material de recubrimiento. El recubrimiento diario normalmente consiste en 15 o 30 cm de suelo natural o materiales alternativos como el tepetate, adicionándose una cobertura final de 40 a 60 cm de espesor de material terreo de baja permeabilidad y con alto contenido de arcilla (bentonita), la cual se compacta (ver figura 3.1).

El nivel es una capa completa de celdas sobre una zona activa del depósito. Normalmente, los depósitos se conforman en una serie de niveles. La berma o terraza se utiliza frecuentemente cuando la altura del depósito excede de 125 cm a 2 m. Las bermas se utilizan para mantener la estabilidad de la pendiente del depósito, para la localización de canales para el drenaje de agua superficial y para la localización de tuberías destinadas para la recuperación de biogás.

Una capa final de recubrimiento se aplica a toda la superficie después de concluir todas las operaciones de depósito. El recubrimiento final normalmente consiste en múltiples capas de tierra y/o materiales como geomembranas diseñadas para facilitar el drenaje superficial, interceptar aguas filtrantes y soportar la vegetación superficial.

El líquido que se acumula en el fondo se conoce como lixiviado. En los depósitos profundos, frecuentemente se recoge el lixiviado en puntos intermedios (ver figura 3.2).

Los objetivos del recubrimiento diario son el controlar el vuelo de materiales residuales; prevenir la entrada o salida de vectores sanitarios tales como ratas, moscas y otros; y controlar durante la operación la entrada de agua al depósito.

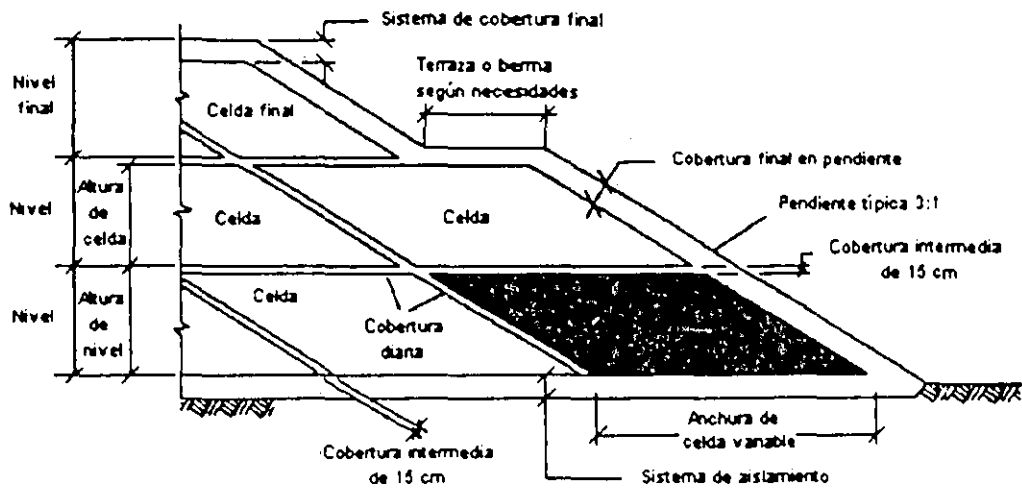


Figura 3.1 Vista en sección de un relleno sanitario. [12]

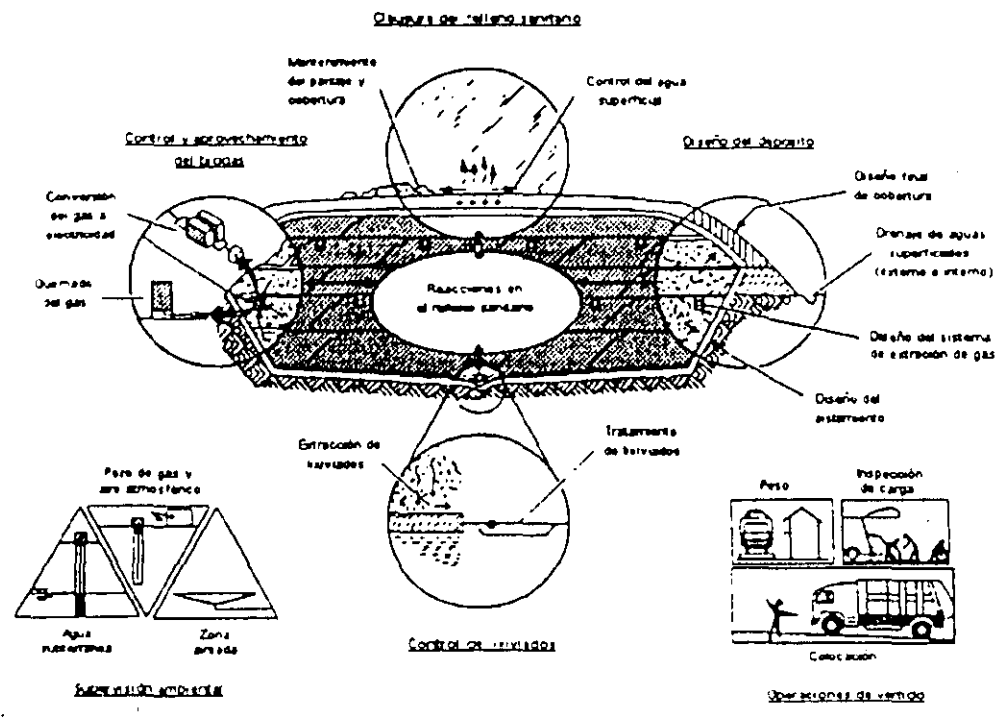


Figura 3.2 Esquema de operaciones y procesos en un relleno sanitario. [12]

Este líquido es el resultado de la precipitación, el escurrimiento no controlado y del agua de irrigación que entra en el depósito. También puede estar compuesto por agua contenida inicialmente en los residuos, así como la procedente de aguas subterráneas que se infiltran. El lixiviado contiene diversos constituyentes derivados de la solubilización de los materiales depositados y de los productos de reacciones químicas y bioquímicas que se producen dentro del relleno.

En la tabla 3.4 se presenta la composición típica del lixiviado. Hay que resaltar que la composición química variará mucho según la antigüedad del relleno sanitario y la historia previa al momento de muestreo.

**Tabla 3.4 Composición típica de los lixiviados procedentes de rellenos sanitarios nuevos y maduros <sup>a</sup>**

Constituyente	Valor, mg/l <sup>b</sup>		
	Depósito nuevo (menos de 2 años)		Depósito Maduro (mayor de 10 años)
	Rango <sup>c</sup>	Típico <sup>d</sup>	
DBO <sub>5</sub> (demanda bioquímica de oxígeno de 5 días)	2,000-30,000	10,000	100-200
COT (carbono orgánico total)	1,500-20,000	6,000	80-160
DQO (demanda química de oxígeno)	3,000-60,000	18,000	100-500
Sólidos suspendidos totales	200-2,000	500	100-400
Nitrógeno orgánico	10-800	200	80-120
Nitrato	5-40	25	5-10
Fósforo total	5-100	30	5-10
Ortofosfato	4-80	20	4-8
Alcalinidad como CaCO <sub>3</sub>	1,000-10,000	3,000	200-1,000
PH	4.5-7.5	6	6.6-7.5
Dureza total como CaCO <sub>3</sub>	300-10,000	3,500	200-500
Calcio	200-3,000	1,000	100-400
Magnesio	50-1,500	250	50-200
Potasio	200-1,000	300	50-400
Sodio	200-2,500	500	100-200
Cloro	200-3,000	500	100-400
Sulfatos	50-1,000	300	20-50
Hierro total	50-1,200	60	20-200

<sup>a</sup> Ref. de [12]

<sup>b</sup> Excepto el pH, que no tiene unidades

<sup>c</sup> Rango representativo de valores. Se han presentado en la literatura del tema valores máximos más altos para algunos de los constituyentes

<sup>d</sup> Los valores típicos para los rellenos sanitarios nuevos variarán según el estado metabólico del depósito

La biodegradabilidad del lixiviado variará también con el tiempo. Se pueden supervisar los cambios en la biodegradabilidad del lixiviado mediante el control de la relación DBO<sub>5</sub>/DQO. Inicialmente, las relaciones estarán en el rango de 0.5 o más. Las relaciones en el rango de 0.4 a 0.6 se toman como un indicador de que la materia orgánica en los lixiviados es fácilmente biodegradable. En los rellenos antiguos, la relación DBO<sub>5</sub>/DQO

está a menudo en el rango de 0.05 a 0.2. La relación cae porque los lixiviados procedentes de rellenos sanitarios antiguos normalmente contienen ácidos húmicos y fúlvicos, que no son fácilmente biodegradables.

Para determinar la ubicación de un relleno sanitario es necesario realizar estudios previos para identificar las características geológicas, topográficas, geotécnicas, geohidrológicas e hidrológicas del sitio, así como de la zona en la que se encuentra ubicado. Lo anterior está reglamentado en la Norma Oficial Mexicana NOM-083-ECOL-1996 que establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a rellenos sanitarios para la disposición final de los RSM.

En la ciudad de México existen tres rellenos sanitarios:

- **Bordo Poniente**

Ubicado al noreste de la ciudad, inició su operación la primera etapa en 1985. Actualmente se encuentra en su cuarta etapa, la cual recibe de 8,000 a 8,500 toneladas diarias de RSM al día. Cuenta con una planta para el tratamiento lixiviados generados en las etapas I y II, ubicada en la Zona Federal de lo que era el Lago de Texcoco, ocupando un área de 1,577 m<sup>2</sup> aproximadamente. La planta está diseñada para tratar un caudal de 3 litros por segundo de lixiviado. El tratamiento se efectúa en dos módulos de 1.5 l/s cada uno, mediante un proceso fisicoquímico.

- **Santa Catarina**

Junto con la cuarta etapa de Bordo Poniente, son los únicos en operación en el Distrito Federal. Inició como tiradero en 1982, y en 1986 fue tomado por el gobierno. Consta de 34 hectáreas que reciben de 2000 a 2500 toneladas por día. Se estima que cumplirá su vida útil en el año 2000.

- **Prados de la Montaña**

Localizado en la parte alta de Lomas de Santa Fe, entró en operación en 1986 y fue clausurado en julio de 1994. Su extensión es de 24 hectáreas bajo las cuales se encuentran más de 5,600,000 toneladas de RSM.

### **3.3.2 Tiraderos a cielo abierto**

Los tiraderos a cielo abierto han sido la forma tradicional de depositar los RS de las ciudades. En la zona metropolitana de la ciudad de México han existido muchos sitios de este tipo. Actualmente ya no opera ninguno de manera formal. En el Estado de México es donde aún existen 15 tiraderos en operación.

De los tiraderos que operaban en la ciudad de México, ya se encuentran clausurados:

- Alameda Poniente (1986).
- Santa Cruz Meyehualco (1983).
- San Lorenzo Tezonco I y II.
- Parque Tlalpan.
- Tláhuac.

Cuando los RS se acumulan en lugares como éstos sin recibir tratamiento alguno, se presenta la proliferación de insectos y roedores, representando un peligro para la salud pública, ya que en estos se vierten agentes patógenos provenientes tanto de hospitales como de los rastros.

Además, cuando los tiraderos al aire libre se ubican en las orillas de ríos, arroyos y lagunas, se producen lixiviados que escurren hacia los cuerpos de agua. Por otra parte, el suelo que se utiliza queda prácticamente inservible debido a que se destruye la capa vegetal que lo cubría originalmente, éste se erosiona y crea polvo saturado de microorganismos y partículas nocivas que el viento puede transportar. El resultado final es un suelo deteriorado que es muy difícil de restaurar.

Los tiraderos al aire libre también son una fuente de contaminación del aire, no sólo por las partículas que transporta el viento, sino también porque con frecuencia suelen producirse incendios, debido a que la temperatura de los residuos en descomposición se eleva entre los 40 y 60 °C. Se producen grandes cantidades de metano que ocasionan fuegos prolongados y recurrentes.

Los malos olores son otro problema constante en los tiraderos. Esto se debe a que la fermentación de los residuos se desarrolla en forma descontrolada y lenta, lo cual provoca la formación de compuestos malolientes que pueden percibirse a gran distancia.

### **3.4 Sistemas de tratamiento**

Cada uno de los subproductos que conforman los RSM posee algún valor, puede ser reciclado, comercializado o reconstituido, además de tener de forma inherente un valor como fuente de energía bajo alguno de los procesos de recuperación desarrollados actualmente.

En la ciudad de México, algunos de estos subproductos son aprovechados para otras actividades que, además de minimizar la carga de materiales en la disposición final, constituyen una fuente para el mejoramiento de suelos dañados y el reuso de materiales que son materia prima para la elaboración de nuevos productos en la industria.

#### **3.4.1 Plantas de selección de subproductos**

Aproximadamente el 34% de los subproductos de los RSM son reciclables. Las plantas de selección de subproductos tienen la función de separar y preparar para su comercialización aquellos materiales dentro de los RS que tengan un valor ya sea para fines de reuso o reciclaje. Esta actividad ha reducido los volúmenes de residuos a disponer en los rellenos sanitarios.

El gobierno del Distrito Federal cuenta con tres plantas de selección de materiales, con una capacidad instalada para procesar 5,500 toneladas al día en conjunto. Esta infraestructura permite recuperar aquellos materiales útiles contenidos en los RS, que pueden ser hasta entre el 10 y el 13% del total que ingresa a las plantas.

Las tres plantas en operación son: la de Santa Catarina, la cual consta de un solo módulo; la de San Juan de Aragón, que consta de dos módulos, uno rehabilitado y otro nuevo con procesos similares; y la de Bordo Poniente, ubicada en el sitio de disposición final con el mismo nombre.

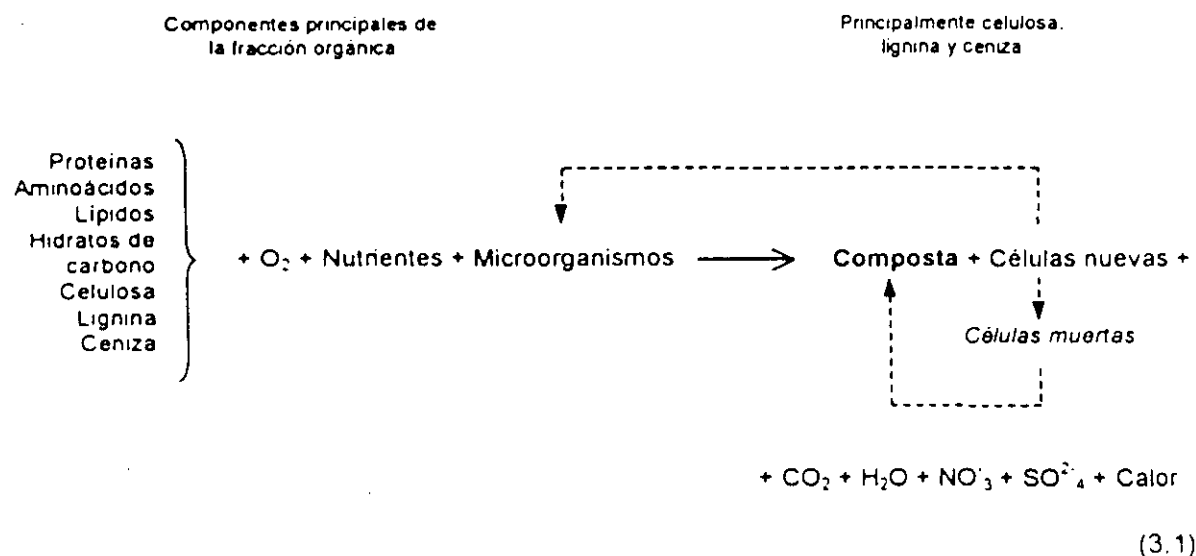
Los materiales recuperados son comercializados dentro y fuera del país para ser transformados en nuevos productos. Las plantas son operadas por personas que antes se dedicaban a la pepena y el mantenimiento de las instalaciones lo hace el gobierno de la ciudad.

El proceso de selección y aprovechamiento de subproductos se lleva a cabo como se muestra en la figura 3.3.

### 3.4.2 Composteo

Con la excepción de los componentes plásticos, de hule y cuero, la fracción orgánica de la mayoría de los RSM se puede considerar compuesta por proteínas, aminoácidos, lípidos, hidratos de carbono, celulosa, lignina y ceniza. Si se someten estos materiales orgánicos a una descomposición aerobia microbacteriana, el producto final después de cesar casi toda la actividad microbiológica es un material de humus comúnmente conocido como composta.

Este proceso se puede representar de la forma siguiente:



Como se muestra en esta ecuación, las nuevas células que se producen se convierten en parte de la biomasa activa implicada en la conversión de materia orgánica, que cuando mueren, forman parte de la composta. Los objetivos del composteo son:

- El transformar materiales orgánicos biodegradables en un material biológicamente estable y reducir el volumen original de los residuos.



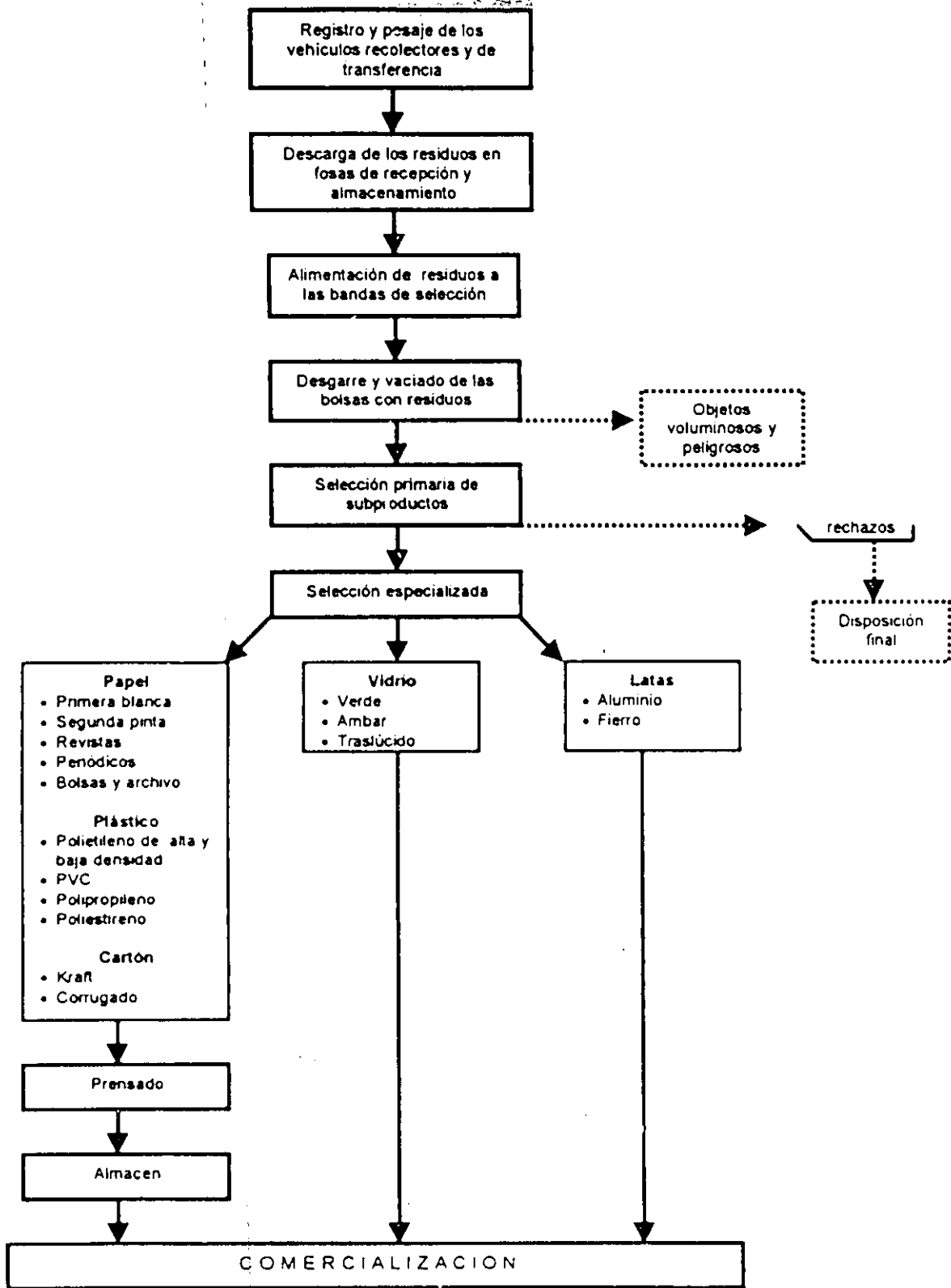


Figura 3.3 Diagrama del proceso de una planta de selección de subproductos.  
Fuente DGSU

- Destruir patógenos, huevos de insectos y otros organismos indeseables que puedan estar presentes en los residuos.
- Retener el máximo contenido nutricional (nitrógeno, fósforo y potasio).
- Elaborar un producto que se pueda utilizar para soportar el crecimiento de plantas y como abono natural.

La mayoría de las operaciones modernas de composteo están constituidas por tres etapas, como se muestra en la figura 3.4:

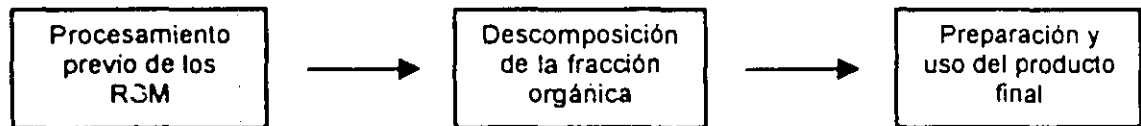


Figura 3.4 Etapas del proceso de composteo moderno

El proceso puede llevarse a cabo tanto a nivel industrial como casero. El composteo a nivel industrial es un proceso que requiere de muchos cuidados y de una considerable inversión económica. Sin embargo, en lo doméstico, es un proceso sencillo que no requiere de grandes inversiones.<sup>[13]</sup>

Desde el mes de Octubre de 1996, en la Planta de Composteo de la Alameda Oriente, se procesan por molienda y fermentación aeróbica, alrededor de 40 toneladas al día de residuos de jardinería provenientes del mantenimiento de parques y jardines públicos, bajo los programas de áreas verdes y liberación de cables a cargo de la DGSU. Después de tres meses de fermentación, el composteo final es usado en los jardines y parques públicos donde el suelo presenta problemas de deterioro y agotamiento de nutrientes.<sup>[20]</sup>

Este tipo de reciclaje biológico por degradación aeróbica, según la DGSU, ha ahorrado hasta la fecha 18,000 m<sup>3</sup> de capacidad en el relleno sanitario, evitándose la generación de 200,000 m<sup>3</sup> de biogas y 400,000 litros de lixiviado.

### 3.5 Aspectos sociales y políticos

#### 3.5.1 La pepena

Una vez que los RSM llegaban a un tiradero a cielo abierto, unas personas separaban una vez más el papel y cartón, los huesos, las láminas, el fierro, el vidrio, el plástico, las cosas rotas y la comida. Estas personas constituyen el sector informal y son los llamados "pepenadores".

Se trata de un grupo de particular de trabajadores, constituido en su mayoría por mujeres, ancianos y niños, que laboran en condiciones deplorables y sin ningún tipo de protección legal o seguridad social. La mayoría de ellos trabaja y vive en los tiraderos percibiendo muy bajos ingresos por la venta de la basura que seleccionan. Los pepenadores integran el único grupo de trabajadores que, dentro del circuito de la gestión de RS, realiza una

actividad válida con los materiales que nadie desea ver. Los materiales que seleccionan los pepenadores los compran los "pesadores", los cuales venden estos a intermediarios o directamente a empresas con diversos fines, uno de ellos es el reciclaje. Esta situación hace que la esperanza de vida de los pepenadores sea visiblemente más baja que la del resto de la población. En 1994, se estimaba que de 10,000 a 16,000 personas se dedicaban a la tarea de pepenar en los tiraderos del Distrito Federal y de la zona metropolitana de la ciudad de México.<sup>[6]</sup>

La pepena es aún una actividad no erradicada, sin embargo en Bordo Poniente con la apertura de la Planta de Selección, la gente que antes separaba los materiales una vez depositados a cielo abierto ahora trabaja con un horario fijo, un salario y prestaciones como servicio médico y educación primaria.

### 3.5.2 El Programa Metropolitano de gestión de RS

Una sucesión de siniestros entre los que ocurrieron, sólo en 1991, trece incendios provocados por los gases provenientes del depósito incontrolado de los desperdicios y la presencia de numerosos damnificados, fueron el motivo que obligó a los municipios conurbados a solicitar la ayuda de la antes Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE) del Estado de México. En consecuencia, en 1992 se firmó el Programa Metropolitano de gestión de los RS destinado a sanear la crítica situación en que se encontraban operando los tiraderos de los municipios conurbados al Distrito Federal.

El Programa Metropolitano planteó un esfuerzo del gobierno por lograr el manejo integral de los RS de los municipios conurbados, a modo de reducir los riesgos de contaminación del suelo, el aire y el agua. Se mencionó en sus metas la clausura de trece tiraderos a cielo abierto y la habilitación de 250 hectáreas de áreas verdes en sitios clausurados, siete rellenos sanitarios metropolitanos y cuatro estaciones de transferencia en el Estado de México<sup>[6]</sup>. En el mismo informe se argumentó que se instrumentaban nuevos sistemas de separación, reciclaje, composteo e industrialización de los residuos.

La labor que se llevó a cabo sólo consistió en la transformación de los depósitos de basura en tiraderos controlados o cuasi-rellenos. Un cuasi-relleno es un modo de operación frecuente en el D.F. Consiste en un tiradero al que convierten, aparentemente, en un relleno sanitario, pero carece de las exigencias básicas para funcionar en forma adecuada: un estudio detallado del sitio de la ubicación, la instalación de una capa protectora impermeabilizante en el fondo del depósito y la instalación de un sistema de recolección de los lixiviados (Bordo Poniente en su etapa inicial) y de control estricto de los desechos que ingresan, para que los residuos industriales no tengan cabida bajo ninguna circunstancia. Por otro lado, si se realizaron obras primordiales como la instalación de sistemas de drenaje y de captación de biogas, sin embargo no se alcanzaron los objetivos mencionados en el informe oficial.<sup>[6]</sup>

Por las metas previstas, el Programa Metropolitano era un plan a largo plazo que terminó el día 28 de febrero de 1994 por orden del Estado de México a tan solo dos años de haber iniciado. No se construyó ninguno de los trece tiraderos ni las estaciones de transferencia; no se crearon zonas verdes ni se puso en marcha una política integral para los RSM. El gobierno estatal argumentó que los municipios debían de ocuparse de la gestión mientras se ponía en marcha otro plan, más ambicioso aún, para el manejo de los RS a nivel estatal.<sup>[6]</sup>

### **3.5.3 Programas en operación**

En los RSM de la ciudad de México existe una gran cantidad de materiales que poseen aún un valor comercial al ser reciclados y transformados en nuevos productos útiles. La eficiencia en la recuperación de estos materiales depende de su calidad, es decir, si se encuentra muy húmedo, contaminado por otros materiales, etc. Aquellos materiales que se encuentren en este estado pierden su valor para ser comercializados como materia prima y por ende tendrán que ir al relleno sanitario.

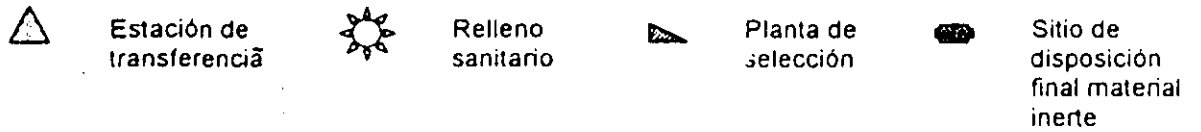
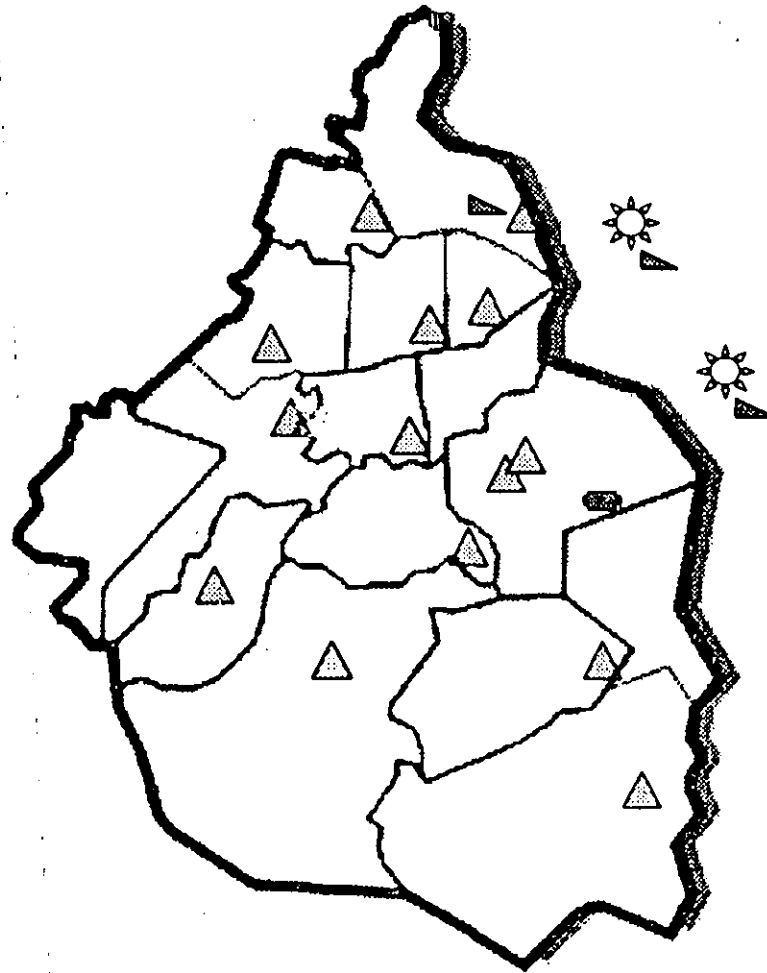
Al separar los subproductos que se generan diariamente los materiales reciclables, los de tipo orgánico y los de tipo sanitario pueden ser tratados según sus características con mayor facilidad. De esta manera, la contaminación por materia orgánica en los plásticos, el cartón y otros se minimiza y se puede tener un material apto para su reciclaje. Separando, también se facilitan las labores de selección en las plantas de recuperación de materiales.

La separación de los RSM desde su origen es una actividad adoptada en la mayor parte de los países industrializados donde los programas de reciclaje son muy importantes y los impuestos que se pagan son altos.

En la ciudad de México se puso en marcha una prueba piloto, que consiste en un programa que promueve la separación de los RS desde la fuente misma donde se generan, utilizando tres recipientes o bolsas de distinto color de acuerdo con la siguiente clasificación:

- Verde: para los residuos orgánicos.
- Gris: para los residuos reciclables.
- Naranja: para los residuos de manejo sanitario.

El programa opera actualmente en 13 sitios, que incluyen oficinas públicas, unidades habitacionales y escuelas. La población participante suma 8,500 personas, y los niveles de eficiencia en la separación de los residuos registran un 18%.



**Figura 3.5** Infraestructura actual del sistema de manejo, aprovechamiento y disposición final de RS en la ciudad de México. Fuente: DGSU

---

## **4. Recuperación de energía por procesos térmicos**

Los procesos térmicos aplicados a los RSM, empleados para su reducción en volumen y la recuperación de energía, son actualmente un elemento clave dentro de los sistemas de manejo integral de RS.

La combustión juega un papel muy importante como proceso fundamental de la incineración. De manera alterna existen otros tratamientos en donde existe una combustión parcial o desintegración térmica. Unas de las principales diferencias entre estos procesos son sus emisiones al ambiente, disponibilidad en el mercado y sus capacidades para procesar los RS por unidad de tiempo.

Lo anterior plantea varias formas de realizar la recuperación de energía, la cual se puede obtener en forma de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos en los procesos alternos a la incineración como la pirólisis, termólisis y gasificación. La incineración es la tecnología más empleada globalmente debido a su amplia difusión y a la alta reducción en volumen. Gran parte de las plantas de incineración cuentan con recuperación de energía, la cual puede ser en forma de vapor, agua caliente y electricidad.

### **4.1 Incineración**

Las plantas de incineración forman parte de la solución a nivel mundial al problema de disposición final de los RSM. Estas plantas, junto con las actividades de reciclaje, la fabricación de composta y el uso de rellenos sanitarios, se perfilan como una solución a largo plazo. Todo esto, siempre y cuando los procesos involucrados operen de manera aceptable en términos de materia ambiental.

La incineración de RSM se puede definir como un proceso térmico mediante oxidación química llevado a cabo en plantas diseñadas para obtener una combustión eficiente y completa.

Específicamente, las razones por las cuales se incineran los RSM son:

1. Para su reducción en volumen, lo cual ahorra espacios en los rellenos sanitarios o evita su dispersión en tiraderos.
2. Para destruir ciertos residuos de carácter peligroso, como sustancias químicas y agentes patógenos.
3. Y finalmente, como una alternativa para la recuperación de energía.

A finales del siglo XIX ya se incineraban RSM en Europa y se usaba la energía producto de la combustión para producir vapor y electricidad. En los últimos años la aceptación de este tipo de plantas ha sido lenta y esto se debe, en primer lugar, a los bajos costos de disposición final en rellenos sanitarios en contraste con los altos costos de inversión y operación de estas instalaciones, la amplia disponibilidad de otros combustibles como carbón, petróleo y gas natural, así como el relativo bajo costo actual de la electricidad.

La incineración resuelve de manera parcial la necesidad de contar con grandes espacios destinados para la disposición final rellenos sanitarios, en sí, ésta práctica no se le cataloga como un método de disposición final ya que también genera residuos. Lo que es un hecho es que la incineración reduce de un 85 a un 95% en volumen los residuos de naturaleza combustible.

Debido a los altos costos de inversión (arriba de 90,000 USD por tonelada de capacidad por día y alrededor de 4,750 USD/kWe para la generación de electricidad) y a una necesidad cada vez mayor de aprovechar la energía contenida en la biomasa, la mayoría de los incineradores están diseñados para recuperar la energía liberada por la combustión. Con este recurso se puede producir agua caliente para calefacción, vapor para procesos industriales y energía eléctrica. Los ingresos generados por la venta de vapor o electricidad, pueden subsanar parcialmente los costos de inversión y operación de estas plantas.

#### 4.1.1 Etapas del proceso de incineración

El proceso de la combustión de los RSM se lleva a cabo en una serie de etapas, las cuales se muestran resumidas en la figura 4.1.

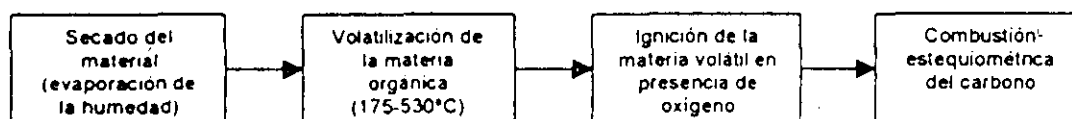


Figura 4.1 Diagrama del proceso de combustión de RSM en plantas de incineración. [4]

Las operaciones básicas involucradas en la incineración con recuperación de energía se muestran en la figura 4.2, y comienzan con la llegada de los camiones recolectores (1) a las fosas de almacenamiento de la planta (2). Las dimensiones están en función de la capacidad de la planta y del número de camiones que pueden descargar simultáneamente.

La grúa viajera superior (3) se encarga de conducir los residuos a la tolva de alimentación (4) del incinerador (5), la cual dirige la corriente de materiales al mismo. El operador de esta grúa puede seleccionar la mezcla de materiales apropiada con el fin de obtener un contenido de humedad uniforme. La grúa también separa aquellos elementos no combustibles o de gran tamaño. Finalmente, los RSM provenientes de la tolva de alimentación caen a las parrillas del hogar (6), en donde inicia la combustión. El aire necesario se introduce por la parte inferior de las parrillas por medio de ventiladores de tiro inducido, o por la parte superior, con el fin de regular la carga de incineración y la temperatura de la cámara de combustión.

Debido a la naturaleza térmica inestable de la mayoría de los residuos orgánicos, se liberan varios tipos de gases a medida que el proceso se lleva a cabo en la cámara de combustión (7). Estos gases, junto con pequeñas partículas orgánicas, alcanzan su temperatura de ignición arriba de los 870°C.

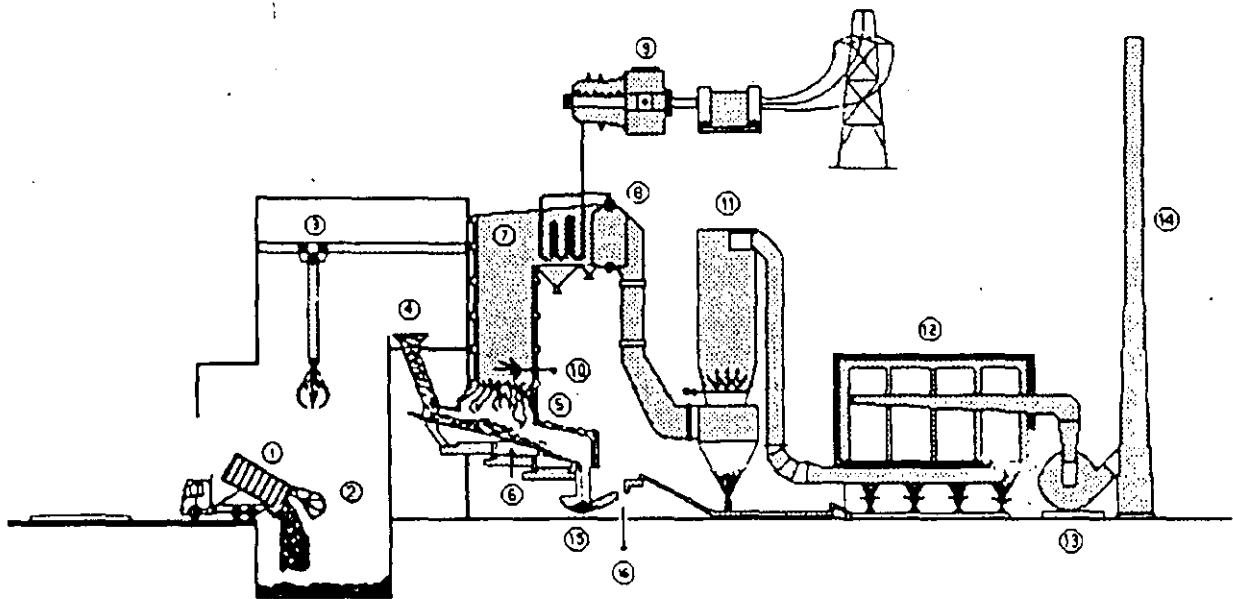


Figura 4.2 Esquema típico de un incinerador de RSM con generación de energía eléctrica. [1]

Una parte del calor liberado por la combustión se encuentra en los productos de la combustión, otra se intercambia por convección, conducción y radiación a las paredes del hogar, al material combustible que ingresa y a la materia residual (cenizas). En los sistemas con paredes de tubos de agua, el calor de los gases producto de la combustión se recupera por medio de paredes de tubos de agua y con una caldera de recuperación (8). Esta caldera produce vapor, el cual al pasar por una turbina (9) se produce energía eléctrica.

El equipo de control de emisiones puede incluir la inyección de amoníaco (10) para el control de los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), un depurador seco para el control del dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y de los gases ácidos (11) y una casa de bolsas (filtros) para la remoción de partículas (12). Para asegurar flujos de aire adecuados en la cámara de combustión y compensar las pérdidas de carga a través del equipo para el control de emisiones, generalmente se emplea un ventilador de tiro inducido (13).

Los productos finales de la combustión son gases calientes y ceniza. Los gases, una vez hechos pasar por el equipo de control de contaminantes, salen por la chimenea (14) para su dispersión en la atmósfera. Las cenizas y los materiales parcialmente incinerados caen de las parrillas a un depósito localizado por debajo de estas (15) en donde son enfriados por agua. La ceniza volátil proveniente del depurador seco y de las casas de bolsas se mezcla con las cenizas del hogar para ser llevadas a plantas de tratamiento (16).

#### 4.1.2 Parámetros importantes de la combustión de RSM

**Poder calorífico.** La combustión de los RSM solo produce alrededor del 25% de la energía que se obtiene al quemar combustibles fósiles. Como se ha tratado en el Capítulo 2, el poder calorífico de los RSM varía según su origen y composición.



No obstante, se ha determinado que un material combustible con un poder calorífico superior (mayor a los 5000 kJ/kg), bajo contenido de humedad (menor al 50%) y un bajo contenido de ceniza (menor al 60%), puede ser empleado sin la necesidad de ser mezclado con un combustible auxiliar. <sup>(3)</sup>

La siguiente ecuación empírica estima el poder calorífico superior de los RSM a partir de su composición química elemental:

$$HHV = 0.339[C] + 1.44 [H] - 0.139 [O] + 0.105 [S] \quad (4.1)$$

en donde *HHV* es el poder calorífico superior expresado en MJ/kg, y [C], [H], [O] y [S], son los porcentajes en peso de carbono, hidrógeno, oxígeno y azufre, respectivamente. Un modelo más completo lo presentó Wilson en 1972, en el cual se calcula el poder calorífico superior a partir de una ecuación desarrollada con principios de termodinámica. Esta ecuación, considera la formación de agua y los dos tipos de carbono presentes:

$$HHV = 0.3279 [C_o] + 1.504 [H] - 0.1383 [O] - 0.1484 [C_i] + 0.09262 [S] + 0.02419 [N] \quad (4.2)$$

Donde: [C<sub>o</sub>] es el porcentaje en peso del carbono orgánico, [C<sub>i</sub>] el porcentaje en peso del carbono inorgánico (usualmente 1.2% del carbono total) y [N] es el porcentaje en peso de nitrógeno.

La ecuación 4.3, desarrollada por Khan y Abu-Ghararah en 1991, considera los componentes primarios combustibles de los RSM, tales como papel, corrugado, plásticos y residuos alimenticio:

$$HHV = 0.0535 [F + 3.6 CP] + 0.372 PLR \quad (4.3)$$

donde *F* es el porcentaje en masa de residuos alimenticio, *CP* el porcentaje en masa de corrugado y papel, y *PLR* el porcentaje en masa de plásticos, hule y cuero en una mezcla de residuos en base seca.

Estas ecuaciones son aproximaciones para obtener el poder calorífico de los RSM en la práctica. Para mayores detalles, en la tabla 2.2 se encuentra enlistado el poder calorífico de los diversos subproductos.

**Contenido de humedad.** El contenido de humedad de los RSM afecta el contenido energético de los mismos. A medida que este aumenta, menor es la cantidad de energía disponible por unidad de masa. Esto se debe a que durante la combustión, se requiere de una cantidad de energía adicional que se pierde en el calentamiento y evaporación del agua contenida (el calor de vaporización del agua es de 2257 kJ/kg).

Para considerar los efectos de la humedad, se suele hablar del poder calorífico neto o inferior. Este valor representa la energía que puede ser realmente obtenida de la combustión de los materiales combustibles.

El poder calorífico inferior puede ser calculado por la ecuación 4.4:

$$LHV = HHV - 0.0244 [W + 9H] \quad (4.4)$$

Donde: *LHV* es el poder calorífico expresado en MJ/kg, *W* el porcentaje en masa de humedad y *H* el porcentaje en peso de hidrógeno en los residuos en base seca.

**Contenido de ceniza.** El contenido de ceniza de los RSM expresa la materia residual dada la combustión de los mismos. Las plantas de incineración producen tres tipos de residuos: ceniza pesada, ceniza volátil y los residuos producto de la limpieza de los gases de combustión. La ceniza pesada es aquella que se deposita en la cámara de combustión, siendo el residuo más abundante. La ceniza volátil es aquella constituida principalmente por partículas acarreadas por los gases de combustión. Esta ceniza es recolectada por los dispositivos de control de emisiones contaminantes como los precipitadores electrostáticos y las casas de bolsas.

**Aire necesario para la combustión.** Otra consideración que hay que hacer para el diseño de un incinerador es la cantidad de aire que se debe proporcionar para la combustión completa de los RSM. Pueden encontrarse involucrados en la combustión flúor, cloro, nitrógeno y azufre aunque en pequeñas cantidades, por lo que pueden omitirse en los cálculos. De esta forma el aire necesario para la combustión puede ser determinado con el uso de la siguiente fórmula:

$$W_a = 0.0431 [2.667C + 8H + S - O] \quad (4.5)$$

En donde: *W<sub>a</sub>* es la masa estequiométrica de aire seco (en kg de aire por kg de residuos y en condiciones estándar de temperatura y presión) requerida para incinerar 1 kg de RSM; en tanto *C*, *H*, *S* y *O* son los porcentajes en peso de carbono, hidrógeno, azufre y oxígeno, respectivamente del material libre de humedad y ceniza.

Para los métodos que requieren de un análisis del combustible y no se conoce la composición química se puede asumir que 1.05 m<sup>3</sup> de aire (1.35 kg) en condiciones estándar, se requieren por cada 4200 kJ del poder calorífico de los RSM. <sup>(2)</sup>

Debido a la composición química tan variada de los RSM, en la práctica se debe emplear oxígeno adicional para incrementar la eficiencia de combustión, promoviendo la mezcla y la turbulencia en el hogar. El exceso de aire suministrado está en función del tipo de incinerador. En el caso de los diseños con paredes refractarias, el aire en exceso puede llegar hasta el 200% del valor teórico necesario, aunque en los diseños con paredes de tubos de agua este valor suele ser menor.

El uso de este exceso de aire afecta la temperatura y la composición de los productos de la combustión. Mientras este aumente, el contenido de oxígeno en los gases de chimenea también se incrementa y la temperatura de combustión disminuye. Así, el aire de la combustión puede usarse para controlar la temperatura de combustión (figura 4.3).

**Turbulencia y tiempo de residencia.** Uno de los componentes más importantes de un incinerador y de la cámara de combustión es el sistema de parrillas. La mayoría de los incineradores cuentan con parrillas móviles para promover la turbulencia necesaria y quemar el combustible en condiciones cercanas a las estequiométricas.

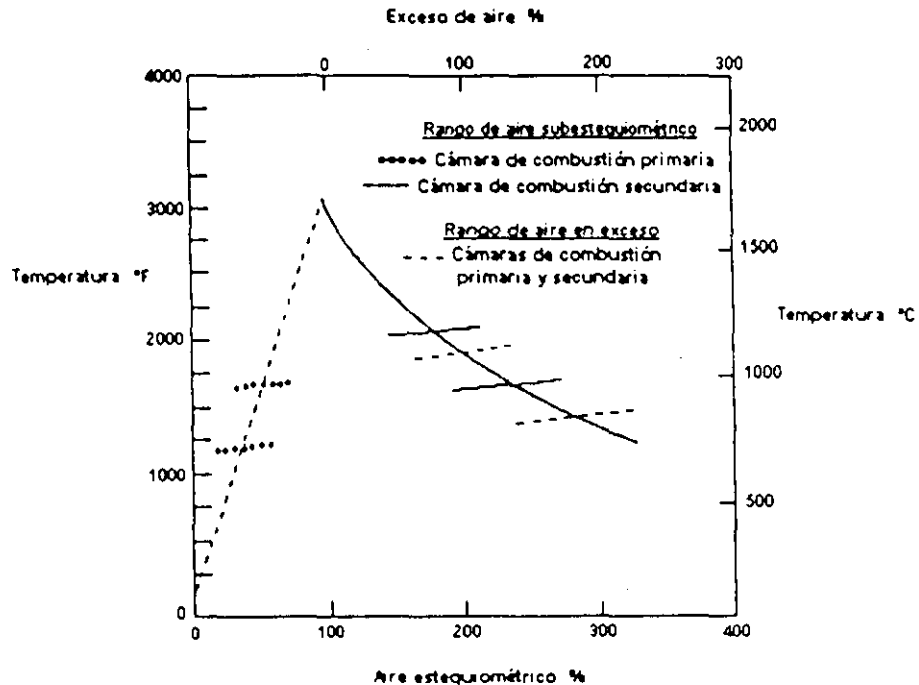


Figura 4.3 Gráfica Exceso de aire vs Temperatura de combustión. [1]

Por lo tanto, las parrillas deben ser seleccionadas y diseñadas para promover una continua, pero limitada agitación del material combustible. Estos sistemas permiten que la ceniza caiga por gravedad a medida que los RSM son transportados e incinerados desde el punto de alimentación hasta el punto de recolección de ceniza.

Las parrillas también determinan el tiempo de residencia de los RSM al controlar la velocidad a la que viajan a través del incinerador. El tiempo requerido para que se lleven a cabo las reacciones de oxidación es el tiempo necesario para la incineración del material seco. Por lo general, entre más grande sea el tamaño de partícula, mayor es el tiempo de residencia que se requiere para la combustión completa. Entonces, es muy importante el considerar el tamaño de partícula al determinar el tiempo de residencia de los RSM en la cámara de combustión.

**Temperatura del proceso de combustión.** El tiempo de residencia y la turbulencia juegan un papel muy importante en el adecuado mantenimiento de la temperatura dentro de la zona de combustión. Este factor también depende de las características de los RSM tales como su temperatura de ignición, contenido de humedad, la configuración del hogar y la dosificación del exceso de aire.

A medida que las temperaturas se incrementan en la cámara de combustión, el tiempo requerido para la incineración de los residuos por lo general se reduce. Se ha determinado que si la cámara se encuentra a una temperatura lo suficientemente alta, el proceso de incineración es autosuficiente y el tiempo de residencia ya no es un factor importante <sup>[16]</sup>.

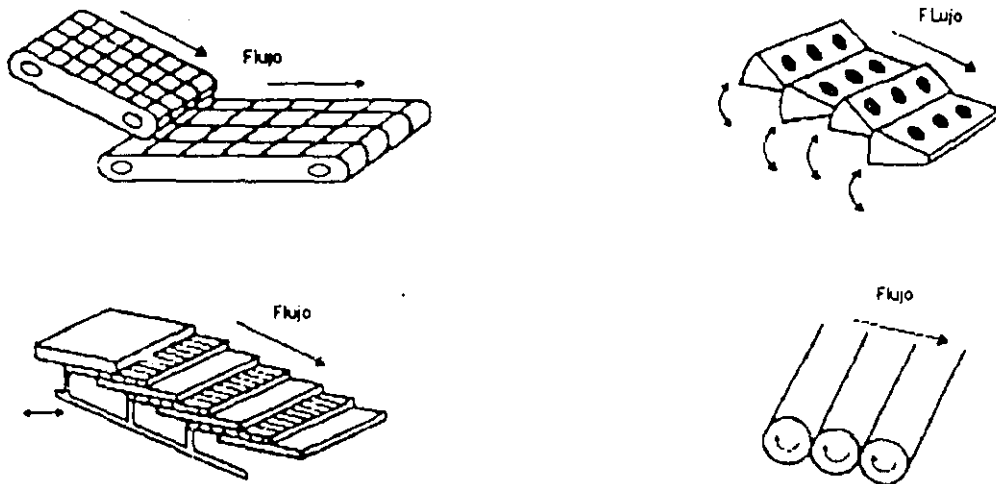


Figura 4.4 Sistemas de parrillas comúnmente empleados en incineradores de RSM. [2]

Pero por el contrario, si esta temperatura es más baja, el proceso de combustión es dominado por las reacciones químicas y el tiempo de residencia pasa a ser un punto clave. Como ya se ha mencionado, la dosificación de aire en exceso es un medio de control de la temperatura a la cual se lleva a cabo el proceso de combustión. Para asegurar la buena combustión de los residuos, la temperatura del horno debe mantenerse arriba de las temperaturas de ignición de estos.

La temperatura de los gases producto de la combustión es importante para controlar la emisión de malos olores. Cuando las temperaturas de combustión son menores de 790°C, puede producirse la emisión de compuestos olorosos. También se ha comprobado que una temperatura de combustión entre los 950 y 1000°C, se reduce la emisión a la atmósfera de dioxinas, furanos, compuestos orgánicos volátiles y otros compuestos de carácter peligroso. <sup>[8]</sup>

#### 4.1.3 Sistemas de incineración

Los incineradores están diseñados para operar con RSM en alguna de sus dos modalidades:

- RSM sin procesar.
- RSM procesados y refinados, material conocido como combustible derivado de residuos o RDF (ver Capítulo 6).

La incineración de RSM sin procesar es la actividad más predominante, en donde los subproductos reciben un mínimo tratamiento antes de ser incinerados (en algunos casos únicamente son triturados o desfibrados). Esto minimiza los costos de operación en comparación a los sistemas de combustión en donde se emplea RDF.

**Sistemas de incineración en masa.** En estos sistemas el proceso es llevado a cabo de manera similar a la descrita en la sección 4.1.1. Sin embargo, los RSM requieren de una remoción de todo material de tamaño excesivo y aquel material no procesable o de

manejo riesgoso dentro del incinerador. El mayor problema en estos procesos es el contenido variable energético de los RSM debido a las condiciones climáticas, la temporada del año y el origen de estos. A pesar de estas desventajas, este tipo de incineradores es la tecnología más empleada en varios países como en Estados Unidos, donde en 1987 el 77% de sus incineradores eran de este tipo.<sup>(2)</sup>

Estos sistemas se dividen en dos categorías de acuerdo al método empleado para su construcción y principalmente, su capacidad:

- **Sistemas construidos en sitio**

Con capacidades de incineración de 180 a 2800 toneladas por día, estos incineradores poseen paredes con tubos de agua o paredes refractarias y caldera de recuperación para la captación de la energía generada por la combustión y generar vapor. Los diseños con paredes de tubos de agua (figura 4.5) son más eficientes debido a la transferencia de calor por radiación directa a las paredes, además de permitir el control de su temperatura.

La combustión de los RSM se realiza en una atmósfera oxidante (con exceso de aire) en una sola cámara de combustión y para asegurar la combustión completa se emplean excesos de aire de un 80 a 200%. Sin embargo, en los incineradores con paredes de tubos de agua, los RSM son incinerados en condiciones de aire más cercanas a las estequiométricas con excesos de aire entre el 50 y el 100%. En estos sistemas, el exceso de aire sirve sólo para satisfacer la demanda de oxígeno de la composición química variada de los RSM.

El tiempo de residencia de los RS varía según el diseño. Este tipo de incineradores suelen ser de alto costo de construcción y operación. Por esta razón, deben de contar con una capacidad mínima de 270 a 360 toneladas por día para ser económicamente viables<sup>(1)</sup>.

- **Sistemas modulares**

Estos incineradores consisten en módulos prefabricados que cuentan con capacidades entre 4.5 y 180 toneladas por día, razón por la cual pueden operar en comunidades pequeñas. Los módulos son enviados de la fábrica al lugar de operación, en donde son ensamblados y montados. El esquema de una instalación típica se muestra en la figura 4.6.

La instalación se encuentra localizada en una construcción prefabricada de bajo costo con el espacio adicional suficiente para el almacenamiento de los RSM y su manejo, que consiste usualmente en una gran plataforma de concreto. La capacidad de la planta puede incrementarse al añadir módulos adicionales.

Estas unidades incineran los RSM de manera discontinua en una cámara con paredes refractarias (cámara primaria) y en una atmósfera reductora, es decir, un ambiente en donde no existe la cantidad de oxígeno suficiente para la combustión completa de los gases liberados.

Un vehículo provisto con una pala mecánica coloca los RSM en la tolva de alimentación del horno. La alimentación se realiza de forma intermitente por medio de un pistón hidráulico, misma que depende de la temperatura que tenga el horno en ese momento, siendo un operador quien coordina el ciclo de alimentación. Los RSM una vez dentro de la cámara primaria son conducidos por medio de un arreglo de pistones hidráulicos, aunque

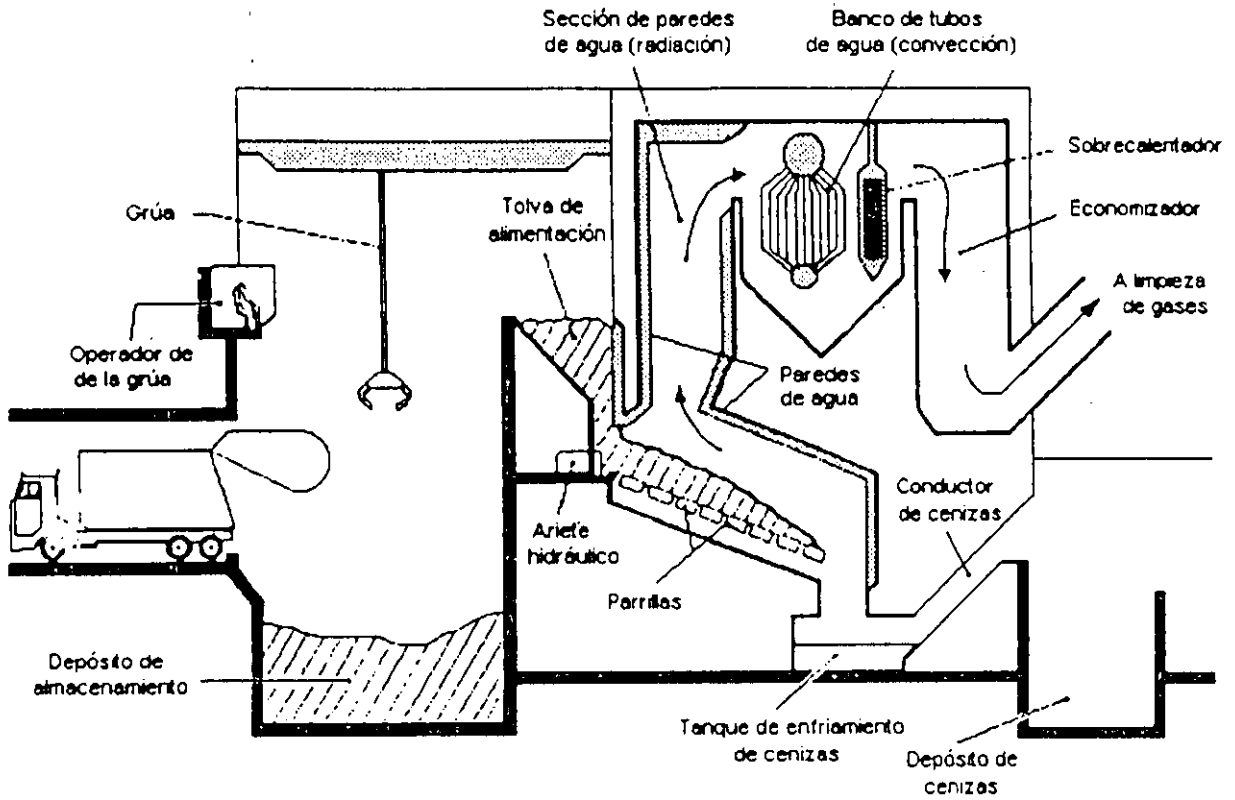


Figura 4.5 Incinerador de RSM con paredes de tubos de agua construido y construido en sitio. [4]

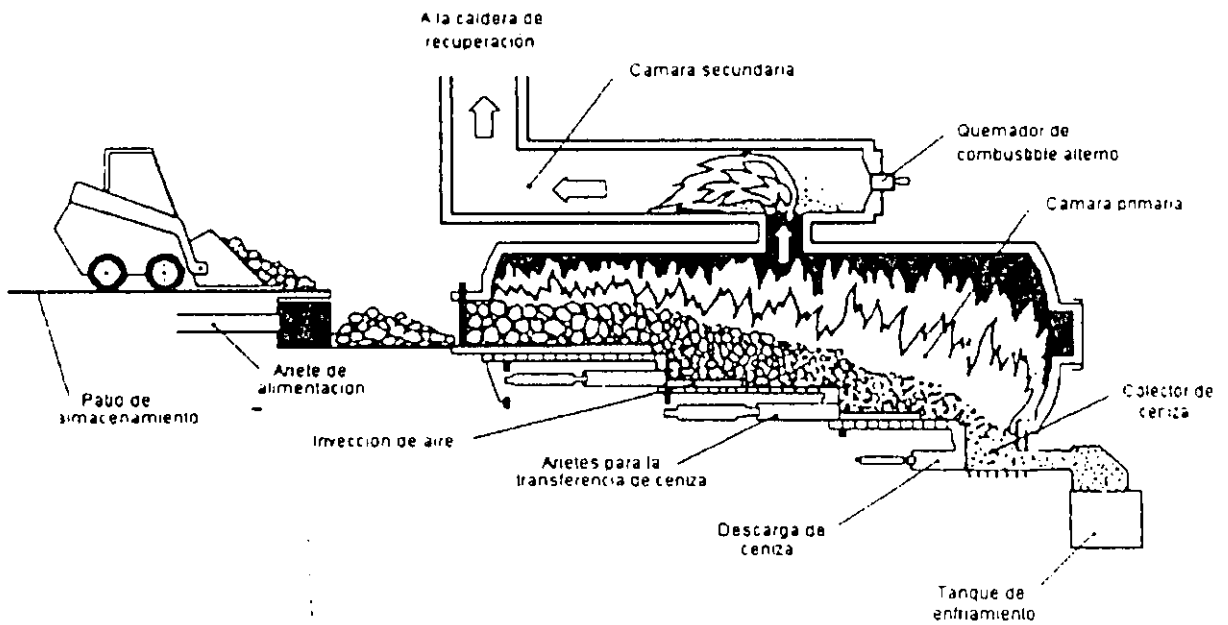


Figura 4.6 Esquema de un sistema de incineración de tipo modular. [4]

otros diseños utilizan sistemas de parrillas como los descritos anteriormente en los sistemas construidos en sitio.

Los gases de combustión ingresan a la cámara secundaria en donde se completa la combustión en un ambiente con exceso de aire y, si es necesario, la quema de un combustible auxiliar (un combustible fósil normalmente empleado durante las primeras horas de servicio). El calor liberado en la combustión de los gases es suficiente para mantener una temperatura estable entre los 750 y 1000°C, por lo cual no se requiere de este combustible durante la operación del incinerador.

Estos sistemas, pueden alcanzar reducciones en el peso de los residuos de hasta un 68% y una reducción en volumen superior al 93%. Estas unidades, aunque son pequeñas, pueden tener sistemas de recuperación de calor de los gases de combustión. Se pueden tener eficiencias en la caldera de alrededor del 72% aunque los valores típicos están entre el 60 y 65% [15]. Por las características de estos sistemas, la energía eléctrica generada puede ser vendida en pequeñas comunidades aledañas a la instalación, en donde la cantidad de residuos generados es pequeña y justifica su uso.

**Incineradores de tipo rotatorio.** Existe otro tipo de incineradores los cuales constan de una cámara de combustión cilíndrica rotatoria. La rotación del horno agita el material combustible a la vez que lo mezcla con el aire para su combustión. La mayoría de estos sistemas posee paredes refractarias aunque existen también diseños con paredes de tubos de agua.

El horno se encuentra ligeramente inclinado para facilitar el movimiento de la mezcla de residuos. A medida en que se lleva a cabo la combustión, las cenizas caen a través de sistemas de parrillas ubicadas en los costados del horno. Su desventaja radica en que operan a altas temperaturas, lo cual facilita la formación de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ).

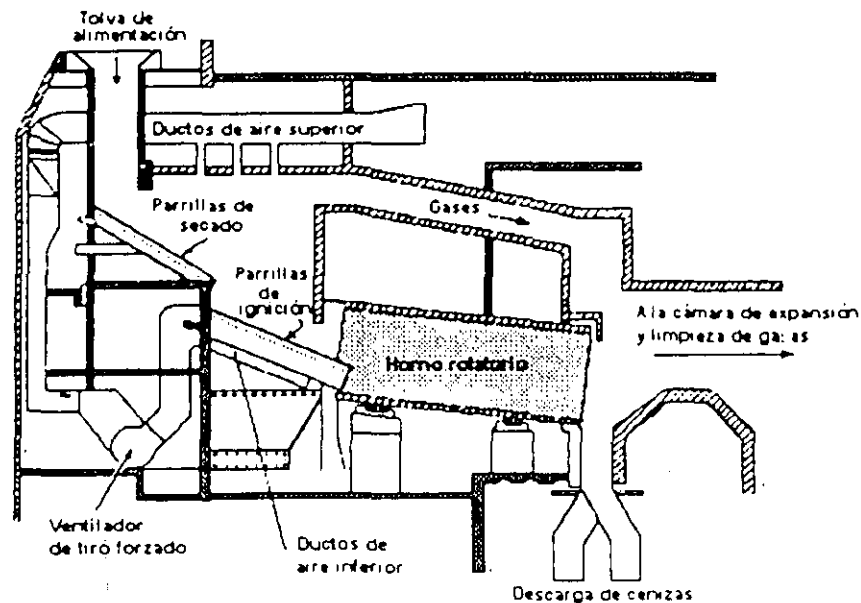


Figura 4.7 Esquema de un incinerador de tipo rotatorio. [15]

**Incineradores de lecho fluidizado.** Las unidades de lecho fluidizado incineran los RSM en una cámara en donde existe un flujo turbulento de material inerte mantenido en suspensión al inyectar un aire primario ascendente de alta velocidad. Este material puede ser arena o caliza y transmite el calor por contacto y radiación al material combustible. Para obtener una buena combustión se requiere de un combustible de carácter homogéneo como el RDF.

El lecho fluidizado es un diseño alternativo a los sistemas de combustión convencionales. En su forma más simple (figura 4.8), el incinerador consta de un cilindro de acero vertical, usualmente con paredes refractarias, un lecho de arena, una placa soporte con un emparrillado y unas toberas para la inyección de aire. Para su operación se suele suministrar un combustible auxiliar, que puede ser gas natural, gas L.P o combustóleo. Este combustible tiene la función de establecer la temperatura de operación del lecho, comúnmente entre 800 y 950°C. Una vez dadas estas condiciones, el combustible auxiliar ya no es necesario y la combustión del material combustible suministrado permanece estable.

En su diseño estándar comúnmente llamado "lecho fluidizado burbujeante", la velocidad del aire varía de 1 a 3 m/s y todo el material del lecho permanece dentro de la cámara. Existe una variante de este diseño, llamado "lecho fluidizado circulante" (figura 4.9), el cual trabaja con aire a velocidades de 5 a 10 m/s. Este aire a alta velocidad arrastra el material del lecho y aquellas partículas de combustible no quemado, que con una previa separación de los gases de combustión, se reintroduce al reactor para su combustión completa. En este arreglo, el aire secundario es inyectado por la parte superior de la cámara de combustión.

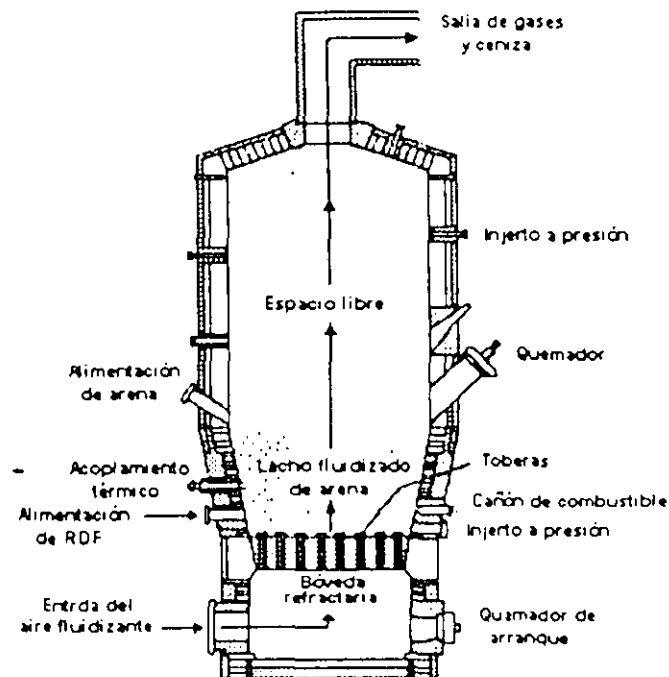


Figura 4.8 Esquema básico de un incinerador de lecho fluidizado. {1}



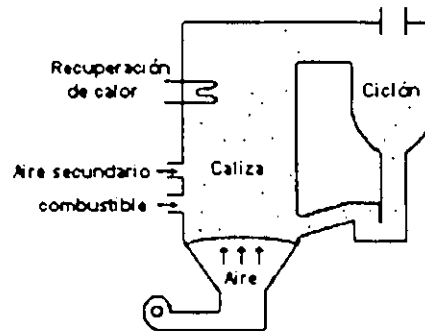


Figura 4.9 Esquema de un incinerador de lecho fluidizado circulante. [2]

El material del lecho tiene una función muy importante además de transferir el calor al material combustible; si el material del lecho es caliza ( $\text{CaCO}_3$ ), ésta reacciona con el oxígeno y el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) formado en la combustión de residuos que contienen azufre. Esta reacción produce dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ), que es un sólido que puede ser removido junto con la ceniza. El uso de la caliza permite la combustión de carbón con alto contenido de azufre con emisiones mínimas de dióxido de azufre.

El lecho fluidizado tiene la ventaja de poder incinerar una gran variedad de combustibles además de RDF. También pueden introducirse virutas de madera, residuos provenientes del tratamiento de aguas residuales, carbón, coque de petróleo, residuos químicos y biomasa. Además, pueden quemar un combustible auxiliar sólo o en combinación con otros materiales.

El lecho fluidizado burbujeante y el lecho fluidizado circulante poseen una eficiencia de combustión tan alta como un 98 o 99%. Esta eficiencia hace de estos incineradores aptos para quemar combustibles con bajo poder calorífico y alto contenido de humedad. Asimismo, estos sistemas requieren de un menor exceso de aire, lo cual incrementa la eficiencia del sistema.

## 4.2 Pirólisis

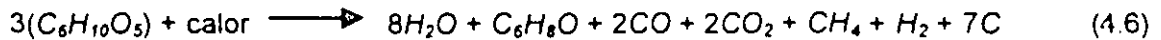
La pirólisis es un proceso de descomposición térmica de la fracción orgánica de los RSM en ausencia total de oxígeno. La pirólisis se ha empleado comercialmente por mucho tiempo para la producción de metanol, aguarrás y coque<sup>[1]</sup>.

A diferencia de los procesos de combustión y gasificación, que son extremadamente exotérmicos, el proceso de pirólisis es altamente endotérmico, requiriendo una fuente de calor externa. Los productos más importantes del proceso pirolítico son los siguientes:

- Una corriente de gas constituida principalmente por hidrógeno, metano, monóxido de carbono y otros gases, según las características de los residuos.
- Una fracción líquida viscosa que consiste en un flujo de alquitrán o aceite que contiene ácido acético, acetona, metanol e hidrocarburos oxigenados complejos. Con un procesamiento adicional, la fracción líquida puede usarse como combustible sintético

- Coque inferior, constituido por carbono casi puro y material inerte presente en los residuos.

Para la celulosa,  $C_6H_{10}O_5$  se ha sugerido la siguiente expresión como representativa de una reacción pirolítica:



En esta reacción, los compuestos líquidos de alquitrán o aceite que se obtienen normalmente son representados por la expresión  $C_6H_8O$ . La composición y las cantidades de los productos pueden ser variadas controlando los parámetros de operación tales como presión, temperatura, tiempo, alimentación, catalizadores y combustibles auxiliares. La calidad del coque inferior depende de la calidad del material que se introduzca al proceso. Las altas temperaturas, alrededor de los  $760^\circ\text{C}$ , favorecen la producción de gases como hidrógeno ( $H_2$ ), metano ( $CH_4$ ), monóxido de carbono ( $CO$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ). En cambio, con temperaturas menores, que varían de los  $450$  a los  $730^\circ\text{C}$ , se produce alquitrán, coque y líquidos como aceites, ácido acético, acetona y metanol. Si se añade hidrógeno en la cámara pirolítica se incrementan el poder calorífico de los aceites y los gases formados.<sup>[2]</sup>

En la tabla 4.1 se muestran datos representativos sobre los productos en función de la temperatura de operación. Por otro lado, en la tabla 4.2 se da un análisis típico del gas de pirólisis en función de la temperatura. Se ha estimado que el poder calorífico de los aceites pirolíticos es aproximadamente de  $20,394 \text{ kJ/kg}$ . En condiciones de máxima gasificación, se calcula que el poder calorífico del gas resultante es de  $26,081 \text{ kJ/m}^3$ .<sup>[2]</sup>

Tabla 4.1 Balance de masas para la pirólisis \*

Temperatura °C	Residuos kg	Gases kg	Ácidos y alquitarnes pirolíticos kg	Coque kg	Masa considerada kg
480	100	12.33	61.08	24.71	98.12
650	100	18.64	59.18	21.80	99.62
820	100	23.69	59.67	17.24	100.59
930	100	24.36	58.70	17.67	100.73

\* Ref de [12]

Tabla 4.2 Composición del gas de pirólisis en función de la temperatura \*

Gas	% en volumen			
	480°C	650°C	820°C	930°C
$H_2$	5.56	16.58	28.55	32.48
$CH_4$	12.43	15.91	13.73	10.45
$CO$	33.50	30.49	34.12	35.25
$CO_2$	44.77	31.78	20.59	18.31
$C_2H_4$	0.45	2.18	2.24	2.43
$C_2H_6$	3.03	3.06	0.77	1.07
Total	99.74	100.00	100.00	99.99

\* Ref. de [12]

La pirólisis es un concepto relativamente nuevo y es por eso que se encuentra aún en desarrollo. El conocimiento que existe sobre el proceso generó principalmente, a partir de investigaciones de laboratorio y de plantas piloto, aunque ya se conocen datos de instalaciones a mayor escala.<sup>[7]</sup>

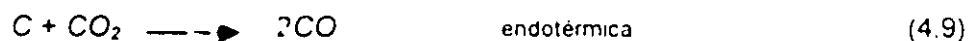
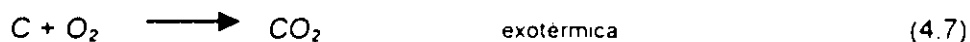
El sistema de pirólisis aún se usa ampliamente como un proceso industrial para la producción de carbón vegetal a partir de madera, coque y gas de coquización a partir de carbón y de gas combustible a partir de fracciones pesadas del petróleo. A pesar de estos usos, la pirólisis de RS no ha sido tan exitosa. La causa principal del fracaso de la tecnología en el pasado parece haber sido la complejidad inherente de los sistemas. El proceso podría llegar a ser económicamente viable si encuentra mercado dentro de la producción de combustibles sintéticos líquidos. No obstante, si lo que se desea es un combustible gaseoso, la gasificación es una técnica más sencilla, rentable y con mayor desarrollo en la actualidad.

### 4.3 Gasificación

La gasificación es un proceso de combustión parcial en una atmósfera reductora. Aunque el proceso fue desarrollado en el siglo XIX, ha sido recientemente adaptado para operar con RSM.

Consiste en una técnica de alta eficiencia para la reducción en volumen de los RSM y la recuperación de energía. La combustión parcial del combustible genera un gas combustible rico en monóxido de carbono, hidrógeno y algunos hidrocarburos saturados, principalmente metano. Este gas puede ser empleado en un motor de combustión interna, una turbina de gas o en una caldera en condiciones de exceso de aire.

Durante la gasificación se presentan principalmente cinco reacciones:



El calor que requiere el proceso proviene de las reacciones exotérmicas, mientras que los componentes se generan principalmente por las reacciones endotérmicas.

Debido a la acción diluyente del nitrógeno en el aire de entrada, el gas posee un poder calorífico de 5,600 kJ/m<sup>3</sup>. La operación de gasificadores refinados al aire es muy estable, con una calidad del gas constante en una amplia gama de tasas de entrada de aire. Cuando se emplea oxígeno puro como oxidante en lugar de aire, se puede obtener un gas con un poder calorífico de 11,200 kJ/m<sup>3</sup>.

Los tres tipos de sistemas gasificadores más desarrollados son los siguientes:

- Lecho fijo vertical

El gasificador de lecho fijo presenta algunas ventajas sobre los otros tipos de gasificadores por su simplicidad y un relativo bajo costo de inversión. Sin embargo, este

reactor es más sensible a las características mecánicas del combustible, requiriendo de un combustible más homogéneo, como el RDF.

Como se muestra en la figura 4.10, el flujo del combustible a través del gasificador se produce por gravedad, fluyendo junto con el aire conjuntamente a través del reactor. Los productos finales del proceso son principalmente gas de bajo poder calorífico y coque inferior.

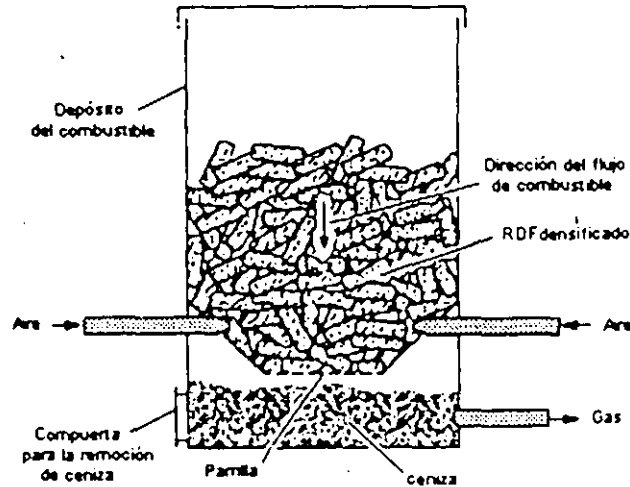


Figura 4.10 Esquema de un gasificador de lecho fijo vertical con alimentación por lotes. [1]

Los gasificadores se caracterizan por tener bajas emisiones contaminantes con el uso de dispositivos de control de emisiones simples. Los gasificadores de lecho fijo pueden también operar con oxígeno puro como oxidante en lugar de aire. Esto tiene como resultado la producción de un gas con poder calorífico de 270 a 2990 kJ/m<sup>3</sup> con una composición media del gas de 50% CO, 30% H<sub>2</sub>, 14% CO<sub>2</sub>, 4% CH<sub>4</sub>, 1% de hidrocarburos y 1% N<sub>2</sub>.

- Lecho fijo horizontal

El gasificador de lecho fijo horizontal es el más común comercialmente. Aunque anteriormente se ha descrito ya como un incinerador de tipo modular, la teoría del sistema es la misma. De forma similar a como se muestra en la figura 4.6, sus principales componentes son una cámara de combustión primaria y otra secundaria.

En la cámara primaria los residuos se gasifican por la combustión parcial al tener un aire menor al estequiométrico. De esta forma se produce un gas de bajo poder calorífico el cual fluye hacia la cámara secundaria para ser quemado con exceso de aire. En esta cámara se producen gases a alta temperatura (650-870°C) producto de la combustión completa (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>), los cuales pueden ser aprovechados para generar vapor o agua caliente en una caldera de recuperación. [1]

Estas unidades se encuentran disponibles con capacidades de las 45 a 3,800 kg/hr. Las unidades son ensambladas en la fábrica y transportadas al lugar del proyecto, en donde requieren de una mínima labor para su instalación.

- Lecho fluidizado

El empleo del lecho fluidizado ya ha sido mencionado como un incinerador, sin embargo con mínimas modificaciones, estos sistemas pueden operar en una atmósfera reductora como gasificadores. Varias plantas piloto han empleado RSM y RDF, así como coque. Estos gasificadores producen un gas de poder calorífico medio, el cual puede ser empleado en calderas para la producción de vapor y electricidad. Estos sistemas, así como los de lecho fijo, no se presentan aún como una tecnología comercial, pero presentan un futuro más promisorio por las ventajas que presentan sus bajas emisiones y la experiencia con su uso desde hace casi un siglo.

#### 4.4 Termólisis

Consiste en una nueva tecnología que se presenta ante la incineración como un proceso más limpio para el tratamiento de los RSM. La termólisis es un proceso en el cual se lleva a cabo el fraccionamiento por calor de la materia orgánica en ausencia de aire. De esta forma pueden ser desintegrados el papel, plástico, corrugado, madera y residuo alimenticio.

Existen actualmente varios diseños ofrecidos por diferentes compañías. El diseño básico consiste en un tubo fijo de acero de 9 m de largo y 1.2 m de diámetro (figura 4.11). En la parte central del tubo se suministra calor por una fuente externa. Los RS se mezclan con cal y son conducidos por el interior del tubo por un pistón. La parte central del tubo eleva la temperatura de los RSM hasta los 500°C sin presentarse la combustión de éstos.

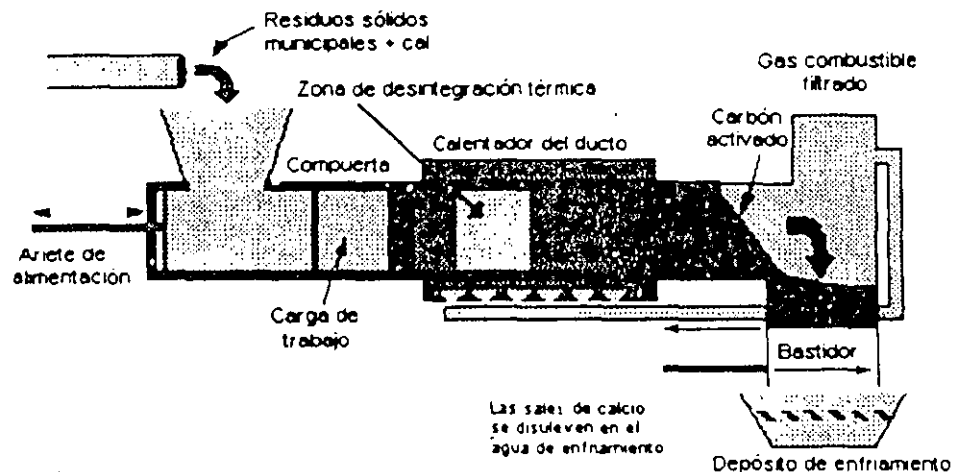


Figura 4.11 Diagrama del proceso de termólisis de RSM

La termólisis produce un gas combustible a 300°C en cantidades suficientes para calentar el tubo una vez que se ha iniciado el proceso. En la parte final del tubo se acumula carbón activado orgánico, el cual actúa como un filtro para las emisiones de mercurio y metales pesados. El cloro y el flúor se combinan con el hidrógeno para formar ácidos que son después neutralizados por la cal. Después, el carbón activado se vierte en un depósito

con agua para su enfriamiento, se filtra para remover los residuos metálicos y restos de material inerte y se puede emplear como combustible en la industria o en altos hornos. Las emisiones son mínimas en comparación con el proceso de incineración al no existir combustión.

El proceso también es aplicado para tratar distintos tipos de residuos como lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales y residuos médico-infecciosos. El semi-coque posee un poder calorífico bajo de 17,000 kJ/kg.

Esta tecnología comienza a despertar interés en Europa debido a los bajos requerimientos para su operación así como de sus bajas emisiones y costos de inversión. Sin embargo, es necesaria mayor investigación para determinar el potencial de aprovechamiento de energía que posee el proceso.

#### 4.5 Procesos de recuperación de energía

En los procesos térmicos se puede obtener energía de forma directa o indirecta. En la pirólisis y la gasificación, se obtiene principalmente de forma indirecta por la producción de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos. Aunque estas tecnologías se encuentran aún en desarrollo, ya existen de manera comercial.

Por otro lado, mediante la incineración se obtiene energía de forma directa mediante la producción de agua caliente, vapor de baja o alta presión y energía eléctrica. Para que toda esta energía producto de estos procesos térmicos tenga éxito a nivel comercial debe ajustarse a un mercado que la consuma, el cual puede ser muy variado según la localización y sobretodo, el tipo de tecnología empleada.

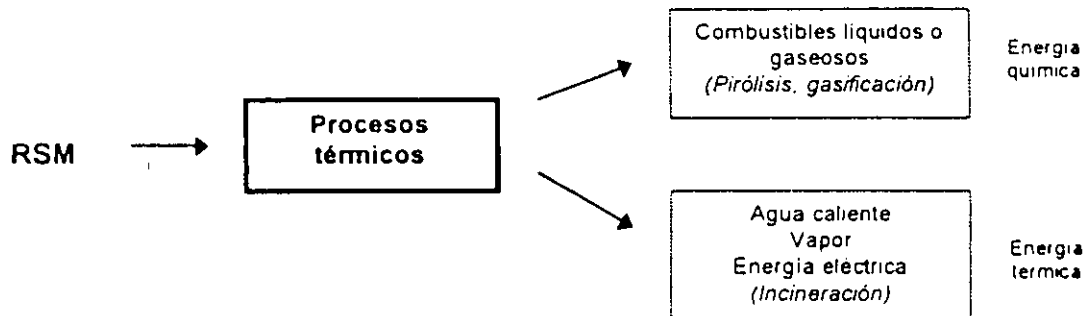


Figura 4.12 Formas de energía producto de los procesos térmicos aplicados a los RSM

La incineración predomina como el proceso térmico más empleado para el tratamiento previo a la disposición final de los RSM mundialmente. Como ya se mencionó, la incineración de RSM produce tan sólo el 25% de la energía que se obtiene al quemar combustibles fósiles. Sin embargo, esto no significa que no pueda ser recuperada, de hecho, su recuperación además de ser útil es necesaria debido a que:

- Ayuda a pagar de forma parcial los altos costos de inversión y operación que puede llegar a tener la instalación.
- La generación de energía secundaria en forma de vapor o agua caliente puede satisfacer ciertas necesidades de la industria en sus procesos como los del papel y la cerveza, o las de una comunidad al ser empleada como un fluido térmico para la calefacción o acondicionamiento de aire en viviendas, escuelas y dependencias gubernamentales.
- La generación de energía eléctrica puede cubrir las demandas base y/o punta de una pequeña comunidad mediante su venta a la red o puede servir como autoabastecimiento para las necesidades de iluminación o potencia.

En resumen, los productos de la energía primaria son agua caliente, vapor de baja y alta presión y electricidad.

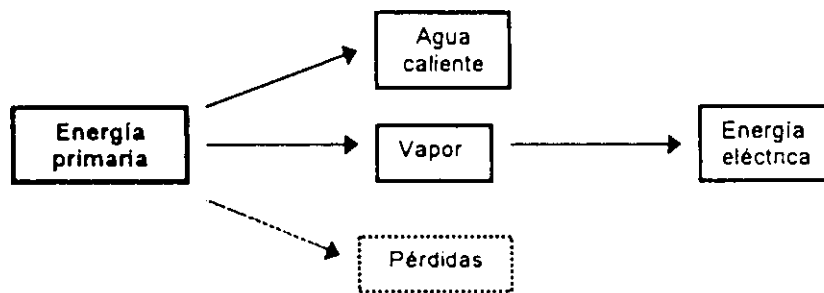


Figura 4.13 Esquema del flujo de energía dentro del proceso de incineración de RSM con recuperación de energía

**Generación de vapor.** El vapor y el agua caliente son los más fáciles de generar, pero su transporte requiere de una red de tubería conectada a la instalación del consumidor. Esta obra tiene un alto costo de inversión, el cual debe estar justificado por medio de un contrato a largo plazo y un consumo de forma estable.

Para vender vapor se requiere de un estudio de compradores potenciales en donde sus demandas se equilibren con la producción de vapor que arroje la planta. Más allá de la dificultad que esto plantea, las variaciones en la demanda de vapor para fines de calefacción y acondicionamiento de aire pueden no ir a la mano con la generación de RSM y, finalmente, en el caso de un paro por mantenimiento se debe contar con una caldera que sirva como respaldo al consumidor.

Los principales clientes de vapor son las industrias, algunas instituciones y empresas o centros que se dediquen a dar servicio de calefacción a viviendas. Esta actividad es más común en algunos países de Europa y la ex - Unión Soviética <sup>(2)</sup>. Estos sistemas pueden también usarse para surtir de aire acondicionado a edificios al emplear turbinas de vapor y bombear agua helada a lo largo de una red de tubería. Las oficinas de gobierno y las universidades suelen ser los mejores candidatos para la compra de energía debido a que pueden de alguna manera garantizar la compra por periodos largos de tiempo.

Como se ha mencionado, el vapor puede producirse en las paredes con tubos de agua del incinerador o en la caldera de recuperación de calor en los incineradores con paredes refractarias. La energía de vaporización del agua proviene principalmente del calor generado por la combustión y el calor contenido en los gases de combustión (figura 4.14). Aproximadamente del 60 al 70% del calor de los gases de combustión puede ser aprovechado en una caldera de recuperación.

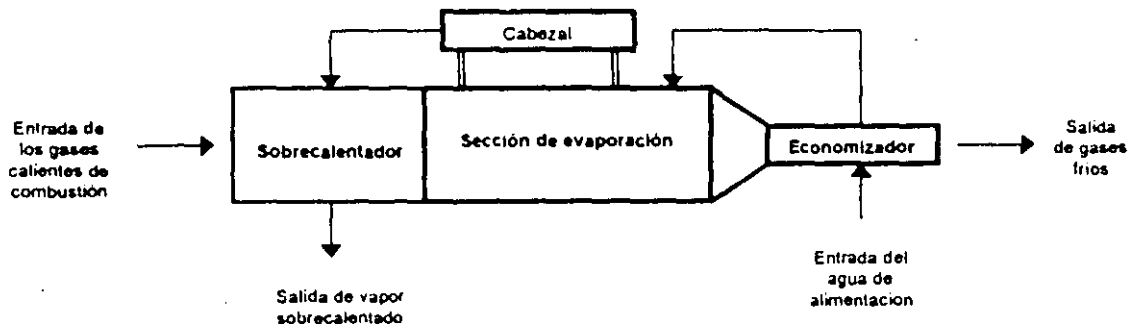


Figura 4.14 Generación de vapor en una caldera de recuperación de calor por medio de los gases de combustión

La generación de vapor típica en las plantas de incineración que emplean RSM con y sin procesar se puede apreciar en la tabla 4.3. Las variaciones en el poder calorífico del material combustible también producen un cambio en la tasa de generación de vapor al existir mayor o menor energía por unidad de masa en los residuos a incinerar (ver tabla 4.4).

No obstante, estas cifras se deben balancear contra el tamaño de la instalación para manejar estas cantidades de vapor. Las condiciones del vapor que las plantas modernas emplean normalmente son 400°C y 4000 kPa.

Tabla 4.3 Generación típica de vapor en plantas de incineración con recuperación de energía \*

Parámetros del vapor	Tipo de RS			RDF
	Residuos municipales sin procesar	Residuos municipales sin procesar	Residuos municipales sin procesar	
Temperatura, °C	327	260	241	206
Presión, kPa	2,758	1,552	1,793	1,724
Tasa de producción, toneladas/tonelada de residuos	3.6	1.4-3.0	1.5-4.3	4.2

\* Ref. de [15]



Tabla 4.4 Tasas de generación de vapor según la calidad de los RSM como combustible \*

Propiedades de los residuos	Poder calorífico en planta, kJ/kg				
	15,120	13,956	11,630	9,304	6,978
Contenido de humedad, % <sup>b</sup>	15	18	25	32	39
Material no combustible, %	14	16	20	24	28
Material combustible, %	71	66	55	44	33
Vapor generado, toneladas/tonelada de residuos	4.3	3.9	3.2	2.3	1.5

\* Ref. de [15]

<sup>b</sup> Porcentajes en peso

**Generación de energía eléctrica.** Por otro lado, la energía eléctrica es generalmente más fácil de comercializar. Su transporte no está limitado a cortas distancias como sucede con el vapor y la demanda tiende a ser menos variable a lo largo del año.

El dispositivo más común para generar energía eléctrica a partir del vapor es la turbina. El esquema por el cual puede ser llevado a cabo el proceso se muestra en la figura 4.15. En este sistema, el vapor se emplea para impulsar una turbina de vapor para luego ser condensado y reiniciar el ciclo básico (ciclo Rankine). A su vez, la turbina de vapor está acoplada a un generador eléctrico, el cual suministra la potencia suficiente para el autoabastecimiento y un excedente para su venta a la red.

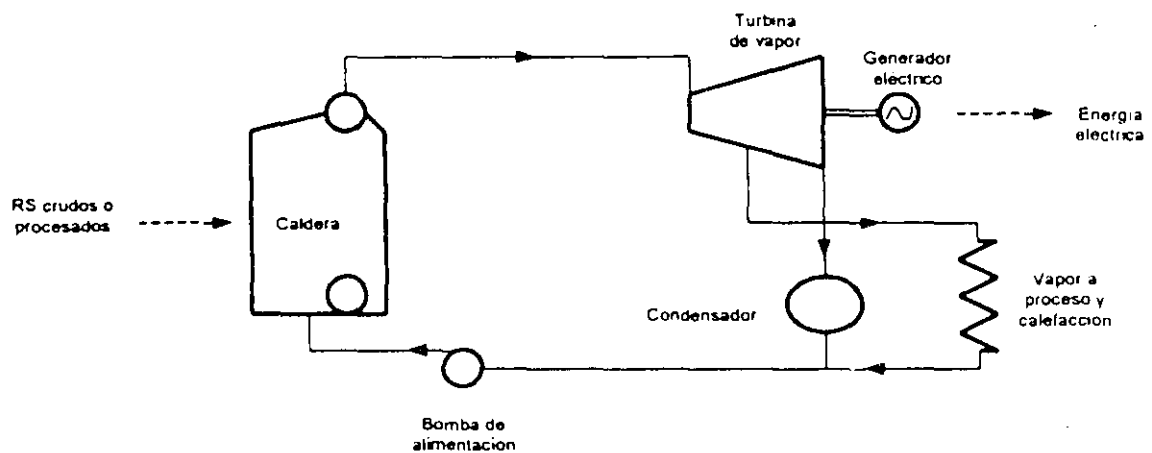


Figura 4.15 Esquema de generación de energía eléctrica con turbina de vapor

Como se puede también apreciar, estos sistemas son ideales para la cogeneración. Cabe recordar que este concepto está definido como la generación de energía térmica y eléctrica a partir de una fuente de energía primaria, que en este caso es la energía contenida en los RSM en cualquiera de sus presentaciones. La cogeneración es empleada en la industria para abastecer energía eléctrica y generar vapor para sus procesos o para fines de calefacción en sus instalaciones.

Las plantas modernas de incineración con generación de energía eléctrica, pueden operar a una eficiencia del 25% ya considerando los usos propios, produciendo alrededor de 600 kWh de electricidad por tonelada de RSM. En los proyectos de cogeneración, la eficiencia global puede ser del 60%, aunque esto depende del sumidero de calor con el que se cuenta durante el aprovechamiento de esta energía.

En los arreglos con turbina de vapor, parte del vapor se extrae de alguna de las etapas de baja presión y se va a proceso, regresando en forma líquida (condensado). El resto del vapor continúa impulsando los álabes de la turbina generando energía eléctrica. Finalmente, este vapor cambia de estado en un condensador y junto con el retorno del vapor de proceso, se vuelve a alimentar a la caldera.

En 1990, se estima que se consumieron  $415.67 \times 10^{12}$  kilojoules de energía a partir de RSM en Estados Unidos, en donde el 73% fue a partir de incineración en masa, 19% de la incineración de residuos industriales y el 8% restante de la recuperación del biogas en rellenos sanitarios. Se espera que para el año 2010 esta cantidad sea de  $1582.5 \times 10^{12}$  kilojoules, donde el 73% de esta energía provendrá de plantas con capital privado para generar electricidad.<sup>(17)</sup> En total, la capacidad eléctrica que se tenía en 1990, se incrementará de 4.4 GWe a 10 GWe para el año 2000, tomando en cuenta que estas plantas incineran más del 15% de los RS generados en ese país.<sup>(18, 19)</sup>

Como se puede apreciar, los RSM son un atractivo recurso energético que en países como Japón, Alemania, Estados Unidos y Reino Unido está siendo aprovechado ampliamente vía incineración, esto es, sin contar los demás procesos térmicos y químico-biológicos que pueden ser aplicados a los RS para obtener energía útil a partir de estos.

#### **4.6 Emisiones contaminantes**

La cantidad y la composición de las emisiones contaminantes dependen de la composición de los RS, el diseño del incinerador y de la calidad de la combustión. Los principales productos de la incineración de RSM son el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), óxidos de nitrógeno, partículas y pequeñas cantidades de químicos tóxicos como bifenilos policlorados (PCBs), dioxinas y metales pesados como cadmio, cromo, plomo y mercurio.

También, como ya ha sido mencionado, se producen otro tipo de residuos como la ceniza pesada, la ceniza volátil, y el producto de los lavadores o depuradores. Y por último, se tiene la descarga de aguas residuales provenientes de los procesos húmedos de remoción de cenizas, limpieza de gases ácidos y  $\text{SO}_2$ , mantenimiento y limpieza de las instalaciones en general, generación de agua de alimentación para la caldera y de la operación de la torre de enfriamiento.

Los rangos de emisiones a la atmósfera provenientes de los diferentes tipos de incineradores se muestran en la tabla 4.5. Esta información es resultado de un conjunto de incineradores nuevos y anteriores que no poseen sistemas computarizados de control de la combustión o equipo reciente para el control de emisiones.

Las emisiones de las plantas de incineración han sido comparadas con aquellas producidas por la combustión de combustibles fósiles. Según los resultados, la

combustión de RSM contribuye al abatimiento de los gases invernadero así como otros contaminantes de carácter peligroso. En la tabla 4.6 se muestra dicha comparación.

**Tabla 4.5 Concentraciones de las sustancias que conforman las emisiones a la atmósfera por los diferentes tipos de incineradores**

Sustancia <sup>a</sup>	Tecnología de incineración		
	Combustión en masa	Sistemas modulares	RDF
<b>Metales (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math> a STP<sup>b</sup>)</b>			
Arsénico	0.452-233	6.09-119	19.1-160
Berilio <sup>c</sup>	0.0005-0.327	0.0961-0.11	20.6 <sup>e</sup>
Cadmio	6.22-500	20.9-942	33.7-373
Cromo total	21.3-1,020	3.57-394	493-6,660
Plo.no <sup>d</sup>	25.1-15,400	237-15,500	973-9,600
Mercurio <sup>c</sup>	8.69-2,210	130-705	170-441
Niquel	227-476	1.92-553	128-3590
<b>Dioxinas/furanos (<math>\text{ng}/\text{m}^3</math> a STP)</b>			
2,3,7,8 - TCDD	0.018-62.5	0.278-1.54	0.522-14.6
TCDD	0.195-1,160	1.02-43.7	3.47-258
PCDD	1.13-10,700	3.1-1,540	53.7-2,840
2,3,7,8 - TCDF	0.168-448	58.5 <sup>e</sup>	2.69 <sup>e</sup>
TCDF	0.322-4,560	12.2-345	31.7-679
PCDF	0.423-14,800	96.6-1810	135-9,110
<b>Gases ácidos (ppm)</b>			
HCl	7.5-477	159-1,270	95.9-776
HF	0.620-7.21	1.10-15.6	2.12 <sup>e</sup>
SO <sub>3</sub>	3.96-44.5		
<b>Contaminantes elementales<sup>d</sup></b>			
(ppm <sup>b</sup> )			
Partículas ( $\text{mg}/\text{m}^3$ a STP)	5.49-1,530	22.9-303	220-533
SO <sub>2</sub>	0.040-401	61-124	54.7-188
NO <sub>x</sub>	39-376	255-309	263 <sup>e</sup>
CO	18.5-1350	3.24-67	217-430

<sup>a</sup> Ref. de [2], con fuente en la USEPA

<sup>b</sup> Concentraciones normalizadas a 12% CO<sub>2</sub>

<sup>c</sup> STP= condiciones de presión y temperatura estándar; ppm = partes por millón

<sup>d</sup> Emitido por la National Emission Standard for Hazardous Air Pollutants (NESHAP)

<sup>e</sup> Emitido por la National Ambient Air Quality Standard (NAAQS)

<sup>f</sup> Dato de prueba único

Las emisiones gaseosas y de partículas producidas por los procesos térmicos pueden ser controladas básicamente por cuatro clases de sistemas:

- Precipitadores electrostáticos, casas de bolsas y filtros electrostáticos de lecho de grava para el control de emisiones de partículas.
- Separación previa de los residuos, sistemas de control de la combustión y tratamiento de los gases de chimenea para el control de los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>).
- Separación previa de los residuos, depuradores secos o húmedos para el control del SO<sub>2</sub> y los gases ácidos.
- Control de la combustión para minimizar las emisiones de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos, dioxinas y furanos.

Tabla 4.6 Comparación entre las emisiones producto de la combustión de RSM y combustibles fósiles <sup>a</sup>

Gas	Emisiones directas	Impacto o abatimiento de gases invernadero en comparación con combustibles fósiles <sup>a,b</sup>	
		Gramos equivalentes a CO <sub>2</sub> por tonelada de RSM incinerados para la generación de energía	
CO <sub>2</sub>	405,000	-109,000	
CO	1,652	-155	
NO <sub>x</sub>	44,100	4,170	
N <sub>2</sub> O	27,000	-19,035	
Hidrocarburos	0	-97,650	
Reducción total de gases invernadero		-220 kg equivalente en CO <sub>2</sub> /tonelada de RSM	

Gas ácido	Impacto o abatimiento en emisiones directas	En comparación con el carbón <sup>b</sup>	
		Gramos de H <sup>+</sup> por tonelada de RSM incinerados para la generación de energía	
NH <sub>3</sub>	0	0	
NO <sub>x</sub>	3	3	
SO <sub>x</sub>	20	-84	
HCl	6	6	
HF	2	2	
Reducción total de gases ácidos		-73 gr H <sup>+</sup>	

<sup>a</sup> Ref de [22]

<sup>b</sup> Evaluado en un periodo de 20 años en la planta de incineración de RSM con recuperación de energía de Saint-Ouen, Paris, Francia

<sup>c</sup> Las cifras negativas indican las emisiones contaminantes evitadas por la combustión de RSM en lugar de combustibles fósiles

Cada uno de estos sistemas tiene una función específica, en donde el objetivo es el minimizar el impacto ambiental a la atmósfera y cumplir con la normatividad vigente según el sitio en que se encuentre la instalación. Los niveles máximos de emisiones propuestos por la EPA para las plantas nuevas y ya existentes se presentan en la tabla 4.7.

Además de fijar los límites máximos de emisión de gases y partículas, la EPA establece los lineamientos para el control de la combustión en las plantas de incineración. Este organismo los llama "buenas prácticas de combustión" (*good combustion practices*) y los aplica tanto para las plantas nuevas como las ya en operación. Estos requerimientos son los siguientes:

1. No se debe exceder en 110% el máximo nivel de carga demostrado durante el periodo de muestreo de dioxinas y furanos.
2. La temperatura a la entrada de los dispositivos para el control de emisión de partículas no debe ser mayor a 17°C sobre la temperatura demostrada durante el periodo de muestreo de dioxinas y furanos.
3. El monóxido de carbono no debe exceder del rango de 50 a 150 ppmv dependiendo el tipo de combustor para las plantas nuevas, y de 50 a 250 ppmv para las plantas en operación.

**Tabla 4.7 Niveles máximos permisibles de emisiones a la atmósfera por plantas de incineración de RSM <sup>a</sup>**

	<b>Límites máximos permisibles <sup>b</sup></b>
<b>Partículas</b>	
Plantas nuevas	24 mg/dscm
Plantas existentes	
con capacidades > 250 TPD <sup>b</sup>	27 mg/dscm
con capacidades < 250 TPD	70 mg/dscm
<b>Cadmio</b>	
Plantas nuevas	0.02 mg/dscm
Plantas existentes	
con capacidades > 250 TPD	0.04 mg/dscm
con capacidades < 250 TPD	0.10 mg/dscm
<b>Plomo</b>	
Plantas nuevas	0.20 mg/dscm
Plantas existentes	
con capacidades > 250 TPD	0.49 mg/dscm
con capacidades < 250 TPD	1.6 mg/dscm
<b>Mercurio</b>	
Plantas nuevas y existentes	0.08 mg/dscm o una reducción del 85%
<b>Dioxinas y furanos</b>	
Plantas nuevas	13 ng/dscm (7 ng/dscm con muestreos menos frecuentes)
Plantas existentes	
con capacidades > 250 TPD	60 ng/dscm con método ESP o 30 ng/dscm con método FF
con capacidades < 250 TPD	(15 ng/dscm con muestreos menos frecuentes) 125 ng/dscm <sup>c</sup>
<b>Gases ácidos</b>	
<b>Dióxido de azufre</b>	
Plantas nuevas	Lo mayor entre 30 ppmv o una reducción del 80%
Plantas existentes	
con capacidades > 250 TPD	31 ppmv o una reducción del 75%
con capacidades < 250 TPD	80 ppmv o una reducción del 50% <sup>c</sup>
<b>Acido clorhídrico</b>	
Plantas nuevas	Lo mayor entre 25 ppmv o una reducción del 95%
Plantas existentes	
con capacidades > 250 TPD	31 ppmv o una reducción del 95%
con capacidades < 250 TPD	250 ppmv o una reducción del 50% <sup>c</sup>
<b>Oxidos de nitrógeno</b>	
Plantas nuevas	150 ppmv
Plantas existentes	
con capacidades > 250 TPD	200-250 ppmv <sup>c</sup>
<b>Ceniza volátil / ceniza pesada</b>	
Plantas nuevas y existentes	Emisiones visibles menores al 5% del tiempo de muestreo

<sup>a</sup> *New Source Performance Standards and Emission Guidelines for Municipal Waste Combustors*, establecidos por la EPA en 1995 y revisados en 1997

<sup>b</sup> dscm = gramos por metro cúbico estándar base seca; ppmv = partes por millón en volumen, 1 TPD ( tons per day, 2000 lb masa) = 0.9072 toneladas/día

<sup>c</sup> No aplicables hasta ser revisadas y aprobadas por la EPA

<sup>d</sup> No aplica a las plantas existentes de combustión en masa/paredes refractarias

4. Certificación tanto de los jefes como los supervisores de planta; y capacitación para los operadores de planta.
5. Monitoreo continuo de las emisiones de dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, opacidad, monóxido de carbono, nivel de carga y temperatura de la combustión.
6. Análisis anual de emisión de partículas, plomo (Pb), cadmio (Cd), dioxinas/furanos y ácido clorhídrico (HCl).
7. La opacidad debe ser menor al 10% en promedio dentro de un tiempo de 6 minutos.

**Partículas.** Los niveles de emisión dependen de la concentración de partículas en los gases de combustión, el tamaño y la masa de las partículas de ceniza y la velocidad de los gases de chimenea. Si la temperatura en la cámara de combustión es muy alta, la presencia de metales con bajos puntos de fusión puede formar aerosoles.

Con el fin de que los filtros u otros equipos no se tapen, las partículas con un diámetro mayor a los 50  $\mu\text{m}$  pueden removerse eficientemente por medio de cámaras de sedimentación, mientras que las partículas finas (mayores a 0.1  $\mu\text{m}$  y menores a los 50  $\mu\text{m}$ ) se pueden remover por medio de precipitadores electrostáticos, casas de bolsas, filtros electrostáticos de lecho de grava o por lavadores húmedos. Sin embargo estos últimos, producen un lodo que requiere un tratamiento in-situ. Los ciclones poseen un bajo costo de inversión y de operación, razón por la cual son muy utilizados en las plantas de incineración para separar las partículas con diámetros mayores a los 10  $\mu\text{m}$ .

**Monóxido de carbono.** La combustión incompleta puede producir un exceso de monóxido de carbono. Esto sucede al tener una sobrecarga en el incinerador (exceso en material combustible) o por las bajas temperaturas causadas por el alto contenido de humedad de los residuos.

Los sistemas con inyección de aire superior en las plantas de incineración en masa aseguran la conversión de este producto intermedio en dióxido de carbono. Sin embargo, debe tenerse un balance con este aire de exceso para evitar las altas temperaturas con las cuales se forman los óxidos de nitrógeno.

En la incineración por suspensión se emplean diseños que incrementan la turbulencia de tal forma que no se formen gases o productos que no hayan sido completamente quemados. El monóxido de carbono se considera como un parámetro de la eficiencia de la combustión.

**Dióxido de azufre.** La cantidad de azufre presente en los RSM es menor que la del carbón bituminoso. Alrededor del 25 al 30% del azufre llega a formar parte de la corriente de gases de combustión en forma de dióxido de azufre o de trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ). Una concentración de azufre del 0.1% produce alrededor de 1 kg de  $\text{SO}_2$  por tonelada de residuos <sup>[2]</sup>. La proporción de  $\text{SO}_2$  con respecto a la de  $\text{SO}_3$  varía dependiendo de los parámetros de la combustión, pero aproximadamente sólo del 2 al 4% del azufre total se transforma a  $\text{SO}_3$ .

Además de ser un contaminante, el azufre causa grandes problemas de corrosión en los equipos de combustión. El dióxido y el trióxido de azufre son solubles en agua, la cual está presente como producto de la combustión. Esta reacción forma ácido sulfúrico, el cual es un compuesto altamente corrosivo y peligroso para la salud y la vegetación.



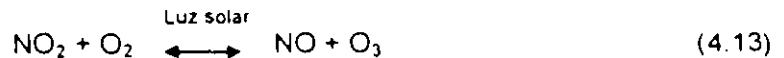
Junto con el dióxido de azufre, otras emisiones no controladas como el ácido clorhídrico, el ácido fluorhídrico (HF) y el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) pueden ser minimizadas por medio de una separación en sitio de los residuos que contengan cloro y azufre, así como por un lavado húmedo o seco para la neutralización de estos gases.

**Oxidos de nitrógeno.** Las dos principales fuentes de óxidos de nitrógeno durante la combustión, son el NO<sub>x</sub> formado por las reacciones entre el oxígeno y el nitrógeno orgánico contenido en el combustible y el NO<sub>x</sub> térmico, este último formado por las reacciones entre el nitrógeno y el oxígeno del aire empleado en la combustión. Las altas temperaturas en el hogar favorecen la producción de óxido nítrico a partir del nitrógeno y el oxígeno del aire. Esta reacción es de la forma:



A medida que la temperatura asciende al rango de 1,000 a 1,300°C, la cantidad de NO producida es mayor, y cuando éste se encuentra en la atmósfera se oxida gradualmente formando dióxido de nitrógeno. La mezcla de óxidos de nitrógeno contribuye a la formación del llamado *smog* fotoquímico.

La luz solar puede inducir la reacción fotoquímica que produce ozono (O<sub>3</sub>) liberando el NO<sub>2</sub> uno de sus átomos de oxígeno al reaccionar con el O<sub>2</sub> por medio de la reacción:



Se puede llevar a cabo una separación previa de los residuos con el fin de remover aquellos elementos que contengan nitrógeno orgánico, como los residuos alimenticios y de jardinería, para el control de los NO<sub>x</sub> en las emisiones producto de la incineración.

El llamado NO<sub>x</sub> térmico puede controlarse por medio de la recirculación de gases de combustión y con la inyección de un bajo exceso de aire a la cámara. Durante esta operación el combustor trabaja en dos etapas, la primera en una atmósfera reductora (como gasificador) y la segunda en condiciones de exceso de aire, disminuyendo así la cantidad de NO<sub>x</sub> térmico formado dentro del hogar.

Las dos tecnologías empleadas para el tratamiento de estos gases son la reducción catalítica selectiva (SCR) y la reducción selectiva no catalítica (SNCR). En la reducción catalítica selectiva se inyecta amoníaco (NH<sub>3</sub>) a los gases de combustión y se les hace pasar por un lecho catalizador. En la reducción no catalítica selectiva se inyecta amoníaco pero no se dispone de un catalizador. El amoníaco en forma gaseosa se inyecta directamente dentro de la cámara de combustión. Los productos de las reacciones también son nitrógeno y agua, sin embargo la temperatura de los gases debe mantenerse dentro de los 705 y 1,205°C para evitar la formación de NO. El control de la temperatura se logra instalando múltiples inyectores en las paredes de la cámara de combustión, de tal manera que el amoníaco pueda ser dosificado dentro de la región de temperatura óptima. Con este proceso se pueden alcanzar eficiencias de remoción de NO<sub>x</sub> del 50 al 80%.

**Metales pesados.** El plomo es el metal pesado más abundante en los RSM así como en las emisiones de su incineración. El plomo se encuentra presente en las latas delgadas, componentes electrónicos y en objetos de plomería. El mercurio, cadmio y arsénico son

otros metales pesados a considerarse. Las fuentes de estos elementos son principalmente baterías, pinturas, tintas y componentes electrónicos.

La mayor parte de los metales volatilizados (mercurio, plomo, arsénico, cadmio y zinc) se condensan en las partículas de la ceniza volátil a medida que los gases de chimenea se enfrían. Los metales menos volátiles (aluminio, hierro, estaño, cromo y níquel) tienden a concentrarse en la ceniza pesada.

Los sistemas de remoción de partículas son importantes para el control de emisiones de metales pesados. Esto se debe a que los óxidos metálicos y los cloruros tienden, como se ha mencionado, a condensarse en las partículas de ceniza más finas a temperaturas inferiores a los 260°C. Las casas de bolsas poseen la más alta eficiencia de remoción de estas partículas, por lo tanto es el método más eficiente para el control de emisiones de metales pesados. Sin embargo el mercurio, debido a su bajo punto de ebullición, no puede ser removido con eficiencia. En estos casos, la separación de RSM que contengan mercurio es la opción más viable para evitar o minimizar su presencia en los gases de combustión.

**Compuestos clorados.** En comparación con los combustibles fósiles, los gases de combustión de un incinerador de RSM poseen mayores cantidades de compuestos con cloro. El cloro orgánico encontrado en plásticos y solventes, como el cloruro de polivinilo o el cloruro de metileno, se convierte en ácido clorhídrico. Parte de este compuesto, posiblemente entre un 20 y 40%, es absorbido por partículas alcalinas dentro de la corriente de gases de combustión.

En los últimos años, las emisiones de dioxinas y furanos son objeto de numerosos estudios actualmente en Japón y Estados Unidos<sup>[6]</sup>. Los términos dioxinas y furanos hacen referencia a dos grandes grupos de sustancias organocloradas: las policlorodibenzo-p-dioxinas (PCDD) y los policlorodibenzo furanos (PCDF).

En general, se caracterizan por ser sólidos cristalinos, inodoros e incoloros a temperatura ambiente, elevada estabilidad térmica y baja volatilidad, además de ser sensibles a la luz ultravioleta. No se disuelven fácilmente en agua, y esto, unido a su gran carácter lipofílico, los convierte en contaminantes químicos altamente persistentes, con gran facilidad para evolucionar en procesos de bioacumulación. Estos compuestos se forman en presencia del carbón, oxígeno, hidrógeno, cloro y en la mayoría de los casos por calor.

Su formación dentro del proceso de incineración se debe principalmente a las bajas temperaturas en la cámara de combustión (menores a los 800°C) y a los bajos tiempos de residencia. Es por esta razón, que para la minimización de estas emisiones, se recurre al control del proceso de combustión. La separación previa de los RSM con la finalidad de remover todos aquellos materiales que contengan cloro es una práctica complicada y que no ha probado ser del todo efectiva.<sup>[6]</sup>

La toxicidad de las dioxinas y furanos es un hecho constatado y reconocido por la comunidad científica. Aunque los 210 compuestos que componen la familia de PCDD y PCDF poseen una estructura similar, lo cierto es que la componente tóxica que presentan de unos compuestos a otros es diferente.

**Cenizas.** En los sistemas de incineración se producen otro tipo de RS comúnmente conocidos como cenizas. Estas cenizas, como se ha mencionado, pueden ser de dos

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA



tipos: la ceniza pesada y la ceniza volátil. Buena parte del diseño y la operación de una planta de incineración está orientado hacia el manejo de estos residuos.

La ceniza pesada está compuesta por materiales no combustibles y por aquellos que no fueron completamente incinerados, que por densidad y tamaño cayeron por los sistemas de parrillas a un tanque para su enfriamiento. La ceniza pesada conforma el 90% del volumen de ceniza total generada.

En los sistemas de incineración en masa la ceniza pesada suele estar constituida por grandes cantidades de metales, vidrio y materia orgánica parcialmente incinerada. En menor proporción se encuentran estos materiales en los sistemas de incineración con RDF, debido a que la mayoría de estos materiales ha sido removida previamente.

La ceniza volátil está formada por partículas microscópicas y submicroscópicas que fueron removidas de los gases de combustión por los dispositivos de control de emisiones. Entre mayor sea la eficiencia de estos equipos, también lo será la cantidad de partículas retenidas por estos. Actualmente las eficiencias de remoción de los precipitadores electrostáticos y las casas de bolsas son superiores al 99% <sup>[1]</sup>. El manejo de esta ceniza es más delicado ya que puede quedar suspendida en el aire y representar un serio peligro a la salud.

La práctica más frecuente es el disponer estas cenizas en rellenos sanitarios. Esta disposición final no se hace en los rellenos sanitarios destinados para los RSM debido a la presencia de óxidos metálicos. Las partículas están presentes en forma de sales insolubles, pero que en condiciones ácidas pueden disolverse contaminando los mantos de agua subterráneos.

La ceniza pesada presenta propiedades similares a las del concreto una vez que ha sido compactada en un relleno sanitario. Esto reduce el riesgo de que el lixiviado penetre en los depósitos de agua subterráneos. Se ha estudiado la posibilidad de poder recuperar metales y otros materiales a partir de la ceniza pesada por medio de separadores magnéticos y tamizado <sup>[1]</sup>, además de que puede tener otros usos debido a sus propiedades físicas, dentro de los cuales se encuentran los siguientes:

- Se emplea con éxito en Estados Unidos como un agregado para la elaboración de la carpeta asfáltica en la construcción de carreteras y caminos.
- Puede ser usada como materia prima en la industria de la construcción para fabricar bloques al ser mezclada con cemento.
- Para construir arrecifes artificiales o ser empleada en el mantenimiento de diques, como se hace en los Países Bajos.

La disposición de las cenizas ha sido un tema de discusión en los últimos años. La Agencia de Protección al Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA), mediante estudios realizados, ha llegado a determinar la toxicidad de la ceniza volátil y algunas veces de la ceniza pesada clasificándolas como residuos peligrosos.

Los sitios en donde se pueden disponer las cenizas no solo pueden ser escasos, sino que son de un alto costo (30 a 90 USD por tonelada en 1991) aunque puede variar significativamente según las normas de disposición vigentes.

---

## 5. Recuperación de energía por procesos biológicos

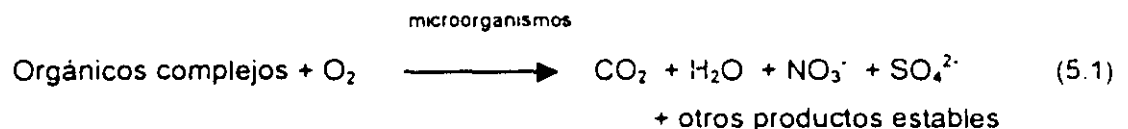
Los procesos biológicos aplicados a los RSM son aquellos en donde se ven involucrados microorganismos para transformar o degradar la materia orgánica de una manera controlada. Los procesos biológicos más conocidos son el composteo, la digestión anaeróbica y la fermentación. De todos estos, los más desarrollados son el composteo y la digestión anaeróbica. Desde el punto de vista energético, resulta de interés la digestión anaeróbica como un proceso de descomposición por medio del cual se puede obtener una corriente de gas rica en metano (biogas), el cual ofrece un alto potencial de uso y aprovechamiento.

Los RSM de la ciudad de México contienen alrededor del 80% de materia orgánica, en donde el residuo alimenticio, los productos de papel y residuos de jardinería, son los tres principales componentes de interés en los procesos biológicos de transformación.

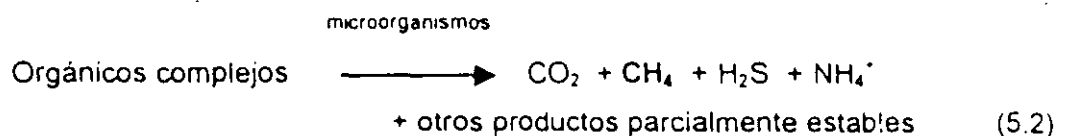
En resumen, los procesos biológicos orientados a la generación de energía tienen como fin el aprovechamiento del metano ya sea para calentamiento a nivel doméstico o la generación de energía eléctrica a nivel industrial. Estos procesos son mejor vistos que la incineración quizás porque son llevados a cabo de forma "natural" y sus productos finales son devueltos al ambiente de una forma más segura.

### 5.1 Producción de metano por descomposición anaeróbica

Los dos procesos metabólicos básicos por los cuales se degrada la fracción orgánica de los RSM son el aeróbico y el anaeróbico. Mientras un sistema aeróbico puede ser representado por la siguiente reacción:



la descomposición anaeróbica de la materia orgánica puede ser descrita como:



Todos los productos finales de la descomposición aeróbica son estables, es decir, están en su máximo estado de oxidación. Los productos de la descomposición anaeróbica, por otro lado, contienen aún energía. La descomposición anaeróbica, también conocida como digestión anaeróbica, es un proceso de varias etapas que se lleva a cabo en ausencia de

oxígeno. Cuando la materia orgánica se transforma bajo estas condiciones, los productos finales son gases como metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), pequeñas cantidades de ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y otros (ec. 5.2). El amoníaco y el ácido sulfhídrico pueden ser oxidados; y el metano en particular, posee una considerable cantidad de energía de oxidación.

Los principales organismos involucrados en los procesos biológicos son las bacterias, aunque algunos protozoarios pueden participar en algunos ecosistemas en donde se genere metano (metanogénesis). Las bacterias son consideradas como el grupo más importante dentro del proceso de degradación, especialmente en el tratamiento de aguas residuales. Estos organismos pertenecen al grupo de las procariontas y consisten en células sencillas que en grupo poseen arreglos de enzimas capaces de degradar varias sustancias orgánicas e inorgánicas contenidas en los RSM. Además, pueden presentar altos índices de actividad metabólica, lo cual permite manejar grandes cantidades de materia orgánica en los sistemas de alto rendimiento.

Las bacterias, omnipresentes en la naturaleza, pueden ser encontradas en medios aerobios (en presencia de oxígeno) y anaerobios (en ausencia de oxígeno). Las bacterias están conformadas en un 80% por agua; y del 20% restante, 90% es materia orgánica y el resto materia inorgánica. Una fórmula empírica sugerida para la fracción orgánica de estos microorganismos (presente en un 90% de su estructura) es  $\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2$  <sup>(1)</sup>. Con base en esta fórmula, alrededor del 53% en peso de la fracción orgánica es carbono. Los compuestos que conforman la parte inorgánica son  $\text{P}_2\text{O}_5$  (50%),  $\text{CaO}$  (9%),  $\text{Na}_2\text{O}$  (11%),  $\text{MgO}$  (8%),  $\text{K}_2\text{O}$  (6%) y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (1%).

La metanogénesis se lleva a cabo en medios anaeróbicos donde el receptor primario de electrones, el  $\text{CO}_2$ , se produce a partir de la fermentación de varios substratos orgánicos. Esto no ocurre en medios donde receptores de electrones como el oxígeno, nitratos y sulfatos se encuentran disponibles. El proceso en sí incluye una mezcla compleja de microbios que transforman la materia orgánica en un producto final estable, y de los cuales sólo algunos producen metano. En la figura 5.1 se esquematiza el proceso bioquímico.

De acuerdo al intervalo de temperaturas en el cual las bacterias operan con mayor eficiencia, estas pueden ser clasificadas como psicrófilicas (-10 a 30°C, 15°C óptima), mesófilicas (20 a 50°C, 35°C óptima) o termófilicas (45 a 75°C, 55°C óptima).

Los tres principales grupos de bacterias que participan en la degradación anaeróbica son:

1. Organismos fermentativos e hidrolizantes

Este grupo produce enzimas digestivas las cuales rompen los polímeros orgánicos y los lípidos como la celulosa, almidones y proteínas entre otros, para formar moléculas con estructuras sub-unitarias. Estas moléculas son fermentadas para formar hidrógeno, dióxido de carbono, ácidos grasos, etanol y otros compuestos orgánicos de cadena corta.

2. Acetógenos

Estos organismos, constituidos por bacterias productoras de ácidos, toman varios de los compuestos orgánicos resultantes del proceso anterior para convertirlos principalmente en ácido acético.

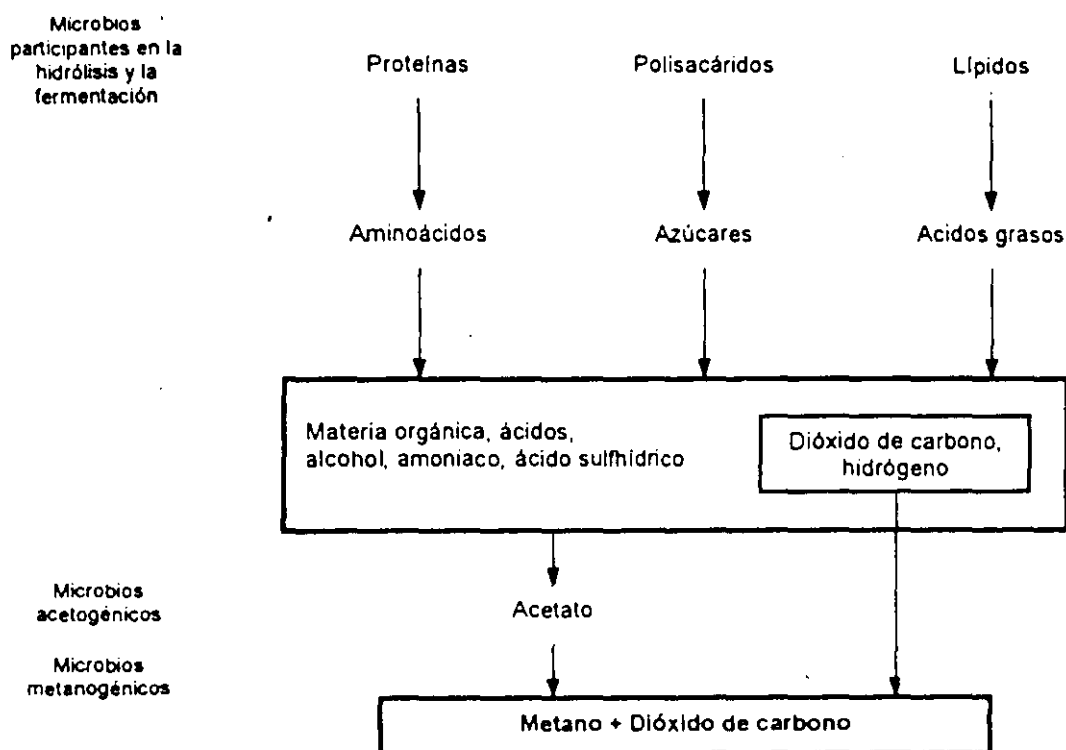


Figura 5.1 Esquema general de las reacciones presentes en la digestión anaeróbica de residuos complejos. [2]

### 3. Metanógenos

Estos convierten el ácido acético, el hidrógeno y el dióxido de carbono en metano. Debido a que los RSM se encuentran compuestos de nitrógeno y de azufre, el amoníaco y el ácido sulfhídrico pueden resultar también de la descomposición anaeróbica.

Las bacterias productoras de metano se encuentran dentro de los cinco siguientes géneros: *Methanococcus*, *Methanobacterium*, *Methanosarcina*, *Methanospirillum* y *Methanobacillus* [21]. Estos organismos formadores de metano son muy sensibles a muchos factores del medio ambiente. Son organismos estrictamente anaerobios, de hecho, el oxígeno en muy bajas proporciones es tóxico para ellos.

También son muy sensibles a los cambios de temperatura. Requieren de un pH neutral y estable. En su ambiente, debe existir la suficiente alcalinidad (resistencia a niveles bajos de potencial de hidrógeno) para evitar que el pH sea menor a 6.2. [16]

Las dos formas de obtener metano son mediante la captación del biogás en rellenos sanitarios o por la digestión anaeróbica en tanques similares a aquellos usados en las plantas de tratamiento de aguas residuales. La mayor parte de la teoría de la descomposición anaeróbica se aplica a ambos procesos.

## 5.2 Generación de biogas en digestores anaeróbicos

El mayor componente de la fracción orgánica de los RSM es la celulosa y la actividad de las bacterias encargadas de degradarla es muy importante. Ya que la materia orgánica contenida en los RSM posee en esencia los mismos constituyentes que los lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales como carbohidratos, grasas y proteínas, es factible llevar a cabo su descomposición por digestión anaeróbica.

Para llevar a cabo este proceso, la materia orgánica de los RSM tiene que ser separada del resto de los residuos para eliminar la mayor cantidad de materia inorgánica. La presencia de metales pesados tiene un fuerte efecto en los microorganismos al realizar la descomposición en un digestor <sup>[21]</sup>. No obstante, esta fracción orgánica suele carecer del suficiente nitrógeno para una acción bacteriana eficiente. Por lo tanto, se recurre a una buena fuente, como lo son los lodos de aguas residuales y obtener mediante una mezcla la relación carbono-nitrógeno satisfactoria. La mezcla resultante es puesta en un tanque cerrado y caliente. El residuo del proceso de digestión es una pasta oscura, a la cual se le debe dar disposición final.

La composición de los RSM es un factor muy importante que debe considerarse al elegir el diseño del reactor anaeróbico. Por ejemplo, si los residuos poseen substratos afines a la hidrólisis y la fermentación como el almidón, los organismos encargados de estos procesos tendrán mayor actividad produciendo grandes cantidades de ácidos orgánicos, dióxido de carbono e hidrógeno. No obstante, si la generación de ácidos orgánicos está por arriba de la capacidad de los organismos acetógenos y metanógenos para convertirlos en dióxido de carbono y metano, el pH del reactor tenderá a bajar provocando la inhibición de los organismos metanogénicos sensibles al pH. Si esto último sucede, el reactor puede fallar debido a la acumulación de ácidos orgánicos como acético, propiónico y butírico entre otros. En general, el rango de pH óptimo para la operación del reactor está entre 6.8 y 7.2 <sup>[2]</sup>.

### 5.2.1 Tipos de digestores

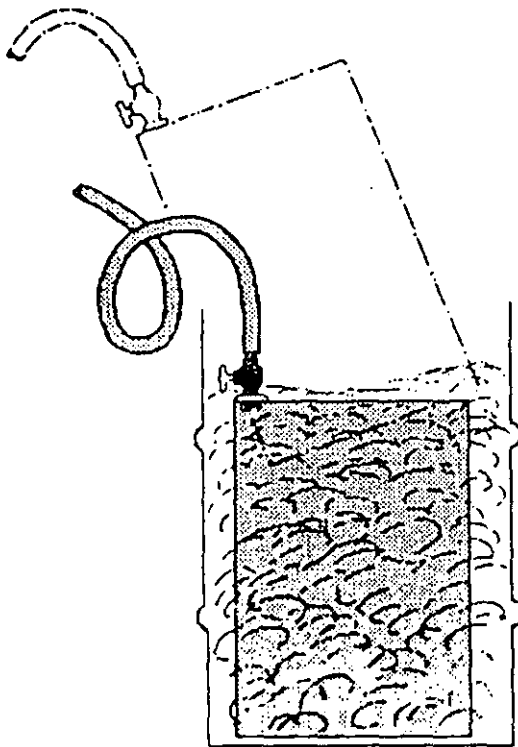
La digestión anaeróbica es ampliamente usada para tratar residuos de animales, aunque los arreglos aquí presentados sirven de buen ejemplo para su aplicación con RSM. Los digestores varían según su diseño y costo. No existe un diseño considerado como el ideal ya que hay muchos factores que intervienen en su construcción y operación, los cuales deben ser tomados en cuenta para un funcionamiento óptimo. Sin embargo, existen algunas diferencias en los principios de estos reactores y por conveniencia, se han clasificado en los siguientes grupos: digestores con alimentación por lotes, digestores con alimentación continua y digestores de alta producción.

**Digestores con alimentación por lotes.** En estos sistemas, el material se introduce al digestor, el depósito se cierra y permanece así hasta que el proceso de digestión concluye. Los residuos pueden ser excremento de algunos animales de sangre caliente que invariablemente contienen bacterias metanogénicas, ya que se encuentran presentes en sus intestinos. Otro tipo de materia orgánica como paja, hojarasca, residuos agrícolas, de plantas de cerveza, destilerías, de la industria del papel, textiles e industrias alimenticias puede ser descompuesta.

La inoculación de un nuevo proceso con material de digestores en operación acelera el inicio del proceso, sin ella, el proceso puede tomar varios meses.

El depósito es cerrado para alcanzar un ambiente libre de oxígeno y bajo esas condiciones, la producción de biogas debe comenzar en 3 o 4 días <sup>[21]</sup>. Cuando la producción de gas cesa, se asume que la digestión ha concluido y la materia residual se saca del tanque, pozo o depósito para iniciar un nuevo ciclo.

El arreglo más simple que cumple con este principio es el digestor de tambor vertical (figura 5.1). Los residuos se colocan en el tambor exterior donde se les añade el material que acelera el proceso. El tambor interior se empuja hacia abajo dentro del tambor exterior junto con los residuos. Este tambor está provisto de ranuras para la salida del gas y evitar también la presencia de aire. Cuando el digestor comienza su operación, el tambor interior es empujado hacia arriba por el gas, dando un indicio visual de la producción de biogas.



**Figura 5.1** Ejemplo de un digestor de tambor vertical. [21]

La principal desventaja, inherente a la simplicidad de este sistema, es que la producción de gas es relativamente pequeña y la primera carga contiene aire el cual hay que extraer, ya que con el metano puede formar una mezcla explosiva en proporciones de 1:4 hasta 1:14 si se presenta la ignición. Además, el gas inicial puede también contener dióxido de carbono en exceso.

La alimentación se hace al sacar el tambor interior, removiendo parte del material y reemplazándolo con material nuevo. Esta operación suele ser tardada e ineficiente, sin embargo, el sistema es útil para la experimentación y para la obtención de bacterias metanogénicas para otros procesos de digestión.

Cientos de digestores fueron instalados en Europa durante la Segunda Guerra Mundial. Estos arreglos simples parecieron ser suficientes al satisfacer la demanda de gas en pequeñas granjas. En la figura 5.2 se muestra un diagrama una de estas plantas.

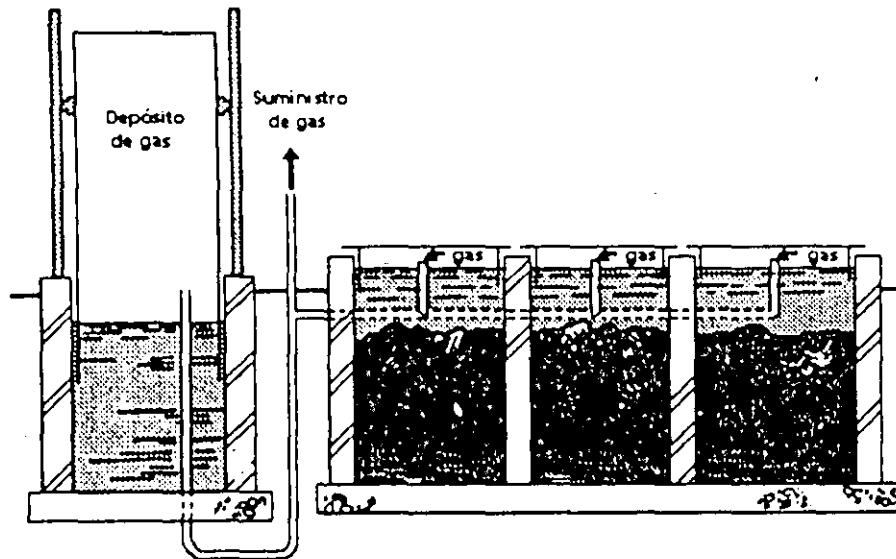


Figura 5.2 Esquema de la planta de Tollemache, Reino Unido. [21]

El material de alimentación podía ser estiércol, paja y restos de vegetales. La carga era colocada en la parte inferior y se cubría con agua para sellar los productos. En este sistema no existía ninguna fuente de calor y los tiempos de retención eran largos, especialmente en invierno.

Desde hace mucho tiempo se sabe que la materia orgánica al descomponerse genera metano junto con otros gases. Estos sistemas han sido considerados como viables para tal fin así como el método de relleno sanitario. Sin embargo, estos digestores ahora se presentan como una alternativa práctica para la obtención de metano a pequeña y mediana escala.

**Digestores con alimentación continua.** Como su nombre lo dice, este tipo de digestores requiere de una alimentación en intervalos de tiempo regulares. En teoría, la alimentación debe ser continua para lograr la máxima eficiencia, pero en la práctica esta se hace de forma intermitente siendo lo más común una vez al día. Esta se realiza por gravedad en los sistemas más simples o por medio de bombas en los más sofisticados.

Las plantas más conocidas son las de la India, en donde se ha empleado el excremento de vaca desde hace más de 60 años<sup>[21]</sup>. La mayoría de sus reactores son de flujo vertical, donde la materia orgánica es mezclada con agua para ser fermentada en tanques cilíndricos con paredes de ladrillo. Un digestor de 1.6 metros de diámetro y 6 metros de profundidad puede aceptar los residuos de cinco vacas, o sea, de 40 a 50 kilos por día. El biogas producido está en el orden de los 3 m<sup>3</sup> por día con una composición de metano alrededor del 55%, el cual es suficiente para satisfacer las necesidades de una familia de

aquella región. El depósito de gas puede almacenar de 50 al 100% de la producción diaria y el tiempo de retención de la materia orgánica es de aproximadamente 50 días.

China y Corea poseen miles de digestores con diseños como el mostrado en la figura 5.3. En este último país, los largos periodos de invierno con temperaturas ambiente bajo cero, afectan la cantidad de gas generado aunque se han aplicado varios estudios y mejoras <sup>[21]</sup>. Se ha logrado mediante aislantes mantener temperaturas de hasta 15°C en el depósito, el cual puede estar enterrado a una profundidad de hasta 5 metros. Con esta técnica, resulta que la producción de gas puede ser hasta diez veces mayor con un incremento en la temperatura entre 5 y 15°C.

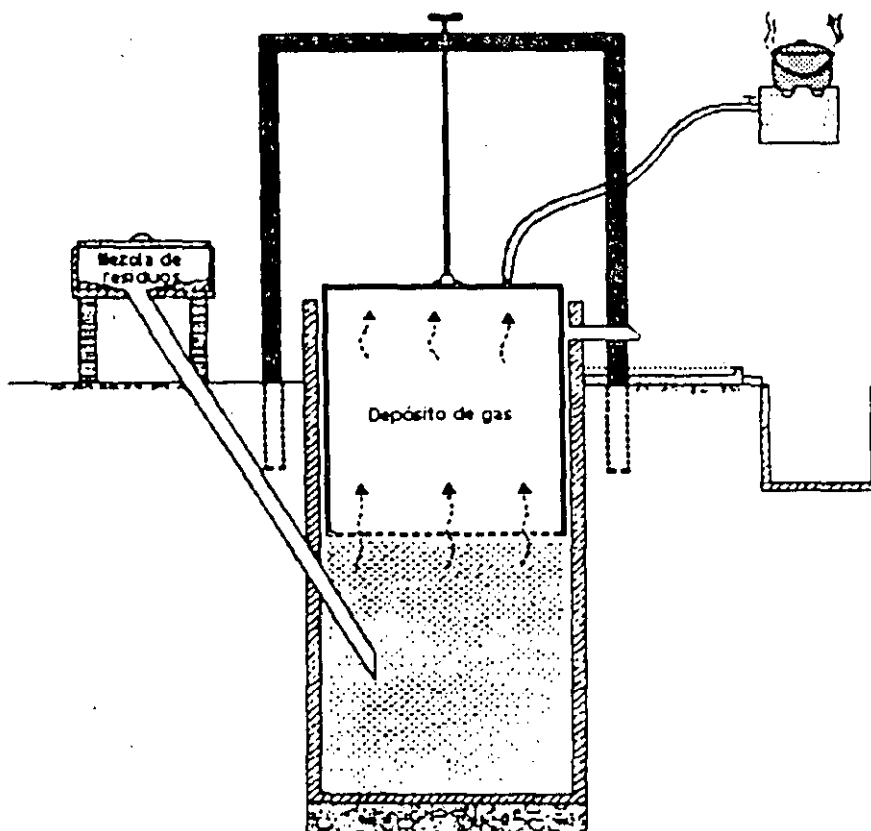


Figura 5.3 Ejemplo de un digestor con alimentación continua. [21]

**Digestores de alta producción.** Por definición, un digestor de alta producción es aquel en el que se lleva a cabo una agitación o mezcla del contenido como una forma de producir calor y asegurar que la reacción se realice en óptimas condiciones de temperatura. Esta operación posee la ventaja de tiempos de retención más bajos.



### 5.2.2 Procesos de digestión anaeróbica con RSM

**Digestión anaeróbica de baja concentración de sólidos.** Este es un proceso biológico en el cual los residuos orgánicos se fermentan con una concentración de sólidos del 4 al 8%. El proceso es usado para generar metano a partir de residuos agrícolas, algunos tipos de excremento y la fracción orgánica de los RSM. Para llevar a cabo este proceso, se añaden altas cantidades de agua formando un lodo que debe ser deshidratado antes de ser llevado a su disposición final.

Son básicamente tres los pasos que se siguen para la obtención de metano. El primero consiste en la preparación de la fracción ligera de la materia orgánica de los RSM a través de la recepción, selección, separación y reducción en tamaño.

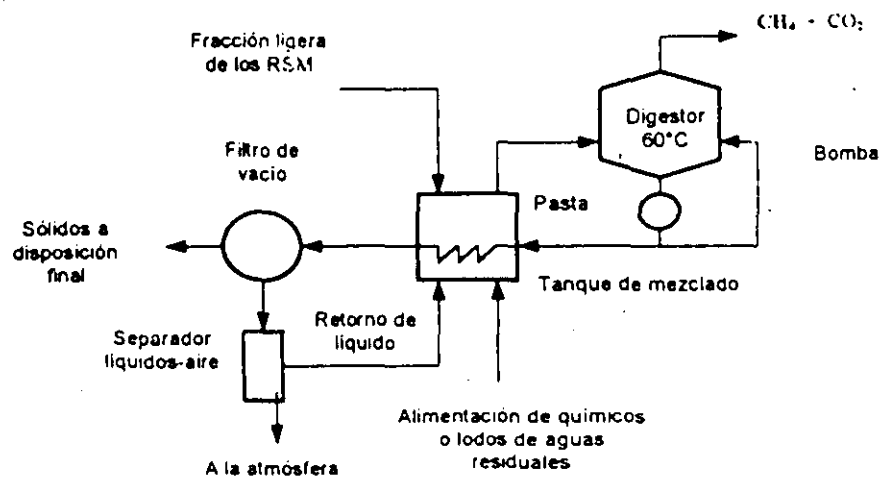


Figura 5.6 Diagrama de flujo del proceso de digestión anaeróbica de baja concentración de sólidos. [1]

El segundo paso consiste en la adición de humedad y nutrientes, un proceso de mezclado, el ajuste del pH (a 6.8 aproximadamente) y el calentamiento de la mezcla para llegar a una temperatura entre los 55 y 60°C. La digestión anaeróbica se lleva a cabo en un reactor de flujo continuo en donde los componentes son mezclados de forma completa.

Durante la operación suelen añadirse lodos de aguas residuales o estiércol para obtener la humedad y los nutrientes necesarios al procesar los RS. El último paso consiste en la captación, almacenamiento, y si es necesario, la separación de los componentes del gas.

Aunque el proceso de digestión no está completamente desarrollado, el gas obtenido contiene de 50 a 60% metano cuando la fracción orgánica ha sido mezclada con lodos de aguas residuales. Debido a la amplia gama de resultados que se ofrecen en la literatura, se debe contar con un estudio propio por medio de una planta piloto con el fin de poder evaluar el proceso de digestión para la fracción orgánica de los RSM.

**Digestión anaeróbica de alta concentración de sólidos.** En este proceso de descomposición biológica, la fermentación ocurre con un contenido de sólidos totales del 22% o mayor. Consiste en una técnica relativamente nueva, por lo cual la recuperación de energía no ha sido totalmente desarrollada.

Las dos principales ventajas de este proceso son que se requiere de menores cantidades de agua y se produce más gas por unidad de volumen en el digestor. La principal desventaja es que aún se cuenta con muy poca experiencia con plantas de mayor escala. La forma en la cual se lleva a cabo el proceso es la misma que en la digestión con baja concentración de sólidos. La diferencia radica en que la deshidratación de los lodos resultantes es menos laboriosa. Sin embargo, debido a la alta concentración de sólidos, los efectos de algunos factores ambientales son más severos. Por ejemplo, la toxicidad del amoníaco puede dañar a las bacterias metanogénicas, lo cual afecta la estabilidad del sistema y la producción de metano.

Existen varios procesos en desarrollo en Europa y Estados Unidos de los cuales muy pocos se encuentran en operación. A medida que estos sean mejorados con el tiempo, se podrían tener en un futuro unidades a nivel comercial. En los últimos años, ha existido gran interés en aplicar la digestión anaeróbica debido a la obtención de metano y el hecho de que la materia residual es similar a la composta generada de forma aerobia. Existe un proceso combinado de digestión anaeróbica de alta concentración de sólidos y composteo aeróbico desarrollado en los Estados Unidos <sup>(1)</sup>.

Este proceso, creado en la Universidad de Cornell, tiene la ventaja de alcanzar una completa estabilización de la materia orgánica junto con la recuperación de energía. Otra ventaja consiste en poder tener el control sobre los patógenos y una reducción de volumen a la vez. El proceso consta de dos etapas (figura 5.7).

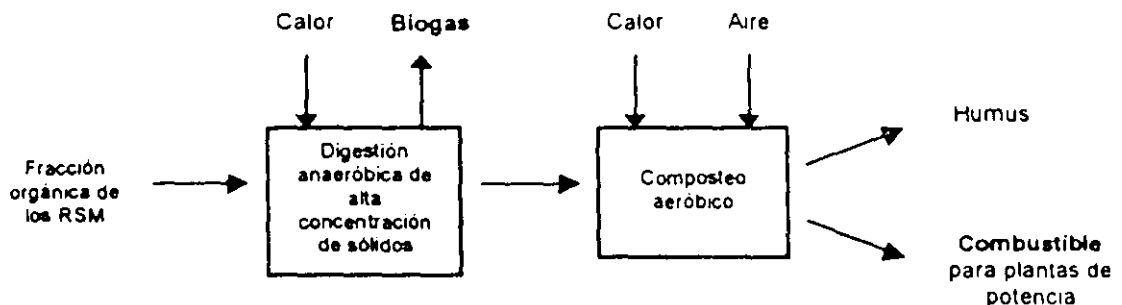


Figura 5.7 Diagrama de flujo del proceso de digestión anaeróbica/composteo aeróbico. (1)

La primera consiste en la digestión anaeróbica con alta concentración de sólidos (de 25 a 30%) de la fracción orgánica de los RSM para producir una corriente de gas compuesta principalmente por metano y dióxido de carbono. El reactor opera bajo condiciones de temperatura en la etapa termofílica de 54 a 56°C, con un tiempo de retención de 30 días. En la segunda etapa se realiza el composteo aeróbico de los sólidos producto de la digestión, con el fin de incrementar el contenido de sólidos en el proceso en un 25 hasta 65% o más. El producto final es un material semejante al humus, con un contenido energético de 14,000 a 15,000 kJ/kg y una densidad de 560 kg/m<sup>3</sup>. Debido a la naturaleza combustible de este material, puede ser usado junto con otros combustibles en calderas o

peletizado para su refinamiento y almacenaje. Por su semejanza con la composta, también puede ser utilizado como acondicionador de suelos.

El proceso aún se encuentra en desarrollo, sin embargo se estudia el emplear la fracción orgánica de los RSM junto con lodos de aguas residuales para la obtención de metanol<sup>[1]</sup> y energía térmica (requerida por el proceso) a partir del biogas generado en la descomposición anaeróbica.

### 5.3 Generación de biogas en rellenos sanitarios

Los RSM depositados en un relleno sanitario en ausencia de oxígeno, se descomponen por una combinación de procesos físicos, químicos y biológicos. Dichos procesos generan dos productos: biogas y lixiviado. La generación de metano en rellenos sanitarios difiere de aquel proceso llevado a cabo en los digestores anaeróbicos al casi no existir control alguno sobre el proceso cuando el gas es capturado. El único control que se puede tener es sobre la concentración de humedad, sin embargo aún es un recurso limitado en la mayoría de las instalaciones existentes.

El tema de la generación de biogas en rellenos sanitarios ha sido discutido extensamente por la literatura, con pequeñas variantes en cuanto a la caracterización de las etapas en que puede ser dividido el proceso a lo largo de biodegradación de los RSM. Haciendo referencia a un modelo más detallado<sup>[1]</sup>, la generación del biogas puede ser dividida para su estudio en cinco etapas (figura 5.8).

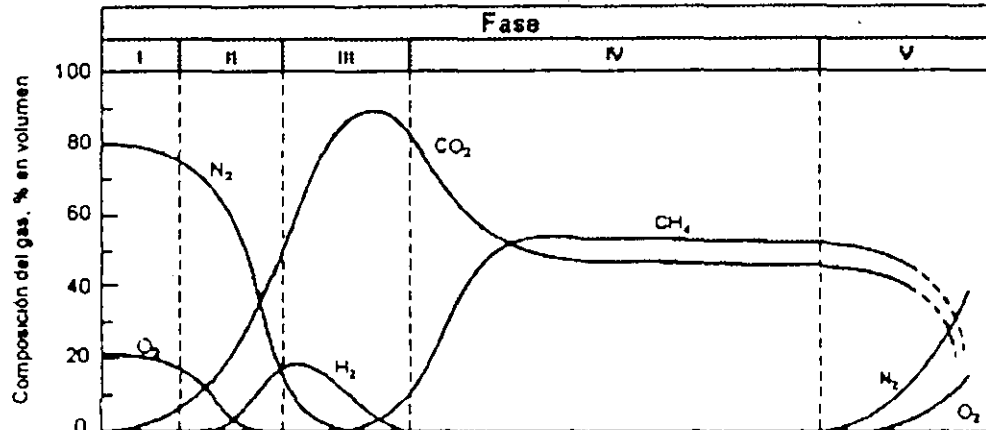


Figura 5.8 Fases generales en la generación de biogas en rellenos sanitarios (I: fase aeróbica de ajuste, II: fase de transición, III: fase ácida, IV: fase metanogénica, V: fase de madurez). [1]

- Fase aeróbica de ajuste (I)

Consiste en la fase inicial de ajuste en la cual la fracción biodegradable de los RSM sufre una descomposición por microorganismos desde el momento de su depósito hasta que se agota la cantidad de oxígeno presente la celda. Puede durar de unos cuantos días hasta varios meses dependiendo de la rapidez de descomposición. El producto que comienza a formarse es dióxido de carbono.

- Fase de transición (II)

En esta fase, se desarrollan las condiciones anaeróbicas para que los microorganismos empleen los nitratos y los sulfatos (receptores de electrones) como fuente de oxígeno y produzcan principalmente ácido sulfhídrico, nitrógeno y dióxido de carbono. Existe una alta generación de este último gas en esta fase sin producirse aún metano ya que la fase de reducción no se ha iniciado.

- Fase ácida (III)

La actividad biológica iniciada en la fase II se acelera produciendo grandes cantidades de ácidos orgánicos y menor cantidad de hidrógeno. Se inicia la transformación por medio de enzimas en compuestos de mayor masa molecular (hidrólisis) para producir otros que servirán como fuente de energía y de carbono para las bacterias anaeróbicas. Después, se realiza la conversión de estos productos para generar otros de menor masa molecular como el ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) y otros ácidos orgánicos más complejos. El dióxido de carbono es el principal gas generado durante esta fase.

El pH del lixiviado, si existe, cae a un valor de 5 o menor debido a la presencia de estos ácidos y las elevadas concentraciones de dióxido de carbono en el depósito. La demanda bioquímica de oxígeno ( $\text{DBO}_5$ ), la demanda química de oxígeno (DQO) y la conductividad eléctrica del lixiviado se incrementan significativamente.

- Fase metanogénica (IV)

En esta fase, un segundo grupo de microorganismos convierte el ácido acético e hidrógeno formados en la fase III en metano y dióxido de carbono. A medida que el metano comienza a generarse, la temperatura del depósito se incrementa aproximadamente a  $55^\circ\text{C}$ . La generación de metano y dióxido de carbono se perfila estable. Debido a la conversión de los ácidos, el pH del lixiviado tiende a valores neutros (de 6.8 a 8), mientras que la  $\text{DBO}_5$ , la DQO y la conductividad se reducen.

- Fase de madurez (V)

La fase de madurez se alcanza una vez que la materia rápidamente biodegradable ha sido convertida en  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ . No obstante, esta conversión continúa a medida que la humedad emigra a través del depósito y alcanza a los demás materiales. La cantidad de biogas generado decrece debido a que la mayor parte de los nutrientes ha sido removida con el lixiviado durante las fases anteriores y el material remanente es lentamente biodegradable.

La duración de cada una de las fases varía significativamente, dependiendo de la cantidad de materia orgánica presente, su rapidez de biodegradación, la disponibilidad de nutrientes, el contenido de humedad de los RSM y el grado de compactación a la cual hayan sido sujetos los materiales. Por lo general, el metano comienza a generarse dentro de los dos primeros años una vez dispuestos los RSM en el relleno sanitario.

Teóricamente es posible calcular la cantidad total de gas disponible en el relleno sanitario. La generación de biogas depende en gran parte de las condiciones ambientales del lugar, las cuales no son controlables. En la literatura se menciona que de 200 a  $450 \text{ m}^3$  de biogas pueden ser producidos a partir de cada tonelada de residuos orgánicos una vez llevados a su completa descomposición<sup>[2]</sup>, lo cual se traduce en una enorme cantidad de energía. El poder calorífico del biogas es de aproximadamente  $18,600 \text{ kJ/m}^3$ , el cual viene siendo casi la mitad del poder calorífico del gas natural.

### 5.3.1 Procesos de recuperación de energía

La composición del gas seco en un relleno sanitario bien controlado puede ser como sigue: CH<sub>4</sub> (de 45 a 70%), CO<sub>2</sub> (de 30 a 45%), N<sub>2</sub> (de 0.5 a 5%), H<sub>2</sub>S (de 0.001 a 0.002%), trazas de propano, isobutano, n-butano y otros hidrocarburos. Por esta razón, no puede ser directamente comercializado por tener un bajo poder calorífico y grandes cantidades de dióxido de carbono.

Sin embargo en Chile <sup>[23]</sup>, el biogas es transportado por tubería para aprovecharlo de dos formas: como combustible en los procesos productivos de la industria y para uso domiciliario. Esto último se logra haciendo una primera mezcla de 30% biogas y 70% gas natural. Después, se añade un 10% más de biogas refinado proveniente de una planta de separación catalítica. Finalmente, la mezcla queda compuesta de 40% biogas y 60% gas natural que es inyectado a la línea de distribución de gas urbana.

Por lo general, el interés por el uso del biogas como fuente de energía no radica totalmente en la necesidad de contar con un combustible alternativo, sino por presiones de carácter ambiental en cuanto a las emisiones de malos olores por el gas emitido en estas instalaciones, la presencia de compuestos orgánicos volátiles (COV) y las emisiones de metano a la atmósfera, bien conocido como un gas de efecto invernadero. También se extrae el biogas de forma controlada para evitar explosiones dentro de las estructuras del relleno sanitario. Una alternativa para la eliminación del metano es la desintegración térmica en presencia de oxígeno.

Por otra parte, el metano puede ser empleado como fuente de energía para producir calor, vapor y/o electricidad. En instalaciones de hasta 5 MW es común el uso de motores de combustión interna o turbinas de gas (figura 5.9). En instalaciones mayores, pueden ser empleadas las turbinas de vapor.

Si el biogas va a ser utilizado en motores de combustión interna, es necesario remover la mayor cantidad de humedad y ácido sulfhídrico para que por las temperaturas de combustión no se presenten problemas de corrosión.

El dióxido de carbono puede ser separado del metano, sobretodo si existe una forma de aprovechar el CO<sub>2</sub> de manera comercial. Al retirar el CO<sub>2</sub> del biogas se mejoran las condiciones para la combustión del mismo. La deshidratación, en combinación con la remoción de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S, puede producir un gas con poder calorífico de 22,300 a 26,000 kJ/m<sup>3</sup>.

La purificación del biogas puede lograrse por diversos procesos de separación como absorción física y química, conversión química, condensación y separación por membranas <sup>[27]</sup>. Ciertos usos del gas de relleno sanitario (por ejemplo calefacción y cocción doméstica) sólo requieren que se elimine el H<sub>2</sub>S del gas.

El motor de combustión interna es, junto con la turbina de gas, una de las opciones fundamentales en las instalaciones de cogeneración. Cada uno de estos dos dispositivos tiene su campo de aplicación limitado, y puede decirse que son dos opciones complementarias, en lugar de competitivas <sup>[24]</sup>.

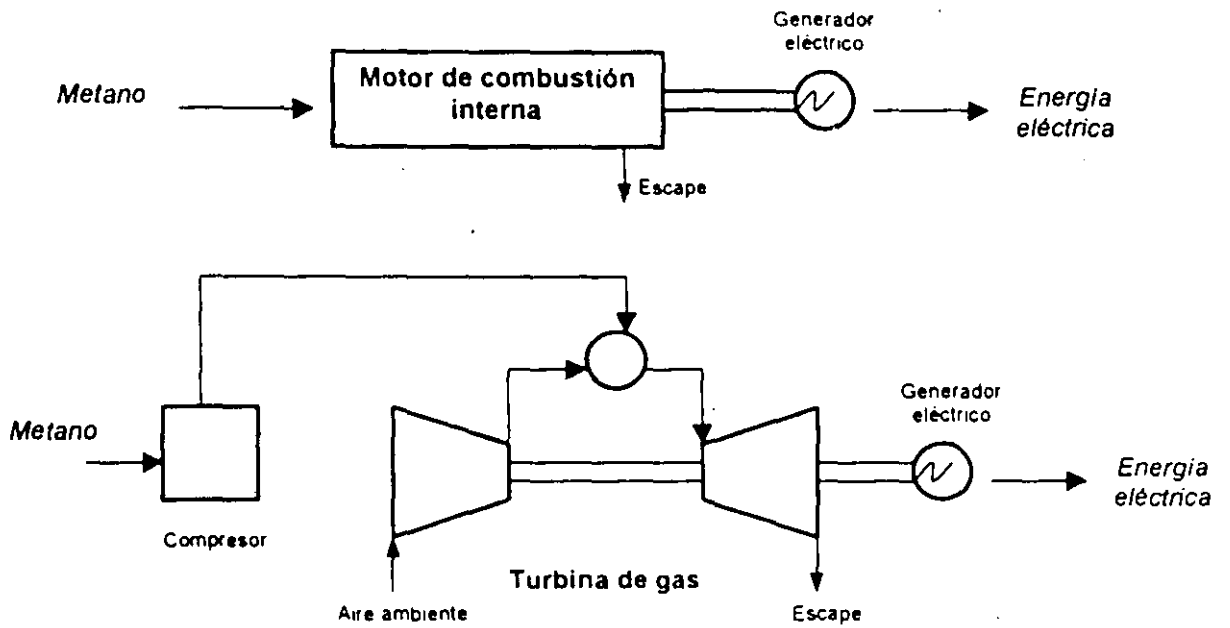


Figura 5.9 Esquemas de los dispositivos para la recuperación de energía a partir de biogas

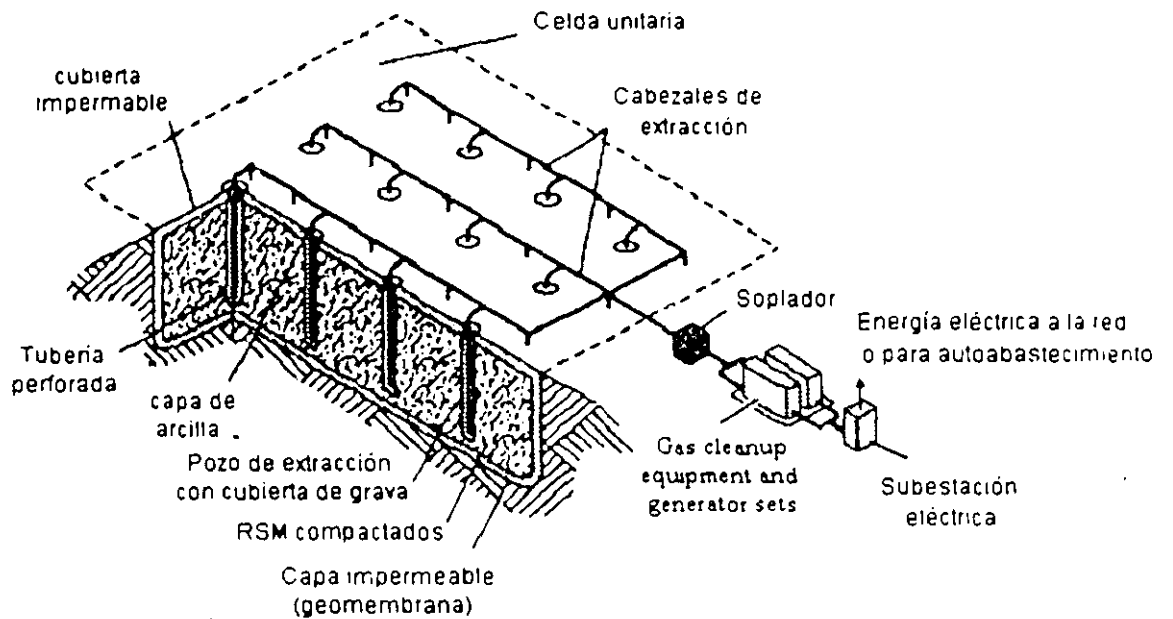


Figura 5.10 Sistema de extracción y aprovechamiento de biogas por medio de pozos verticales [1]

Las características que favorecen al motor alternativo son:

- Alta eficiencia, con valores de 35 a 45%, frente a unos valores para la turbina de gas en el mismo rango de potencias del 25 al 32%.
- Alta eficiencia a carga parcial. Un valor típico para la eficiencia al 50% de la carga nominal es del 87 al 89% del valor de la eficiencia a plena carga. Esto se traduce en una mejor adaptación frente a las variaciones de carga.
- Soportan mejor que las turbinas de gas los arranques y paradas repetidos. Se cita como valor típico del acortamiento de vida de una turbina de gas ocho horas por cada arranque, lo que en una máquina con arranques diarios puede suponer un acortamiento de su vida de un 30 a un 40%.

Las características que favorecen el uso de la turbina de gas son:

- Temperaturas de salida de los gases de combustión más altas, de 450 a 550°C, comparadas con valores de 350 a 425°C para los motores alternativos.
- Caudal de gases de combustión más altos, del orden de 12 kg/h por kW, frente a valores de 7 kg/h por kW para los motores alternativos.

Estas dos características hacen que el aprovechamiento del calor de los gases de escape, por ejemplo al producir vapor, sea más fácil en el caso de las turbinas de gas que en el de los motores de combustión interna. Esta ventaja es más importante cuando más altas son las condiciones de presión y temperatura del vapor requerido.

El biogas posee un nivel medio de capacidad calorífica, pero con una mínima limpieza puede ser usado directamente en calentadores para producir vapor para uso industrial. Esta aplicación reduce la dependencia que se tiene en los combustibles fósiles. Su uso directo no requiere de inversiones costosas y es probablemente la aplicación más utilizada desde el punto de vista de su relación costo/efectividad.

La viabilidad económica de un proyecto de recuperación de energía depende de la cantidad del gas generado, su calidad y del tiempo en que pueda ser aprovechado. De acuerdo a la experiencia que se tiene en otros países donde se lleva a cabo la recuperación de biogas como por ejemplo, Chile, se ha estimado que es factible obtener de 50 a 80 m<sup>3</sup> de biogas por tonelada de residuos domiciliarios tal cual llegan al relleno sanitario, en un plazo de 10 años.

La producción de metano puede aumentar al tener un control de los RSM que ingresan al relleno sanitario así como su forma de disposición en las celdas, la recirculación del lixiviado para la adición de humedad, la neutralización de los efectos inhibidores de los ácidos orgánicos y la disposición junto con los RSM de residuos degradados de manera aeróbica para incrementar la población de microbios de lento crecimiento.

El aprovechamiento del biogas como combustible, permite transformar un contaminante potencial (CH<sub>4</sub>) en un producto útil, se reducen los costos de control ambiental y se crean ingresos adicionales. Aproximadamente el 75% de los rellenos sanitarios en el mundo con sistemas de recuperación de biogas usan la energía que ofrece el gas de relleno sanitario para generar electricidad. Sin embargo, en muchos rellenos sanitarios, el biogas es aún llevado a su combustión sin ser aprovechado de forma alguna.

En los últimos años, se ha comenzado a plantear la recuperación de energía como una actividad benéfica a medida que los proyectos son más atractivos y se tiene mayor conciencia de la gran cantidad de energía que se encuentra encerrada en los RSM al degradarse por agentes biológicos.



---

## **6. Obtención de combustibles sólidos a partir de los residuos sólidos municipales**

Los RSM constituyen en si una mezcla de materiales con propiedades distintas como densidad, contenido de humedad y contenido energético. Además poseen un comportamiento biológico inestable y suelen contener materia orgánica que en los procesos de combustión conducen a la formación de sustancias peligrosas. Estas propiedades hacen de los RSM sin procesar un material combustible de baja calidad.

Ciertos problemas como el alto contenido de humedad, el contenido energético variable, el alto contenido de cenizas, la facilidad de manejo y almacenaje y el control de emisiones a la atmósfera, son inherentes en los sistemas de incineración masiva, en donde la naturaleza heterogénea de los desechos provoca bajas eficiencias en la combustión y un pobre aprovechamiento de los componentes de los desechos mismos.

Para minimizar estos inconvenientes propios de la naturaleza de los RSM, se ideó el elaborar a partir de estos una mezcla combustible con mayor contenido energético, menor contenido de humedad, que mejorara la calidad de la combustión y se hiciera de un mercado propio. Así, a este material se le llamó RDF (*refuse-derived fuel*) y constituye una tecnología alterna para el aprovechamiento de los RSM como fuente de energía.

### **6.1 Antecedentes**

El proceso para obtener un combustible sólido a partir de los RSM mediante procesos físicos se conocía en muchos países desde los años setenta. En unos cuantos años se han desarrollado varios procesos para producir RDF en Estados Unidos, Reino Unido, Suecia, Japón y Países Bajos, entre otros.

En el Reino Unido ya existían plantas incineradoras desde los años cincuenta. A principios de los setenta aparecieron algunas instalaciones con recuperación de calor, incluyendo la generación de electricidad. Sin embargo, el interés por la incineración masiva disminuyó debido a problemas técnicos y financieros y se estimuló el estudio de plantas de RDF, no obstante que el producto ya se conocía desde 1959.

En los Países Bajos el reciclaje de los RSM es una práctica muy generalizada. Sin embargo, la industria del papel tomó la resolución de reducir su tolerancia del 5 al 1% en impurezas en el papel de reciclaje. Esto indujo a algunas compañías e instituciones holandesas a desarrollar la técnica del RDF mientras, al mismo tiempo, se buscaba mejorar la eficiencia en la separación de los materiales reciclables. En Holanda el interés en la combustión de RDF no es muy alto, ya que se consume principalmente gas natural.

Por otra parte, en Europa el RDF no ha tenido mucha aceptación ya que las plantas de energía a partir de combustible pulverizado son grandes y eficientes. El RDF como combustible complementario no representa tampoco ahorros importantes en los costos de estas plantas.

La compañía británica Blue Circle es uno de los pioneros en el uso de RDF dentro de la industria del cemento. En este caso se utiliza un producto doblemente pulverizado cuyas partículas tienen un tamaño de menos de 50 mm.

## 6.2 Caracterización del RDF

En la tabla 6.1, se hace una comparación para evaluar el potencial de uso como combustible de las principales fracciones de los RSM y del RDF. Cada una de las 11 características se califican con un máximo de 10 puntos, conduciendo a un máximo de 110 en total.

Idealmente, se tendría un combustible sintético, limpio y de fácil manejo, sin que represente algún riesgo a la salud, si este tuviera la puntuación máxima de 110. Sin embargo, ninguno de los componentes obtiene por sí sólo una puntuación mayor a 70.

Esto lleva a la conclusión de que algunos componentes, por ejemplo los orgánicos, se encuentran muy lejos de ser un combustible adecuado aún con una transformación más compleja. Por razones obvias, los materiales inertes como vidrio y metales, no se incluyen como candidatos.

Tabla 6.1 Potencial de uso como combustible para los componentes de los RSM <sup>a</sup>

Características	MRS	TXT	Puntuación <sup>b</sup>				RDF
			PLF	PD	ORG	PACD	
Contenido de humedad	2	6	8	8	0	5	10
Valor energético	2	5	10	3	0	8	9
Densidad de energía	2	2	0	5	2	0	9
Estabilidad biológica	1	8	10	10	0	3	9
Facilidad de almacenaje	1	8	1	8	0	2	10
Manejo	2	2	2	5	0	2	10
Emisiones ácidas	0	3	8	1	0	7	10
Emisiones de dioxinas / furanos	0	3	8	3	0	4	10
Contenido de cenizas	0	2	8	3	0	5	8
Toxicidad de las cenizas	0	2	10	2	4	7	9
Eficiencia de combustión	2	2	0	0	0	10	10
Totales	12	43	65	48	6	53	104

<sup>a</sup> Ref. de [5]

<sup>b</sup> Mezcla de RS (MRS); textiles (TXT); películas de plástico (PLF); plásticos densos (PD); orgánicos (ORG); papel y corrugado (PACD); combustible derivado de residuos (RDF)

En la tabla 6.1 se observa que las películas de plástico por sí solas parecen ser una buena materia prima para la fabricación de combustible. De hecho, si pudieran granularse para reducir su volumen e incrementar su densidad energética, encontrarían solución muchos de los problemas relacionados con su manejo y almacenamiento.

Sin embargo, en la elaboración de un material combustible, cualquier material candidato no solo debe cumplir con buenas características de manejo y almacenamiento, existiendo otro factor aún más importante: eficiencia de combustión. En las películas plásticas se presenta este problema debido a la dificultad para obtener una buena mezcla del oxígeno con los gases combustibles liberados por éstas. Es por esta razón que las películas de plástico no pueden ser un buen material combustible con una puntuación cercana a 100. La información presentada en esta tabla nos indica que si las películas plásticas fuesen mezcladas con los componentes de papel y corrugado, la eficiencia de combustión de esta mezcla mejoraría. Este es un hecho común dentro de la manufactura del RDF.

Por otro lado, el papel y el corrugado no alcanzan la puntuación deseada ya que en su forma separada, se encuentran en piezas muy largas (mayores a 150 m) y de baja densidad. Generalmente se encuentran con un alto contenido de humedad, altamente contaminados con desechos orgánicos biológicamente activos, además de que pueden contener microorganismos patógenos.

Si estos materiales se granularan, clasificaran y secaran, para después volver a ser pasados por tamices, el contenido de humedad podría abatirse considerablemente. La contaminación por microorganismos puede removerse reduciendo así las emisiones de dioxinas y furanos, además de restablecer la estabilidad biológica al material. Los agentes patógenos serían destruidos y la densidad energética incrementada, mejorando las condiciones de manejo. De esta forma, con este proceso se transforma el papel y el corrugado a una forma algo diferente a como se aprecia normalmente en los RSM: se convertirían en materias primas para la elaboración de RDF.

En la mezcla de RSM, los plásticos de alta densidad, los textiles y los materiales de origen orgánico son todos, de alguna manera, materiales combustibles. Sin embargo, la diferencia entre unos y otros radica en la puntuación que poseen en la tabla, en donde cada componente posee al menos una característica que lo hace difícil, si no es que imposible, de convertir en un buen material combustible.

Por lo tanto, los materiales que quedan son el papel, el corrugado y las películas de plástico, estas últimas si son reducidas y bien dispersas en la mezcla final. Y habiendo cumplido con la etapa de selección de materias primas, los componentes seleccionados deberán pasar por otros procesos para obtener así el material combustible deseado.

En principio, parece lógico que los componentes de papel y corrugado ya granulados clasificados, secados y tamizados pueden ser usados directamente en esa forma. De hecho, algunos procesos no cumplen con las etapas de secado y tamizado y su producto se utiliza de forma directa. En esos casos los materiales obtenidos no son estrictamente combustibles y se usan como material combustible complementario junto con otros combustibles convencionales. De esta forma, en varias plantas de potencia de los Estados Unidos se alimentan calderas de combustible pulverizado empleando papel y corrugado junto con carbón.

### 6.3 Tipos de RDF

Estados Unidos ha adoptado por medio de la *American Society for Testing and Materials (ASTM)* una norma para la clasificación de los distintos tipos de RDF la cual se muestra en la tabla 6.2. Se puede observar como en las categorías RDF-1 y RDF-2 los RSM se

consideran en su totalidad como material combustible al ser empleados con un mínimo de separación y proceso. También se aprecia que si la categoría aumenta, la calidad del combustible mejora. La última categoría corresponde a un combustible gaseoso, estado en el cual la eficiencia de combustión es máxima.

Tabla 6.2 Clasificación de la ASTM para el RDF \*

Tipo de combustible (RDF)	Descripción
RDF-1	RSM empleados como combustible sin incluir elementos de tamaño grande (mínima separación).
RDF-2	RSM procesados hasta obtener un tamaño de partícula gruesa conteniendo o no partículas de metales ferrosos. Como una subcategoría se obtiene el combustible de dimensión burda o gruesa (c-RDF), el cual es sujeto a una separación en donde el 95% de su peso se hace pasar por un tamiz con un tamaño de partícula de 6 X 6 pulgadas (15.24 cm).
RDF-3	Combustible que al ser triturado, se le ha previamente separado de metales, vidrio, y demás materia inorgánica. El tamaño de partícula de este material es el resultado de hacerlo pasar en un 95% por una malla de 2 X 2 pulgadas (5.08 cm). Es conocido como combustible mullido (f-RDF).
RDF-4	Es aquella fracción de material combustible que ha sido procesada hasta lograr un polvo de tal forma que en su 95% logra pasar a través de un tamiz de 0.035 X 0.035 pulgadas (0.089 cm). Clasificado como combustible pulverizado (p-RDF).
RDF-5	Es también aquella fracción de material combustible que ha sido procesada hasta obtener un combustible denso en forma de pastillas o formas similares (d-RDF).
RDF-6	Fracción combustible de los RSM que es procesada hasta obtener un combustible líquido.
RDF-7	Fracción combustible de los RSM que es procesada hasta obtener un combustible en estado gaseoso.

\* Ref de [5]

El RDF se ha clasificado básicamente en tres categorías en función de sus propiedades:

- RDF mullido o *flock refuse-derived fuel* (f-RDF)  
Definido como "un producto no denso manufacturado a partir de la fracción combustible de los RSM por medio de procesos mecánicos sofisticados y empleando calor, con un tamaño de partícula por lo menos en un 90% menor a 10 mm, y con un contenido de cenizas no mayor a 15% antes de la adición de cualquier sustancia que mejore las propiedades del combustible".<sup>[5]</sup>
- RDF de dimensión burda o *crumb refuse-derived fuel* (c-RDF)  
Conocido en también en Estados Unidos como *coarse refuse-derived fuel*. Se define como "un producto manufacturado a partir de la fracción combustible de los RSM por medio de procesos mecánicos y empleando calor, llevado a una densidad no menor a 300

kg/m<sup>3</sup>, y con un contenido de cenizas no mayor a 15% antes de la adición de cualquier sustancia que mejore las propiedades del combustible".<sup>[5]</sup>

- RDF densificado o *densified refuse-derived fuel* (d-RDF)

Definido como "un producto manufacturado a partir de la fracción combustible de los RSM por medio de procesos mecánicos y empleando calor, llevado a una densidad no menor a 600 kg/m<sup>3</sup>, y con un contenido de cenizas no mayor a 15% antes de la adición de cualquier sustancia que mejore las propiedades del combustible".<sup>[5]</sup>

El proceso de fabricación del RDF es sumamente flexible y en general se pueden mencionar otras modalidades:

**RDF en polvo o ECO-fuel-II.** Es un proceso desarrollado por las compañías estadounidenses *Combustion Equipment Associates* y *Arthur D. Little Inc.* El proceso parte de un tamizado inicial, separación magnética y clasificación por aire usando gases calientes de combustión. La fracción ligera, parcialmente seca, pasa a un trómel secundario que remueve los finos incombustibles restantes. Se agrega un agente endurecedor patentado a base de sustancias químicas inorgánicas en un trómel para destruir la resistencia de la fibra de los materiales celulósicos; de aquí, el material pasa a un molino de bolas donde se seca y pulveriza entre 100 y 200°C. El producto se tamiza en tres fracciones; los gruesos van al relleno o a la recuperación de aluminio, los medios regresan al molino de bolas y los finos, menores de 1mm, constituyen el ECO-fuel-II.

El poder calorífico inferior es de 16,000 kJ/kg. Por este método se recupera alrededor del 80% del contenido energético de los residuos y cerca del 50% de su peso; la eficiencia de su uso es de 75% en promedio y la equivalencia de sustitución del carbón es de 1.08.

**RDF a base de papel.** Algunos procesos europeos recuperan un producto a base de papel y plástico, principalmente. Muchos de estos procesos están dedicados a la recuperación de materiales y el RDF se considera como una opción intermedia en espera de que se desarrollen técnicas y mercados.

**RDF húmedo.** Por lo general el producto del proceso se usa con un 50% de humedad y requiere combustores diseñados específicamente para este fin. Sin embargo, es mucho más homogéneo, tiene un poder calorífico inferior muy uniforme y se quema de manera más estable que el producto en seco (ver figura 6.1).

Es importante mencionar que no todas las aplicaciones requieren de un nivel tan alto de sofisticación en el material combustible. La producción de RDF esta abierta a satisfacer diversas aplicaciones con distintos grados de refinamiento en el material combustible, con el fin de cumplir con las normas técnicas, tanto de eficiencia como de manejo, así como las normas ambientales que son las que en último momento pueden determinar su uso.

El RDF también se presenta como una alternativa para sustituir el uso de combustibles fósiles en instalaciones industriales, minimizando paralelamente la demanda de estos así como sus impactos al medio ambiente.

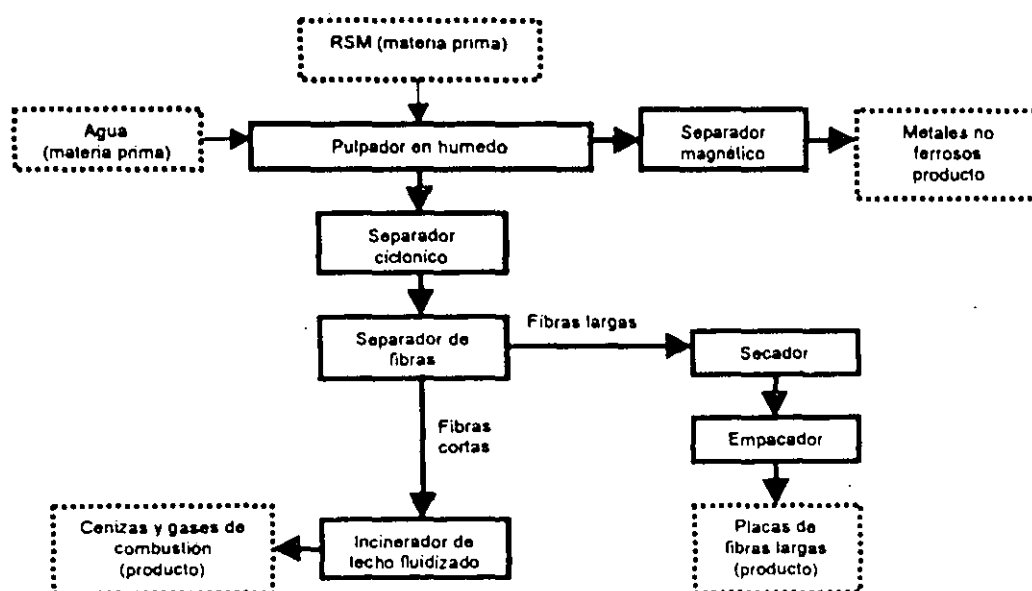


Figura 6.1 Proceso de la compañía Black-Clawsan para producir RDF por vía húmeda. [7]

#### 6.4 Diseño actual de los procesos de producción

Ya se ha visto que las tecnologías para la producción de RDF están orientadas a convertir los RSM en un combustible que se adapte a las necesidades del consumidor. Estas tecnologías son distintas en Norteamérica y Europa, y se debe a que en Estados Unidos las pequeñas plantas de potencia incineran los RSM granulados, pero con una mínima separación junto con combustibles fósiles (co-combustión), mientras que en Europa, particularmente en el Reino Unido, este tipo de plantas de potencia no existen y el objetivo es producir un combustible de mayor calidad.

Sin embargo, existen factores en común dentro de las tecnologías existentes y uno de ellos es que el primer paso de las líneas de producción consiste en la reducción de tamaño (molienda). En Estados Unidos un gran número de plantas fueron construidas bajo el principio de granular antes de realizar una separación de los RSM, como puede verse en el proceso ilustrado por la figura 6.2.

Además de ser comunes en estos procesos los pasos de triturado, también lo son los de clasificación por aire y los de tamizado ya sea por tambores o por arreglos vibratorios. La separación magnética se realiza en el proceso con el fin de recuperar metales ferrosos, y después de este proceso en si limitado se consideraba que el producto obtenido era un material combustible refinado.

No obstante, existen varios inconvenientes en estas líneas de proceso:

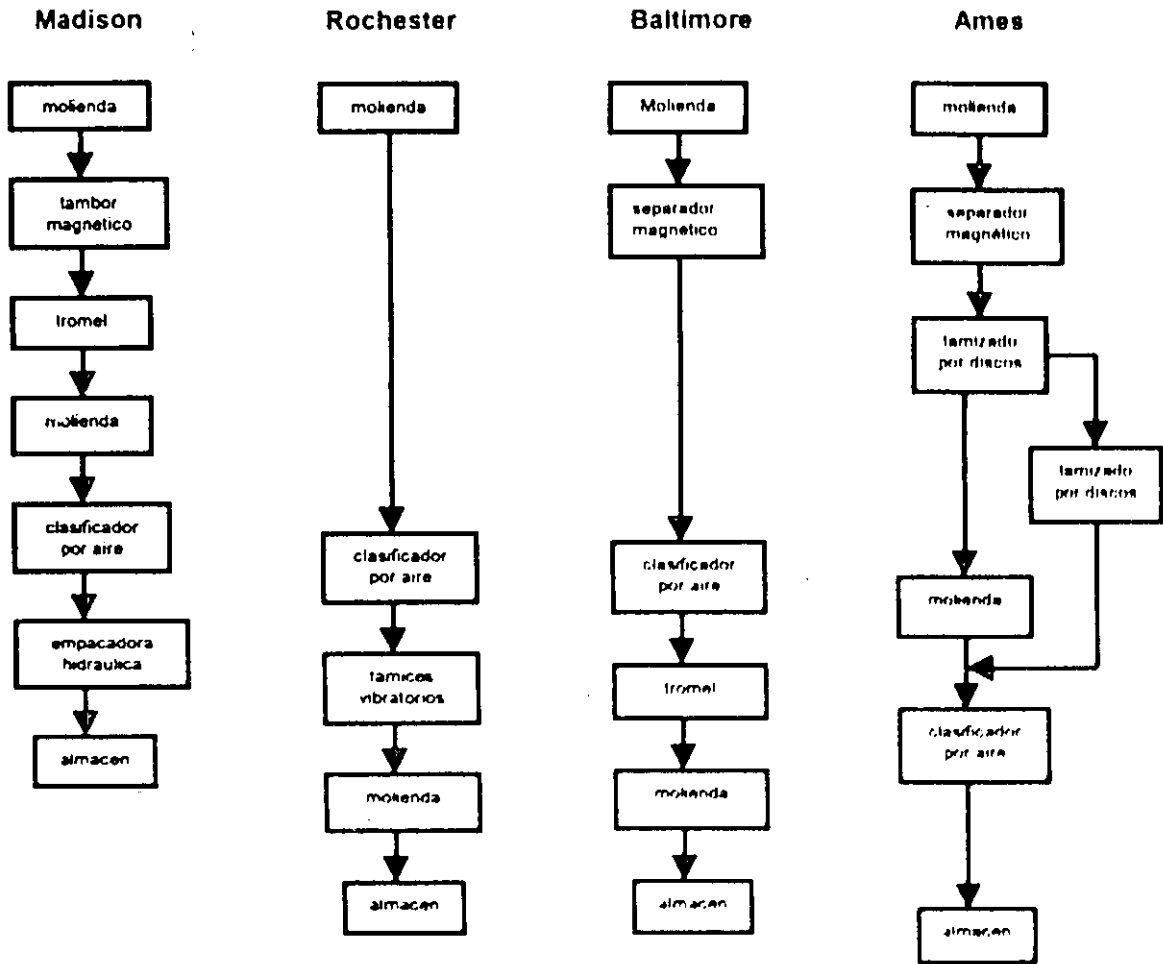


Figura 6.2 Sistemas de producción en Estados Unidos [5]

1. Los clasificadores por aire cuyo objetivo es el separar la fracción combustible de la mezcla de RSM, son particularmente ineficientes al separar mezclas de materiales finamente triturados debido a que el flujo de aire recupera la fracción combustible menos densa llevándose consigo fracciones de materia orgánica y material inerte pertenecientes a la mezcla original.
2. Una vez que los materiales son granulados los tamaños de partícula se uniformizan. Esto es, las partículas de la fracción combustible así como las de las demás poseen un tamaño similar. En estas condiciones los tamices donde la separación se basa en la diferencia de tamaños de partícula no pueden operar de manera eficiente.
3. Durante la granulación se da una mezcla más íntima de las fracciones de los RSM incrementándose en varios órdenes de magnitud el contenido de humedad y la contaminación por materia orgánica en la fracción combustible. El resultado de esto repercute en la calidad del producto terminado al obtenerse un combustible de baja eficiencia energética y en un alto potencial de emisiones peligrosas.

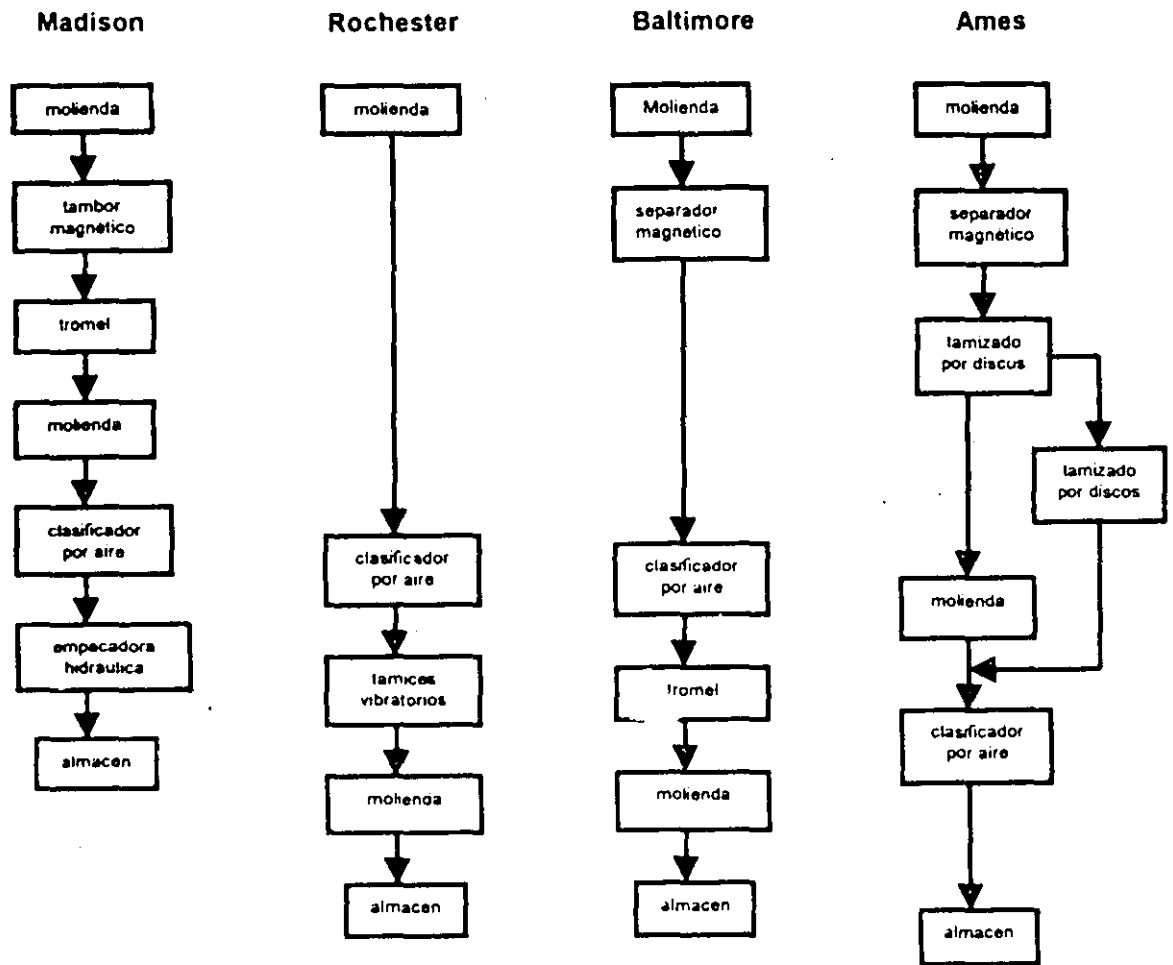


Figura 6.2 Sistemas de producción en Estados Unidos. [5]

1. Los clasificadores por aire, cuyo objetivo es el separar la fracción combustible de la mezcla de RSM, son particularmente ineficientes al separar mezclas de materiales finamente triturados debido a que el flujo de aire recupera la fracción combustible menos densa llevándose consigo fracciones de materia orgánica y material inerte pertenecientes a la mezcla original.
2. Una vez que los materiales son granulados, los tamaños de partícula se uniformizan. Esto es, las partículas de la fracción combustible así como las de las demás poseen un tamaño similar. En estas condiciones los tamices, donde la separación se basa en la diferencia de tamaños de partícula, no pueden operar de manera eficiente.
3. Durante la granulación se da una mezcla más íntima de las fracciones de los RSM, incrementándose en varios órdenes de magnitud el contenido de humedad y la contaminación por materia orgánica en la fracción combustible. El resultado de esto repercute en la calidad del producto terminado al obtenerse un combustible de baja eficiencia energética y en un alto potencial de emisiones peligrosas.



Mientras tanto en el Reino Unido, durante las décadas de los 70's y 80's, se practicó la incineración con recuperación de calor y la producción de RDF en espera de solucionar los problemas de disposición final de los RSM. Con el tiempo se llegó a la conclusión de que la incineración en masa era antieconómica en un país donde los costos de disposición en rellenos sanitarios eran considerablemente bajos. La incineración con recuperación de calor era después de todo más cara y aunque generaba ciertos ingresos, solo era apropiada en donde la cantidad de RSM era grande. La producción de RDF presentó los más bajos costos de inversión, alta flexibilidad en su almacenamiento y un producto final atractivo que en teoría podía ser vendido a buen precio.

Así, en ese país se siguieron los pasos de los diseños norteamericanos al incorporar en sus primeras etapas la trituración, luego el tamizado y la clasificación e intentaron producir un combustible en forma de pastillas usando máquinas para la elaboración de alimentos para animales. Este último paso fue aceptado porque minimizaba los costos de transporte a los lugares de consumo.

Sin embargo, el resultado de realizar la trituración en el primer paso fue el obtener un producto con alto contenido de humedad, lo cual hacía difícil su densificación. Además, el producto presentaba inestabilidad biológica, lo cual lo hacía un producto inaceptable en la industria. La solución consistió en realizar un secado de la fracción combustible hasta obtener un contenido de humedad aceptable. En este sentido la metodología del proceso divergió en dos corrientes.

La primera, adoptó un sistema conocido como "3-D" (figura 6.3), en donde los materiales son granulados, tamizados, clasificados, predensificados, secados y finalmente convertidos en pastillas. En la etapa de clasificación se lleva a cabo una separación de metales ferrosos para que en la primera etapa de fabricación de pastillas no se presenten daños al equipo. El paso inicial en la elaboración de pastillas requirió del uso de secadoras, en donde lo común fue usar máquinas de secado rotatorias tipo cascada. Estas secadoras poseen un tambor rotatorio largo similar al de un horno cementero, por el cual en un extremo se alimentan los materiales haciéndolos pasar lentamente a través de una corriente de gases de escape provenientes de un quemador. De esta forma, los desechos pierden humedad y salen por el otro extremo de la secadora.

Debido a que la fracción combustible se granulaba hasta obtener un tamaño de partícula menor a los 50 mm, su densidad era muy baja (entre 30 y 60 kg/m<sup>3</sup>). La única forma de asegurar que el material permaneciera por suficiente tiempo dentro de la corriente de gases para lograr un secado más eficiente era incrementar esta densidad.

No obstante, se detectó que los molinos incrementaban de manera significativa la contaminación de los combustibles con partículas orgánicas e inertes. La primera etapa de la fabricación de pastillas adhería estos contaminantes al producto final de tal manera que hacía imposible cualquier tipo de refinamiento posterior. Las pastillas producidas tenían un contenido de cenizas cercano al 20% en peso y un contenido de cloro mayor a 1.5%.

Por lo tanto, este combustible al tener una densidad de energía menor a la de los combustibles fósiles convencionales, es necesario quemar cantidades considerablemente mayores de este para obtener la misma cantidad de energía.

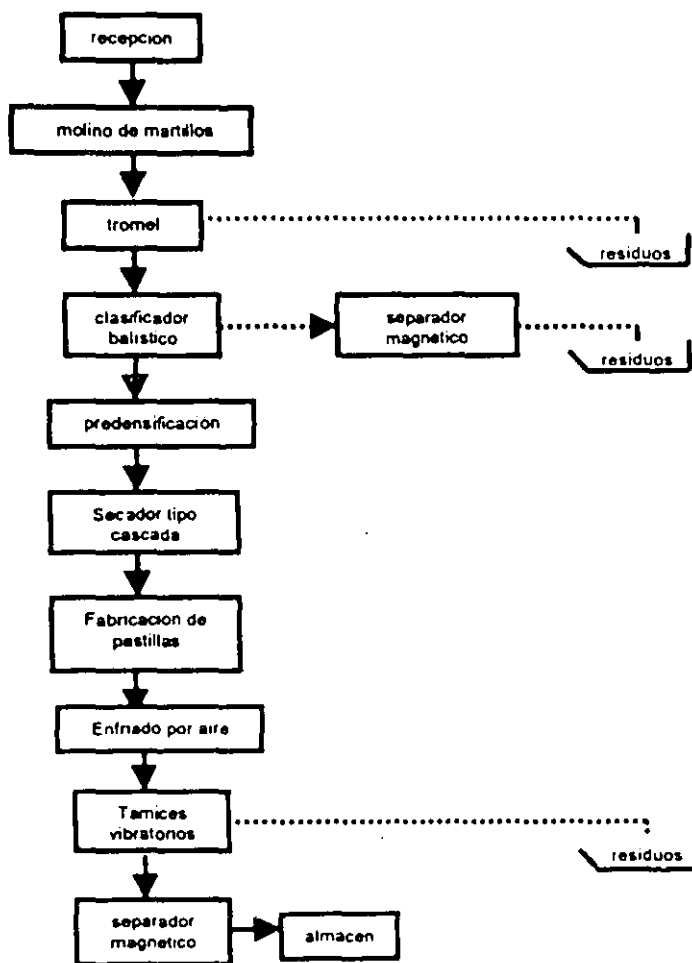


Figura 6.3 Sistema "3-D". [5]

El segundo método en paralelo que se presentó en el Reino Unido fue llevado a cabo en una planta piloto por la compañía *Buhler Miag* en Suiza. En este proceso (figura 6.4) se trituraban los materiales en la primera etapa, pero después se optó por llevar a cabo en primer lugar un proceso de tamizado (figura 6.5).

La trituración se realizó sólo para la fracción combustible y el proceso se llevó a cabo en el siguiente orden: tamizado, triturado, clasificación por aire, secado, tamizado nuevamente y por último la densificación. Las secadoras empleadas fueron básicamente sistemas que operaban con gases calientes de combustión provenientes de quemadores de gas natural, llamadas "líneas termoneumáticas".

La gran ventaja del principio de secado termoneumático consistía en que, sin la necesidad de una predensificación, los contaminantes no se adherían al producto final. Una vez que la fracción combustible estaba libre de humedad, los residuos orgánicos e inertes podían pasar fácilmente por tamices de malla fina, con un tamaño de partícula de máximo 5 mm. Esto facilitaba la separación de los contaminantes ya que tenían un tamaño de partícula mucho menor que el de los materiales combustibles.

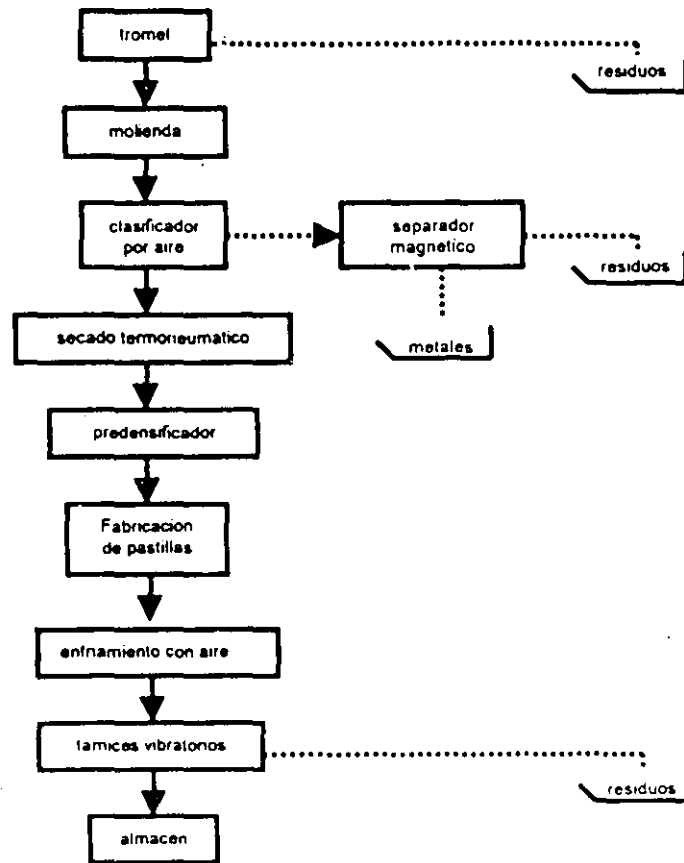


Figura 6.4 Sistema anglo-suizo "Eastbourne". [5]

En las líneas de producción, los molinos no causaron los problemas de mezclado observados anteriormente debido a que trabajaban con un material libre de contaminantes. El efecto de un mejor tamizado llevó a la remoción de casi todo el vidrio, cenizas y materia orgánica, dejando sólo metales, plásticos, papel y cartón. Ya en este punto, la mezcla de materiales consistía de componentes muy pesados y componentes muy densos, haciéndola ideal para un proceso de clasificación por aire.

El proceso final de tamizado se llevó a cabo con el fin de eliminar las partículas inertes y reducir el contenido de cenizas del producto final. No obstante, existen otros beneficios. Se encontró que la mayor proporción del cloro presente en el producto provenía de las partículas inertes, como metales pesados y silicatos. Debido a este proceso, el material combustible obtenido tenía un contenido de cenizas final menor al 10% en peso y un contenido de cloro menor al 0.5%. La ausencia de materiales inertes como silicatos, hizo que el poder calorífico se elevara de tal forma que era posible producir un combustible en forma de pastillas con un contenido energético muy cercano al del carbón mineral de uso industrial.

Los procesos aquí descritos son solo algunos de los desarrollos más recientes a nivel mundial para la obtención de combustibles refinados a partir de los RSM. Todos ellos ilustran los conceptos básicos generales que hay que tomar en cuenta para el diseño de un proceso de este tipo.

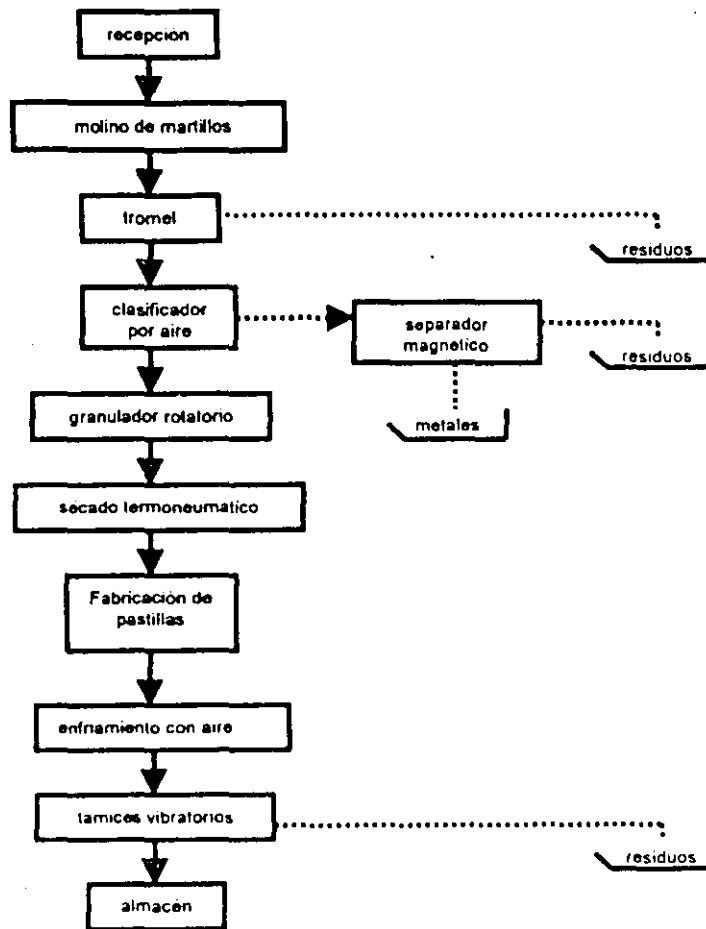


Figura 6.5 Sistema "Eastbourne" mejorado. [5]

De ellos se concluye, que para obtener el RDF, los RSM deben ser separados en sus componentes. Cada fracción puede ser separada por su diferencia en densidades, tamaños de partícula o su sensibilidad a fuerzas electromagnéticas. Por lo tanto, todos los procesos de obtención de RDF deben emplear clasificación balística o por aire, la cual se basa en la diferencia de densidades; procesos de tamizado, basados en las diferencias de tamaño de partícula; y extracción de metales, realizada por medio de fuerzas de tipo electromagnéticas. Todos los demás procesos como el triturado y el secado son de carácter auxiliar.

El orden en que estos pasos sean implantados en una línea de producción determina la calidad del producto, pero es necesaria una apropiada combinación de estos para llegar al producto final.

### 6.5 Descripción de las etapas del proceso de obtención

El equipo de proceso empleado para la producción de RDF varía según las necesidades del usuario y la calidad del combustible requerido. El proceso a seguir para la obtención de un combustible en forma de pastillas cumple con los siguientes pasos.

### 6.5.1 Reducción de tamaño

Consiste usualmente en el primer paso de la producción de RDF con la intención de modificar las características físicas de la mezcla de RSM, de tal forma que sus componentes sean fáciles de remover y para separar determinados materiales y remover partículas contaminantes. No obstante, ya se ha mencionado que esto puede causar problemas durante la separación de las fracciones de los RSM.

Una segunda etapa se puede llegar a realizar en los casos donde se necesite de un combustible en forma de partículas muy finas. Los molinos de martillos así como los molinos de cuchillas son los dispositivos más usados para este fin.

Los molinos de martillos reducen el tamaño de los materiales mediante el impacto y desgarre de martillos giratorios adaptados a un eje. Son muy efectivos para triturar materiales frágiles. Estos molinos pueden ser de tipo vertical u horizontal (figura 6.6), dependiendo esto del plano en el cual los martillos giran. El tamaño de las partículas depende del espacio comprendido entre los martillos, el espacio entre estos y la carcaza, y su velocidad de rotación (entre 700 y 1200 r.p.m.). Los martillos se reemplazan periódicamente debido a la acción abrasiva de los materiales introducidos, lo cual provoca desgaste.

Los molinos con aspas hacen la reducción del material por medio del impacto, corte y trituración. Suelen tener uno o dos rotores provistos de martillos, cuchillas, o aspas (figura 6.7). A diferencia de los molinos de martillos, estos no poseen rendijas de descarga, ni tampoco se realiza una molienda posterior de los residuos remanentes. Son apropiados para las primeras etapas de trituración, ya que no se puede controlar el tamaño de la partícula resultante.

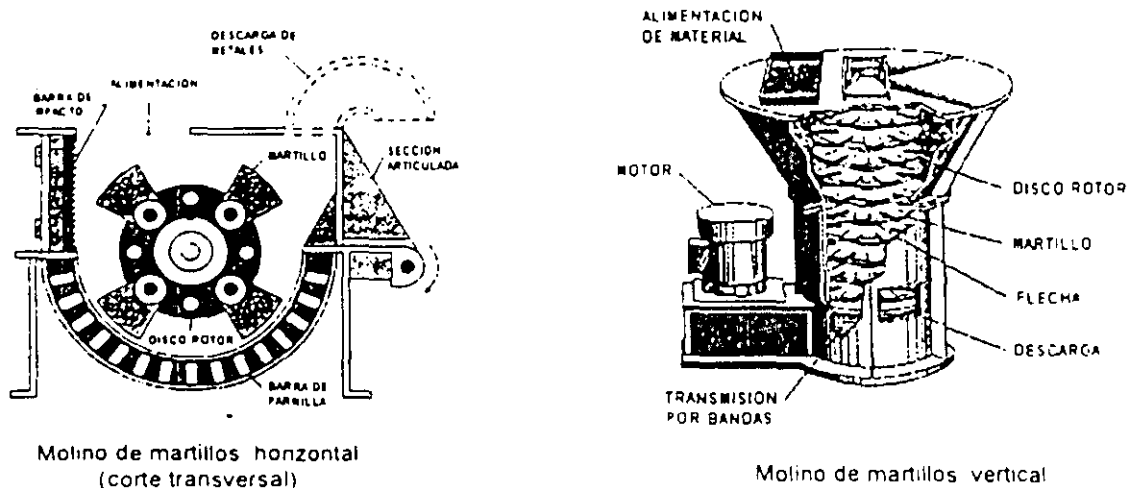


Figura 6.6 Tipos de molinos de martillos. [9]

En los diseños con un solo rotor los dispositivos de impacto golpean el material y lo lanzan contra una placa o un yunque. En el arreglo con doble rotor, la reducción ocurre cuando los desechos pasan entre dos rotores que giran en direcciones opuestas.

Los molinos de cuchillas hacen trizas el material mediante cuchillas rotatorias adaptadas en ejes horizontales (figura 6.8). En comparación con los molinos de martillos, son dispositivos que trabajan a menor velocidad, entre 60 y 190 rpm. Son impulsadas en su mayoría por motores hidráulicos que pueden trabajar en reversa. Tienden a producir un residuo más uniforme, por lo que son muy adecuados para procesar además de residuos urbanos algunos desechos industriales, llantas, textiles y películas plásticas.

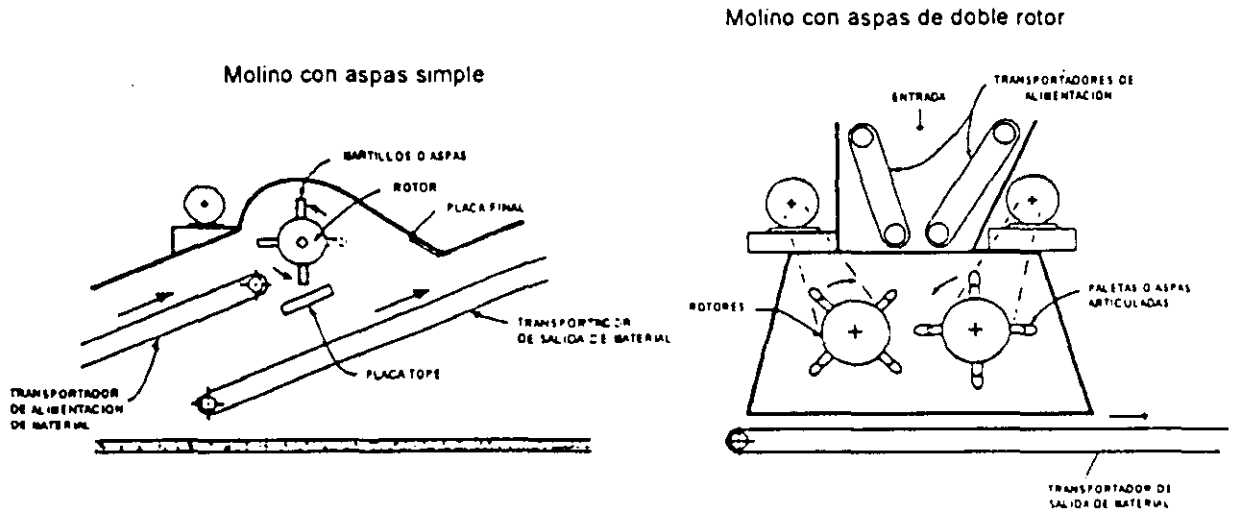


Figura 6.7 Tipos de molinos con aspas. [4]

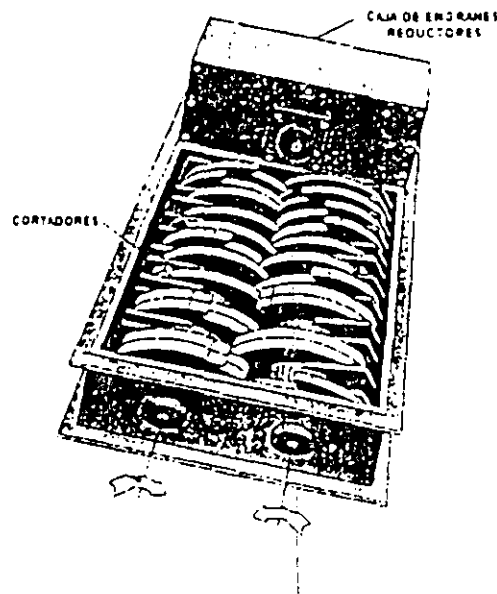


Figura 6.8 Molino de cuchillas. [9]

### 6.5.2 Separación

El objetivo de la separación es el producir un material combustible más uniforme al remover aquellos materiales no combustibles. Es posible tener una separación mas minuciosa para obtener un producto de mayor calidad. La separación mejora el valor

energético del combustible, incrementa su facilidad de manejo y su eficiencia de combustión. De la etapa de separación depende la operación exitosa de las siguientes etapas de reducción de tamaño y de los procesos de recuperación de materiales presentes en la línea de producción. Una amplia variedad de sistemas de separación provenientes de la industria minera ha sido usada para este propósito, entre ellos se encuentran los trómeles, tamizadoras con discos, tamices vibratorios, y clasificadores por aire.

El trómel (figura 6.9) consiste en un cilindro largo e inclinado, que se encuentra perforado para dejar pasar materiales de determinados tamaños. Puede estar construido en una, dos, o más secciones, contando cada una con un tamaño de retícula diferente para separar diferentes tamaños de partícula. Es usado también para remover el material no combustible a partir de aquél ya triturado y clasificado por aire.

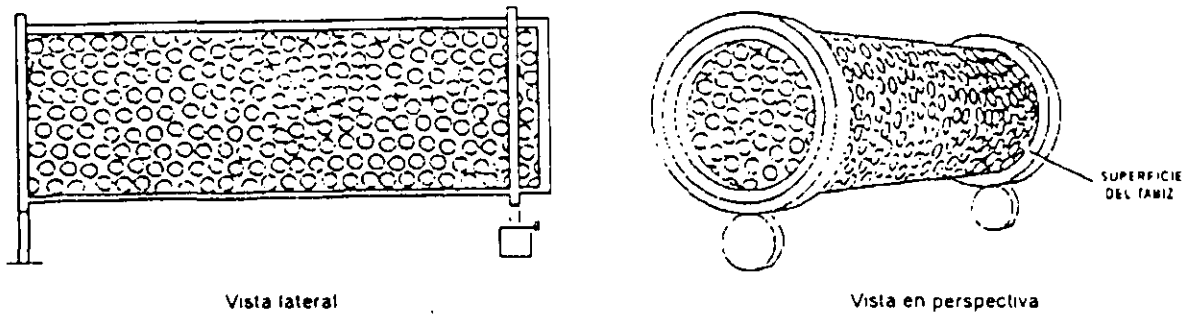


Figura 6.9 Trómel. [4]

Las tamizadoras con discos (figura 6.10) son sistemas con ejes horizontales dispuestos en forma perpendicular al flujo de material. Estos ejes poseen discos que pueden ser circulares o en forma de estrella, de tal forma que los discos de los ejes adyacentes se traslapan, formando una especie de retícula. La rotación de los discos desplaza al material largo a través del sistema, provocando la caída de las partículas más pequeñas. Estos sistemas pueden ser usados para remover arena o materiales muy pequeños antes de pasar por una segunda etapa de molienda y reducir así la carga en los molinos secundarios. También son útiles en la separación de papel y cartón en las plantas de recuperación de materiales.

Los tamices vibratorios de tipo plano están hechos de nylon o de alambre. Mediante la vibración logran hacer pasar al material a través de la malla facilitando el paso de las partículas pequeñas. Pueden ser usados para remover vidrio y otras partículas inorgánicas de tamaño pequeño.

La clasificación ha sido la técnica empleada para la separación de un material de otros por medio del flujo de un fluido o medios balísticos, proceso cuyo principio radica en la diferencia de densidades de los materiales. En los clasificadores por aire se usa una corriente de aire para remover las partículas menos densas y separar una fracción ligera que contenga en su mayor parte material combustible. Aquellas partículas que caen de la corriente de aire conforman la fracción pesada, la cual incluye combustibles pesados, metales y material inerte. Los mejores resultados se alcanzan cuando la clasificación por aire es usada después de la molienda.

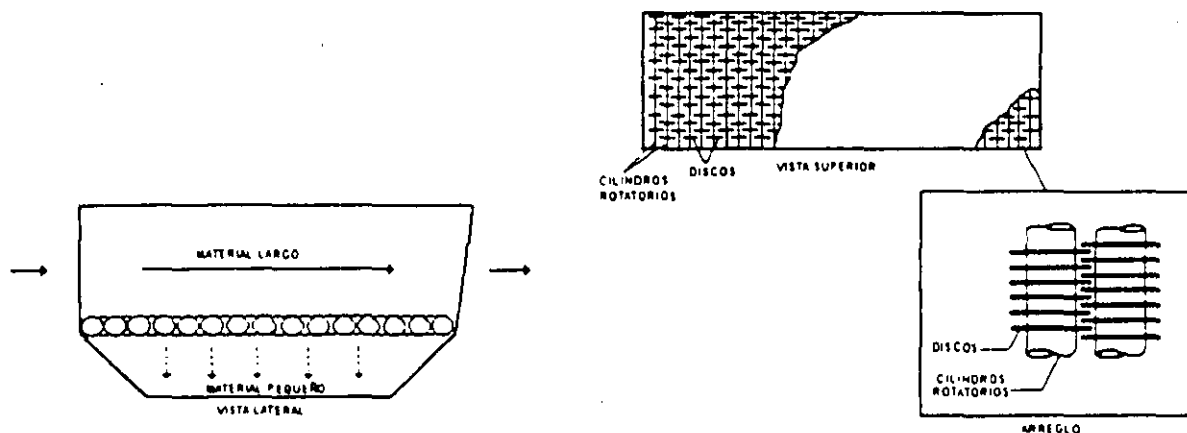


Figura 6.10 Tamizadora con discos. [4]

Los clasificadores por aire son dispositivos muy comunes en las etapa inicial y final de tratamiento. Existen cuatro variantes del principio general de la clasificación por aire: clasificadores de columna, clasificadores en zig-zag, clasificadores de tambor y el diseño de cuchillas de aire.

Los clasificadores de columna (figura 6.11) son estructuras largas y simples, que consisten en un ducto vertical de sección rectangular en donde se introduce aire por medio de un ventilador a altos volúmenes y bajas presiones. El material a separar se introduce a un lado de la columna y a corta distancia de la base. El aire entra lo más cercanamente posible al ángulo recto. Dependiendo de la velocidad del aire, alguna parte o toda la fracción ligera del material entra a la corriente de aire. Posteriormente, ésta es separada de la corriente de aire por un ciclón ubicado entre la columna y el ventilador. La fracción pesada cae a través de la corriente para ser recuperada en la base de la columna.

Los clasificadores en zig-zag (figura 6.11) deben su nombre al arreglo de escalones inclinados dentro de la cámara de separación. Durante su operación, el material se introduce por la acción de un distribuidor rotatorio localizado en la parte superior, de tal forma que el material cae desde el escalón más alto y deslizándose por los demás en tanto la corriente de aire acarrea los materiales más ligeros. En la base del arreglo se depositan los materiales pesados para su recuperación.

Los clasificadores de tambor son dispositivos poco comunes aunque existen en algunos procesos de tratamiento de residuos. Consisten en un tamiz rotatorio por el cual pasa aire dentro de una cámara de recuperación de materiales. Son en si una combinación de procesos de tamizado y clasificación por aire. Cuando la mezcla de desechos se tamiza, la acción rotatoria del tambor provoca que estos se eleven a una altura considerable y caigan por gravedad a la superficie reticulada. La resistencia a la corriente de aire provoca una separación de los materiales ligeros y los pesados de una manera natural, con la posibilidad de capturar la fracción ligera dentro de la misma. Son dispositivos poco eficientes, ya que requieren de mayores presiones de trabajo que cualquier otro tipo de clasificador de esta clase.



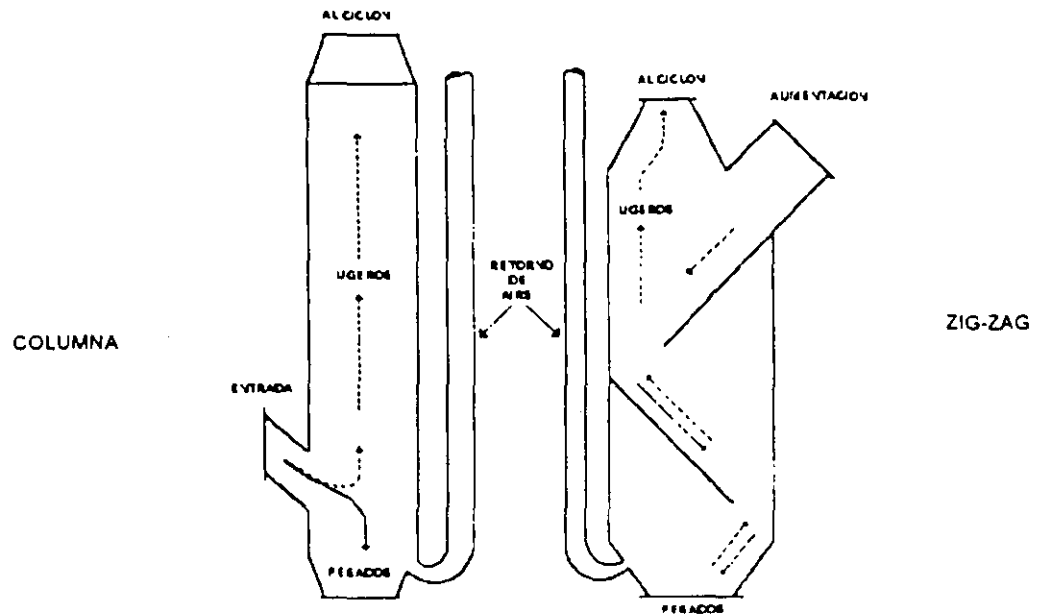


Figura 6.11 Sistemas de clasificación por aire. [9]

Los clasificadores balísticos fueron introducidos en la industria del RDF con el fin de contar con una alternativa más económica. En cierta forma, algunos clasificadores balísticos operan como clasificadores por aire en reversa. Los clasificadores balísticos de banda conducen la mezcla de materiales a alta velocidad dentro de un medio con aire estacionario. Teóricamente el efecto es el mismo, en donde los elementos pesados no se ven afectados por la corriente de aire y son llevados a cámaras de recuperación. Mientras tanto, los elementos ligeros son vencidos por la resistencia que opone el aire y caen de forma separada. La ventaja de estos diseños está en que no se requieren de aire en movimiento, por lo que no son necesarios ventiladores, ciclones y plantas de extracción de polvos.

La figura 6.12 muestra un clasificador balístico oscilante. En este diseño, un conjunto de placas perforadas está montado en las manivelas de dos cigüeñales paralelos, de tal forma que al girar estas placas poseen un movimiento oscilatorio circular de alta velocidad.

Las placas se encuentran inclinadas, lo que hace que las partículas viajen de forma ascendente hasta llegar al punto más alto. Las partículas pesadas caen por las perforaciones de las placas durante el viaje y son recolectadas por una banda transportadora. Los elementos pesados más largos caen por la pendiente de las placas a un transportador localizado por debajo de la alimentación. La máquina en si realiza una separación por tres vías, recogiendo la fracción pesada más fina, otra fracción pesada pero de mayor tamaño y una fracción ligera.

Los ciclones son ampliamente usados en la industria y son fundamentales en casi cualquier proceso de obtención de RDF. Un separador de este tipo es un dispositivo sin elementos móviles (figura 6.13).

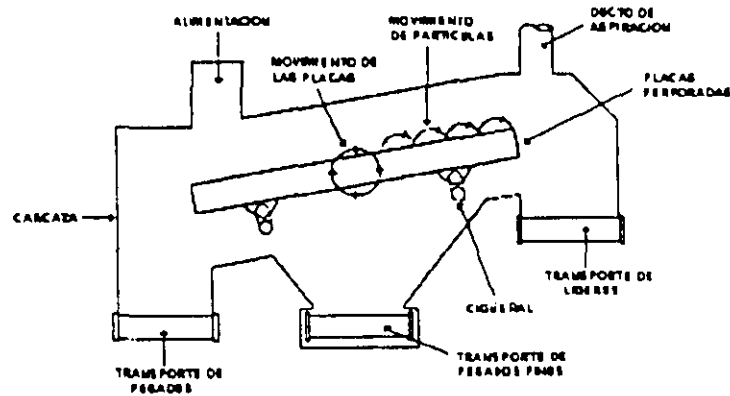


Figura 6.12 Clasificador balístico tipo oscilante. [5]

El principio de operación consiste en la fuerza centrífuga generada por la circulación de aire a alta velocidad dentro de la carcasa. El aire y el material se introducen de forma tangencial a la cámara, en donde la única salida es un tubo de escape ubicado en la parte central. Conforme la mezcla de aire y materiales gira, las fuerzas centrífugas generadas afectan tanto al aire como a su contenido. Sin embargo, como la densidad del aire es siempre menor, el material es el que experimenta mayormente los efectos de dichas fuerzas.

Por lo tanto, el material es lanzado a la periferia de la carcasa mientras que el aire, no teniendo otro escape, sale por el tubo central. En la periferia de la carcasa existe fricción entre la mezcla aire-material y la superficie de la misma, creando una capa en donde las fuerzas pierden magnitud prevaleciendo una zona de bajas velocidades. Esto provoca que el material caiga libremente hacia una tolva de extracción.

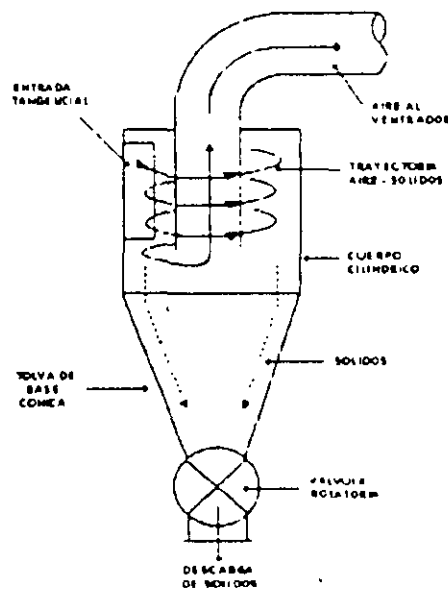


Figura 6.13 Separador tipo ciclón. [5]

### 6.5.3 Densificación

En la producción de RDF densificado (d-RDF) se requiere de altas presiones para compactar la fracción ligera de los RSM una vez que han sido sujetos a una o varias etapas de molienda y clasificados por algún método de los ya mencionados. Para mantener las partículas del producto unidas se emplean materiales aglomerantes como la parafina.

Las máquinas predensificadoras (figura 6.14) no generan un producto con la forma ni la densidad necesaria para este tipo de combustible. Estas trabajan en varias etapas en donde el material de baja densidad es compactado de forma previa a la fabricación de pastillas, forma mejor conocida como *pellets*.

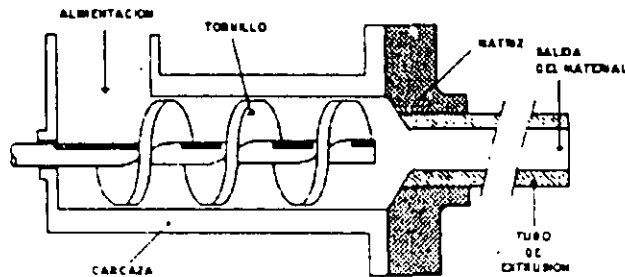


Figura 6.14 Predensificador de tornillo. [5]

Mientras un RDF seco posee una densidad de  $30 \text{ kg/m}^3$ , éstas máquinas pueden elevar esta cifra hasta  $800 \text{ kg/m}^3$ . Entre más comprimida esté cada partícula, mayor será su contenido energético por unidad de volumen.

Las máquinas usadas en la producción de RDF tienen su origen en aquellas empleadas en la elaboración de alimentos para animales. Existen dos diseños disponibles en el mercado, difiriendo únicamente en el sistema de matriz empleado. No obstante, el principio general de ambos consiste en una matriz cilíndrica de acero y perforada con agujeros cónicos en su entrada, formando un arreglo en donde internamente están montados unos rodillos de menor diámetro. En uno de estos diseños, (figura 6.15), la matriz gira alrededor de rodillos fijos.

En el otro diseño los rodillos giran alrededor de una matriz fija. Las matrices se fabrican con aleaciones de acero endurecido, debido a que el papel granulado es muy abrasivo, y es deseable tener un desgaste uniforme a lo largo de la vida útil de la máquina. En las máquinas con matriz rotatoria, la fuerza motriz proviene de un conjunto de engranes impulsados por motores eléctricos.

### 6.6 Recuperación de materiales

La recuperación de materiales en las líneas de producción de RDF se hace por tres razones:

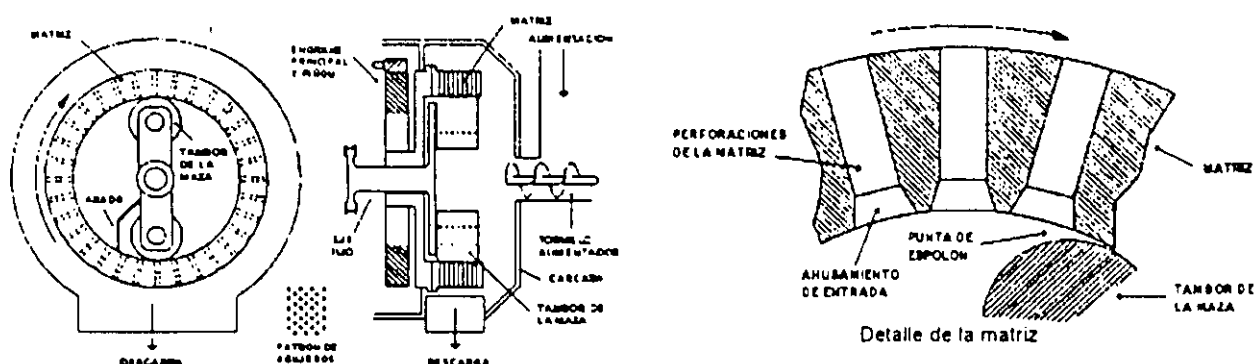


Figura 6.15 Máquina de matriz rotatoria para la elaboración de pastillas. [5]

1. Para remover materiales como vidrio y metales que pudieran causar problemas de desgaste en la maquinaria (en molinos y maquinaria para la elaboración de pastillas) y problemas durante la operación en calderas.
2. Para reducir el volumen de residuos a ser dispuestos en rellenos sanitarios por medio del reciclaje.
3. Para generar ingresos a la planta de separación por medio de la venta de materiales que pueden tener un nuevo uso.

Entre los materiales recuperados por medios mecánicos están los metales ferrosos, metales no ferrosos (especialmente aluminio) y vidrio.

### 6.6.1 Metales ferrosos

Los metales ferrosos pueden ser separados de los RSM durante la molienda o a partir de la fracción pesada remanente en el proceso de clasificación por aire. Los dispositivos empleados para este fin son los separadores magnéticos y los separadores electrostáticos. Estas técnicas de separación se basan en las propiedades eléctricas y magnéticas que poseen algunos materiales mediante el uso de imanes permanentes.

En términos de la cantidad de material recuperado, la eficiencia de la separación magnética en una sola etapa es del 80%. Esta eficiencia considera el proceso de separación a partir de RSM ya triturados. Sin embargo, la separación puede mejorarse con la adición de más etapas o el empleo de diversos métodos en conjunto. Existen básicamente dos diseños para estos sistemas, uno por medio de bandas transportadoras y otro por medio de tambores (figura 6.16).

### 6.6.2 Aluminio

Una corriente de materiales rica en aluminio se puede obtener después de la clasificación por aire y de un proceso de tamizado de la fracción ligera. El aluminio se separa usualmente por medio de un separador de corrientes de *eddy*.

El proceso consiste en provocar corrientes de *eddy* en objetos conductores y no magnéticos al hacerlos pasar rápidamente por un fuerte campo magnético. Las corrientes

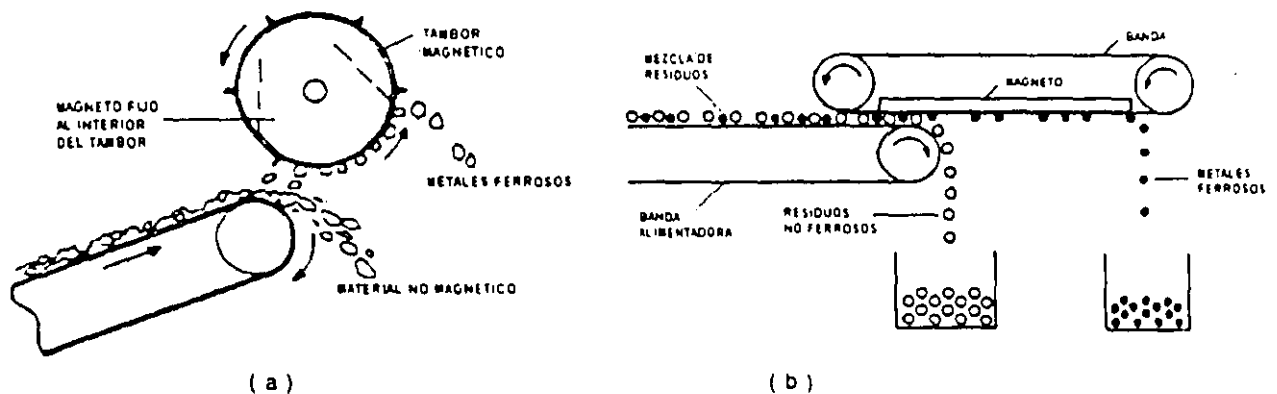


Figura 6.16 Tipos de separadores magnéticos: (a) de tambor, (b) por bandas. [4]

eléctricas que fluyen momentáneamente en los objetos, generan campos magnéticos opuestos al original, provocando una fuerza repulsiva que hace que los objetos sean desplazados.

Debido a que la mayoría de los metales conducen la electricidad en forma distinta, sus campos magnéticos también lo son. Esto da por resultado que algunos metales sean rechazados con mayor fuerza que otros, logrando así recuperar cada uno de estos dentro del separador (ver figura 6.16).

### 6.6.3 Vidrio

El vidrio se puede recuperar durante el tamizado y la clasificación por aire de la fracción pesada. Dependiendo de su pureza, el vidrio claro, verde y ámbar puede ser usado para la fabricación de materiales de construcción o reciclado para la elaboración de nuevos productos.

## 6.7 Aspectos sobre la combustión de RDF

La combustión de RDF aún es estudiada. En algunos países no se han precisado técnicas y reglamentos con respecto a sus emisiones, al menos no como se ha hecho con la incineración en masa.

Las emisiones de cloruros pueden ser más altas que en la combustión del carbón. Esta es una razón por la cual no sea completamente aceptado este combustible. Otro problema específico que se deriva de la combustión de RDF, es la dificultad para predecir la carga térmica en un horno correspondiente a un flujo masivo de RDF. En la práctica se ha observado que la carga térmica estimada a partir del poder calorífico inferior (PCI) de cada elemento de los RSM no concuerda con los datos experimentales.

Estudios realizados en el Reino Unido, indican que el poder calorífico superior (PCS) en la fracción ligera seca es de 21 a 23 MJ/kg. El PCS de una pastilla dura con 10% de humedad y 1,3% de cenizas es de 16 a 18 MJ/kg. Los RDF húmedos (con 30% de

humedad) pueden tener un PCS de 13 a 14 MJ/kg. Estos valores se pueden comparar con el del carbón industrial, común en este país, que es de 27 MJ/kg.

El RDF estudiado tiene aproximadamente un 65% de volátiles mientras que el carbón posee el 35%; esta característica y el bajo PCS hace que la proporción de materia volátil por unidad térmica de entrada sea muy grande (4:1) con respecto al carbón. De este modo, en el estudio se concluye que aunque se use un RDF de muy alta calidad (de alta refinación y alto PCS), las condiciones de combustión se deben ajustar por las diferencias en el contenido de volátiles, entre otras.

Por medio de la densificación se puede obtener un producto de mayor contenido energético por unidad de volumen. Sin embargo, existe un límite por arriba del cual la densidad del RDF resulta contraproducente. Si la densidad de la pastilla es mayor a 650 kg/m<sup>3</sup>, el tiempo que toma la liberación de los volátiles es mucho mayor; y si se toma en cuenta que es necesaria una dosificación más continua del combustible en la caldera (por el bajo poder calorífico), entonces el material no puede ser quemado de forma completa, quedando residuos de carbono en las cenizas durante la descarga. Esto lleva a que una porción del contenido energético original se pierde, requiriéndose de más combustible para sostener la carga térmica en la caldera.

Otra situación que dificulta el éxito del RDF es que la incineración con recuperación de calor es mucho más popular. Sin embargo, la *Free University of Brussels*, en Bélgica, estudia aspectos de producción de energía a partir de RDF.

En Inglaterra, el trabajo de la compañía *Blue Circle* culminó con la instalación de la primera planta a gran escala para procesar RSM empleándolos como combustible en hornos cementeros. Durante sus primeros dos años de funcionamiento se procesaron unas 60 mil toneladas de RSM y se ahorraron cerca de 14 mil toneladas de carbón. También se recuperaron alrededor de 4,800 toneladas de metales ferrosos. En el proceso, se debe usar RDF y no RSM sin procesar para asegurar la calidad del cemento. Si se usa RDF, el flujo de gases de salida en la planta aumenta de 5 a 9%. En un circuito cerrado, el proceso seco tiene una recirculación de partículas volátiles que pueden causar problemas como la acumulación de residuos en el horno y en el precalentador. Por ello se debe cuidar en particular el balance de álcalis y cloruros en la mezcla de RDF y combustible empleado.

Con todo esto, la industria del cemento puede ser un importante comprador de RDF. Los RSM son adecuados como material combustible en un horno cementero por varias razones. Esencialmente se trata de una combustión a alta temperatura en un horno muy grande (1,400°C en la zona de combustión), esto destruye completamente los compuestos orgánicos olorosos o nocivos.

La ceniza que se genera al quemar los RSM se incorpora al clinker de cemento, bajo un cuidadoso control y ajuste, para reducir al mínimo los problemas de disposición de cenizas, que son comunes en las otras formas de incineración. El proceso de *Blue Circle*, en su forma actual puede reducir hasta 20% del combustible al sustituirlo con RDF.

Por otra parte, se han detectado ciertas restricciones operacionales que pueden frenar el uso de RDF en la industria como la mayor complejidad en las operaciones del manejo de combustible, las variaciones en su calidad, los depósitos de impurezas como cloruros y sus problemas de almacenamiento.

Existen discrepancias al comparar los costos de incineración en masa contra los del RDF. El RDF se quema como combustible complementario de carbón, pero sus costos de procesamiento pueden hacer desventajosa la aplicación.

El uso de combustibles sólidos derivados de los RSM permite la implantación de técnicas de combustión más eficientes. Para el RDF se considera la suspensión y la semisuspensión. Con un material refinado, uniforme y sin materiales no combustibles, la combustión se puede obtener, principalmente en suspensión. Mediante la semisuspensión, se puede quemar RDF con un tamaño de partícula no mayor a los 100 mm, de donde un 20 al 40% del combustible se consume sobre las parrillas. Para la suspensión completa se requieren partículas con un tamaño menor a los 30 mm. La mayor experiencia de combustión en semisuspensión la tiene el incinerador de Hamilton Ontario, Canadá, que procesa 500 ton/día desde 1972. En Estados Unidos existen plantas de incineración en semisuspensión en Akron, Ohio, Albany y Nueva York.

## **6.8 Mercado del RDF**

El RDF desde su aparición, se ha enfrentado a numerosos problemas de mercado. Se tiende a considerar que es más fácil vender energía que RDF, por lo que varias plantas lo producen y lo queman a la vez.

Otros mercados industriales del RDF son escasos y poco conocidos. Las industrias que trabajan con petróleo o gas natural difícilmente se inclinarían a utilizar el RDF. Sin embargo, se conocen algunas aplicaciones en la incineración de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales. En Holanda, la empresa *TNO* estudia la posibilidad de usar el RDF para calefacción y acondicionamiento de aire en invernaderos por las grandes extensiones de cultivo de tulípanes.

Es lógico que en el Reino Unido el interés por el RDF sea mayor, debido a la gran cantidad de equipo instalado para la combustión de carbón. Los clientes potenciales del RDF son los grandes consumidores de energía como la industria cementera, las plantas generadoras de energía eléctrica y la industria de la calefacción.

Para evaluar el mercado del RDF en una región es necesario realizar los siguientes estudios:

**Análisis de la situación de los RSM y de la situación de la energía.** En este punto se debe conocer la cantidad de RSM generados; el porcentaje estimado de conversión a RDF (se especifica el posible valor del PCI, contenido de cenizas y humedad), composición promedio de los residuos generados, fluctuaciones debidas al lugar de recolección (por zonas y estaciones del año), cantidad de materiales separados y estructuras de recolección. También se deben tener datos sobre el consumo total de energéticos de la región, así como las proporciones de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos empleados actualmente.

**Análisis de las estructuras de recolección y de sus posibles modificaciones.** Se debe tener en cuenta lo siguiente:

- a) Cómo se empaican usualmente los RSM (en bolsas, recipientes, contenedores, etc.)
- b) Si existe o no recolección separada de ciertos componentes (papel, vidrio, etc.).
- c) Qué métodos actuales de disposición existen (indicando las posibilidades del RDF).

- d) Si la recolección de RSM se hace conjuntamente con otro tipo de residuos.
- e) Si hay posibilidad de hacer una recolección separada de la fracción seca de donde se pueda producir RDF y una fracción húmeda que se pueda convertir en composta.
- f) Conocer la diversidad de vehículos de recolección usados.

**Elección de los aparatos de separación para la preparación de RDF.** Se deben poner a prueba los distintos equipos para molienda, tamizado, clasificación, eliminación de ferrosos y elegir los más adecuados en cada caso.

**Caracterización de los grupos componentes de los RSM.** Se colectan y caracterizan dos fracciones de los RSM obtenidas del equipo de separación elegido. La caracterización de las fracciones se relaciona con los parámetros de operación del equipo (flujo de aire, tiempo, etc.) entre las características de las fracciones se incluye la eficiencia de separación. Este estudio se efectúa en una planta piloto.

**Derivación de la secuencia de aparatos con sus correspondientes parámetros de proceso.** De acuerdo con la caracterización del punto 4, y con los requisitos de los productos más aceptables por el mercado (punto 1), se elige una secuencia de operaciones y ajuste de parámetros. Se desea que la secuencia sea lo más simple posible, con el mínimo de aparatos (mínimo costo), de mezcla de componentes, de emisiones contaminantes y que la separación de la materia húmeda fermentable sea lo más pronto posible.

**Realización de prueba del proceso de producción a escala semitécnica (producción y análisis de RDF).** Se mide principalmente el PCI, humedad, cenizas y otros parámetros de interés específico (facilidad de almacenamiento, manejo, etc.).

**Desarrollo del proceso óptimo para una determinada región.** Se ajustan los parámetros del proceso, se determinan las eficiencias y se corrigen los defectos observados de pruebas de largos periodos. Se requieren pocos y sencillos cambios para convertir una planta de recuperación de materiales en una planta de RDF. Desde el punto de vista económico, el valor real del RDF se debe comparar con el de otros combustibles sólidos usuales como el carbón, madera, lignito, turba, cáscara de nuez y otros semejantes.

Se concluye que el resultado de un cálculo preciso que involucre costos de procesamiento, transporte, almacenamiento y quemado del RDF siempre es negativo y produce costos netos de disposición que deben ser pagados de alguna forma por quienes generaron los RS. Estos costos se deben comparar con los de otros métodos de disposición.



## **7. Alternativas para el aprovechamiento de los residuos sólidos municipales en la ciudad de México**

La recuperación de energía es una actividad atractiva al disponer los RSM en rellenos sanitarios (por la captación de biogas) y al tratarlos térmicamente para obtener una reducción en volumen (por su incineración u otros).

Los RSM también pueden ser aprovechados de otras formas al ser destinados para otros usos como la elaboración de nuevos productos. La alta cantidad de RSM generados en la ciudad de México constituye una oferta de materiales que pueden tener un nuevo uso así como un aprovechamiento energético. El reciclaje en sí no genera energía, pero ha demostrado que se pueden ahorrar miles de kilowatts-hora en la fabricación de nuevos productos.

Por lo tanto, los usos energéticos de los RSM no involucran sólo a aquellos que generan energía de forma directa en forma de calor o electricidad, sino también a aquellos que ofrecen un alto potencial de ahorro de energía y recursos no renovables como lo es principalmente el reciclaje.

Como resultado del desarrollo de este trabajo, se propone un programa de Manejo Integral de Residuos Sólidos Municipales (MIRSM) en el cual la recuperación de energía puede contribuir significativamente en la preservación de recursos no renovables, subsanar económicamente las actividades de disposición final y cubrir parcialmente la demanda de energéticos necesarios para una sociedad en constante crecimiento y alta actividad industrial como la de la ciudad de México.

### **7.1 Potencial de los procesos de recuperación de energía**

#### **7.1.1 Aprovechamiento del biogas en rellenos sanitarios**

Existen varios estudios en donde se ha empleado el metano como fuente alterna de energía. El Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) analizó el potencial de aprovechamiento del biogas en los rellenos sanitarios de la ciudad de México<sup>[31]</sup>, en especial el de Prados de la Montaña, donde se determinó que la capacidad máxima aprovechable era de 6 MW. El costo de generación resultante fue inferior a los 0.03 USD por kWh generado, dando un margen de ganancia en la venta de la energía.

Por otra parte, se desarrolló un proyecto piloto para generar energía eléctrica por medio de motores de combustión interna para el alumbrado público de este sitio de disposición final<sup>[25]</sup>. Según este estudio, el costo por kWh producido a partir del biogas en estos dispositivos era mucho menor al pagado a la compañía de luz (0.08 USD), a diferencia de los 0.12 USD pagados en septiembre de 1995. Así, una instalación de 5 MWe traería un ahorro de aproximadamente 1,850,000 USD en un año de funcionamiento. Si se considera que la producción de biogas para la generación de energía eléctrica es factible durante los próximos 15 años, los ahorros se vuelven más que atractivos.

En este relleno sanitario se generan aproximadamente 19.5 millones de metros cúbicos de metano al año, con un poder calorífico de 24,200 kJ/m<sup>3</sup> y una composición de 55% metano, 35% bióxido de carbono y el 10% restante por hidrógeno, oxígeno, mercaptanos y ácido sulfhídrico. Si este gas, fuese llevado a un arreglo motor de combustión interna-generador eléctrico, asumiendo una eficiencia total de 35%, la energía eléctrica generada en bruto sería de 5.24 MW. Esto implica que por cada metro cúbico de metano se pueden obtener 2.35 kWh<sup>[25]</sup>. Actualmente el biogas recuperado es llevado a un quemador de 65 m<sup>3</sup>/min de capacidad. Bajo este nivel de extracción, podrían generarse 9,173 kWe; energía que podría ser alimentada a la red de distribución y empleada para el alumbrado público a un costo menor al pagado actualmente.

En otro estudio<sup>[27]</sup>, se estimó un costo de 0.0235 pesos (0.0024 USD) por kWh generado sin considerar los gastos de instalación, mantenimiento y operación. Todo indica, que el aprovechamiento del biogas para la generación de energía puede ser rentable, y sin embargo, es un recurso que ahora está siendo desperdiciado.

Se ha estimado que es posible generar hasta 50 MW en la zona metropolitana de la ciudad de México a partir del biogas y un total de 200 MW en todo el país.<sup>[26]</sup>

Cabe mencionar, que el biogas puede ser procesado y empleado como combustible ya sea a nivel doméstico o de transporte. En este último caso, el biogas podría ser utilizado para el transporte de los RSM, sustituyendo el uso de diesel consumido por 256 tractocamiones, con los que cuenta la ciudad para el traslado de los residuos a su disposición final. No obstante, en este uso se presentan problemas con respecto al corto alcance de los vehículos, producido por la capacidad limitada de almacenamiento.

A nivel doméstico, resulta atractiva la práctica adoptada en Chile, donde el biogas es una recarga para la red de distribución de gas natural. La única dificultad en este caso es el alcanzar el poder calorífico apropiado.

En los rellenos sanitarios operados actualmente (Bordo Poniente y Santa Catarina) no se tiene contemplado el empleo del biogas para generar algún otro tipo de energía. La tarea primordial de las autoridades es el extender la vida útil del relleno sanitario de Bordo Poniente (aproximadamente al año 2010) incrementando la altura de las celdas.

El alto contenido de materia orgánica hace propicio el llevar a la práctica la descomposición anaeróbica en digestores anaeróbicos, de donde el metano puede ser aprovechado para fines domésticos o industriales. En este último aspecto, hace falta mayor investigación para su posible aplicación en México.

### **7.1.2 Energía a partir de los procesos térmicos**

En los últimos veinte años los procesos térmicos, en especial las tecnologías de incineración, han minimizado sus emisiones al medio ambiente y mejorado sus eficiencias en general. Esto ha sido posible por los adelantos tecnológicos que han presentado la mayor parte de los dispositivos de control de emisiones.

La disposición de la ceniza y la toxicidad de las emisiones, aunado a los altos costos de inversión y operación, dificultan la implantación de la incineración en esta ciudad. Hay que recordar que la incineración no consiste en un método de disposición final para los RSM, básicamente es un tratamiento que minimiza la cantidad de materia que habrá que

enterrar. Lo cierto es que, por esta razón, es una opción atractiva en comunidades donde los espacios para abrir nuevos rellenos sanitarios son escasos.

Ante la clausura del relleno sanitario de Santa Catarina, el agotamiento de terreno en Bordo Poniente y la gran cantidad de residuos generados diariamente, la incineración se presenta como una alternativa a la que muy probablemente haya que recurrir. La incineración podría asumir la tarea de reducir el volumen de los RSM y generar energía útil a la comunidad y la industria.

La energía en bruto recuperable a partir de la incineración de los RSM de la ciudad de México (considerando su poder calorífico de 10,260 kJ/kg) es de 120 kW por tonelada diaria de capacidad. Si se considera una eficiencia en la caldera de recuperación de 0.7, una eficiencia de conversión en la turbina de 0.3 y una eficiencia en el generador eléctrico de 0.96 se pueden obtener 24 kWe/tonelada/día. Bajo estas condiciones la energía eléctrica generada por una planta de solo 100 toneladas por día de capacidad, operando las 24 horas y los 365 días del año, desplazaría el uso de 64,270 barriles de petróleo al año.

Los demás procesos térmicos como la pirólisis, gasificación y termólisis tienen en común el ser sistemas que degradan la materia orgánica térmicamente. Consisten en tecnologías con aplicación a menor escala y a nivel energético habría que evaluar la calidad de sus productos, que en última instancia por ser combustibles presentan externalidades en sus procesos de oxidación.

## **7.2 Evaluación energética de las estrategias para el manejo de los RSM**

El Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE) llevó a cabo un estudio para comparar los diversos métodos existentes para el tratamiento de los RSM <sup>(28)</sup>. En él, se consideraron las cinco principales opciones:

- Relleno sanitario con recuperación y aprovechamiento de biogas.
- Incineración en masa, incluyendo la generación de vapor y/o electricidad.
- Producción de RDF, como combustible para su combustión directa y generar vapor y/o electricidad.
- Recolección y separación de materiales reciclables en plantas de selección.
- Composteo.

Todas las estrategias para el MIRSMM requieren de una cierta cantidad de energía para operar. El consumo de energía abarca la recolección, tratamiento y la disposición final según la tecnología empleada. La energía generada puede ser producida en forma de electricidad, vapor o combustibles alternos que pueden desplazar parcialmente el uso de combustibles fósiles. El objetivo es el determinar la energía necesaria por cada opción y la energía producida en dado caso.

El análisis fue hecho considerando un periodo de tiempo de 20 años, suficiente para poder hacer las comparaciones necesarias en materia de recuperación de energía por las tecnologías de aprovechamiento de biogas en rellenos sanitarios e incineración. En la tabla 7.2 se muestran los resultados de este análisis en términos de un balance de energía y se presentan las principales estrategias ya sean simples o mixtas.

*Alternativas para el aprovechamiento de los RSM en la ciudad de México*

Las estrategias que incluyen la combustión de RSM, son las que producen la mayor cantidad de energía eléctrica y también los más grandes ahorros netos. El empleo del biogas en rellenos sanitarios para la generación de electricidad o calor es la siguiente estrategia más eficiente.

El reciclaje también produce un ahorro de energía considerable, no obstante en cantidades menores. En este aspecto cabe mencionar que el reciclaje de algunos materiales es una actividad que en los países altamente industrializados ha generado un importante ahorro de energía en la elaboración de nuevas manufacturas y ha incrementado la vida útil de los rellenos sanitarios. El composteo no es una actividad destinada a la generación de energía, pero también ha contribuido de manera importante en este último punto.

**Tabla 7.1 Descripción cualitativa del balance de energía para las principales tecnologías aplicadas a los RSM \***

Tecnología	Energía	
	(-) Requerida	(+) Producida (/) Ahorrada
Transporte	(-)	Energía para la producción de combustibles y la operación de los vehículos
Relleno sanitario con recuperación de biogas	(-) (+)	Construcción y operación del relleno sanitario Generación de energía eléctrica al emplear el metano en motores de combustión interna o turbinas de gas
Incineración en masa	(-) (+)	Operación de la planta y la disposición de la ceniza Calor para producir vapor y energía eléctrica
Preparación y combustión de RDF	(-) (+)	Preparación del RDF y operación de la planta para su combustión, disposición de ceniza Calor para producir vapor y energía eléctrica, captación de metano en la disposición final de los residuos no quemados
Recolección, separación y reciclado de materiales	(-) (/)	Energía adicional a la requerida por el transporte, para los procesos de separación y la manufactura de nuevos productos Energía para la extracción u obtención del material virgen, su procesamiento, el transporte de las materias primas y su manufactura
Composteo	(-)	Separación del residuo de jardinería (de existir), para la molienda, la separación y durante el proceso aerobio

\* Ref de [28]

En aquellas estrategias donde están implicadas las tecnologías de incineración y combustión de RDF, la energía neta producida es menor cuando existe un sistema de recolección de reciclables. Esto se debe a que gran parte del papel, cartón y plásticos dejan de formar parte de la carga de alimentación del incinerador.

Tabla 7.2 Balance de energía de las principales estrategias en el manejo de RSM \*

Estrategia	Energía (GJ por tonelada de RSM)		
	Requerida	Producida	Ahorros netos
(1) Relleno sanitario con aprovechamiento de biogas	0.09	2.56	2.47
(2) Incineración en masa	1.85	11.97	10.12
(3) Combustión directa de RDF	2.51	11.74	9.23
(4) Composteo + relleno sanitario	2.71	2.46	-0.25
(5) Selección y separación de reciclables + relleno sanitario	0.14	3.25	3.11
(6) Selección y separación de reciclables + incineración en masa	1.72	11.74	10.02
(7) Selección y separación de reciclables + combustión directa de RDF	2.31	11.53	9.22
(8) Selección y separación de reciclables + relleno sanitario + composteo	2.75	3.15	0.4
(9) Selección y separación de reciclables + incineración en masa + composteo	4.02	11.33	7.31

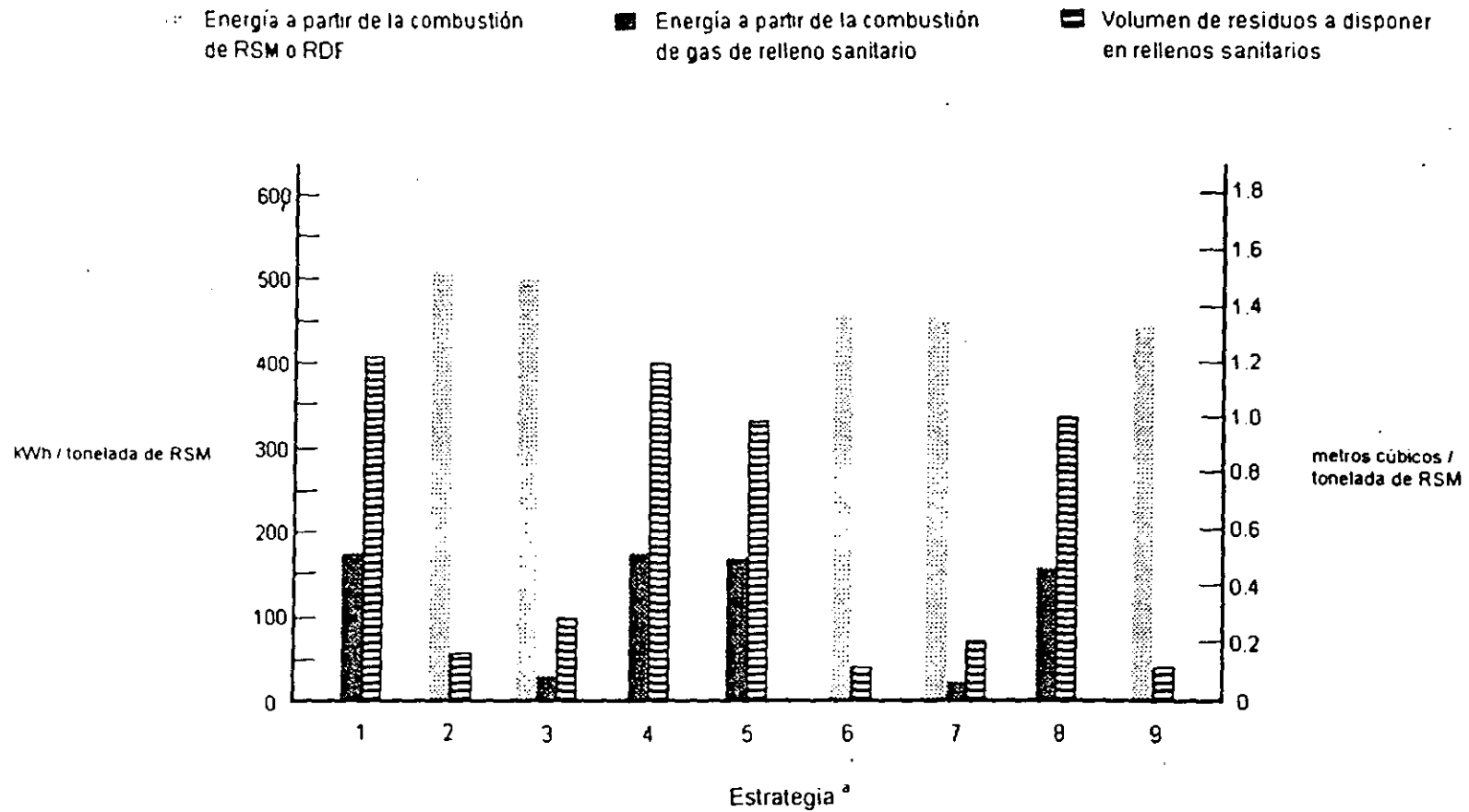
\* Ref. de [28]

Por el contrario, si existe un sistema de recolección de reciclables junto con la disposición final en rellenos sanitarios se genera un mayor ahorro de energía que solamente llevando a cabo una disposición final en estos últimos. La recuperación de energía en rellenos sanitarios es ineficiente a partir de materiales como el papel, el cual si es reciclado, se ahorra mayor energía. Sin embargo, la remoción del papel para su reciclaje disminuye la cantidad de energía generada al existir un programa de incineración y es que la energía liberada al quemar el papel es aproximadamente dos veces mayor a la ahorrada al ser reciclado <sup>(28)</sup>.

Aunque la producción de energía no es el objetivo principal de una estrategia para el manejo de RSM, la recuperación de materiales para su reciclaje es de gran beneficio. Debido a que el 47% de la energía eléctrica generada en México proviene del combustóleo (Balance Nacional de Energía 1996), éste sería el combustible mas desplazado por la energía generada a partir de los RSM.

La figura 7.1 muestra la energía eléctrica que puede ser generada a partir de cada una de las estrategias que producen algún tipo de combustible o que llevan a cabo la combustión de RSM. La energía ahorrada por el reciclaje es excluida así como aquella empleada para la recolección y transporte. La comparación está hecha con base en los kWh netos de electricidad generados por cada estrategia. Por otra parte, también se muestra la cantidad de residuos que tienen que ser llevados a su disposición final en rellenos sanitarios como producto de cada una de estas actividades. Esta información es muy importante en situaciones donde la disponibilidad de espacios para depositar los RSM es escasa y de alto costo.

Como era de esperarse, la incineración de los RSM genera una cantidad de energía disponible mucho mayor a la que se obtiene por agentes biológicos en los rellenos



**Figura 7.1.** Parámetros de la energía eléctrica generada y el volumen de residuos dispuestos en rellenos sanitarios producto de las estrategias que contemplan la recuperación de energía a partir de los RSM. Adaptada de la Ref [28]  
<sup>a</sup> Número de estrategia de acuerdo al indicado en la tabla 7.2

sanitarios. Por esta razón, se genera mayor energía eléctrica además de minimizar la cantidad de RS (cenizas + materia orgánica parcialmente incinerada) a disponer en rellenos sanitarios especiales. Estos depósitos, encontrados en la literatura como "ash monofills", generan 810 veces menos lixiviado que los rellenos sanitarios comunes <sup>[28]</sup>.

La magnitud de la relación energía eléctrica generada/residuos a disposición final se invierte totalmente para las estrategias que se basan en la disposición de RSM en rellenos sanitarios. La energía eléctrica generada es mucho menor y depende de una gran cantidad de RS almacenados en un bioreactor que opera casi en forma independiente y requiere de constante monitoreo para controlar sus emisiones al suelo y a la atmósfera.

### **7.3 La necesidad de una estrategia para un mejor aprovechamiento de los RSM en la ciudad de México**

La mejor alternativa para el manejo de los RSM no sólo será la más atractiva en términos de energía generada, sino también la que mejor se adapte a las condiciones sociales, económicas y ambientales. No se puede decidir entre una estrategia u otra tomando en cuenta sólo los costos de inversión y operación sino que también hay que evaluar el costo que representa sus externalidades.

En la ciudad de México, es necesario crear un esquema de manejo integral en donde los subproductos de los RSM reciban un tratamiento y disposición final de acuerdo a sus características físicas, químicas y biológicas (figura 7.2).

En una situación en donde los RSM agotan rápidamente la capacidad de los rellenos sanitarios, se hace necesaria la adopción de una estrategia mixta en donde la eficiencia de aprovechamiento y uso energético sea lo más alta posible. Una estrategia de este tipo puede ser como la ilustrada en la figura 7.3.

En la primera etapa, se puede tener una importante reducción en la cantidad de materiales para su disposición final aprovechando de una mejor forma los materiales reciclables. Dado a que en las actuales plantas de selección sólo se recupera entre un 5 y un 8% del total de RSM que ingresan a estas (440 toneladas asumiendo un 8% de recuperación en las tres plantas), y se tienen 3,880 toneladas por día de materiales reciclables, se requiere incrementar la eficiencia de recuperación. Esto puede lograrse al llevar a cabo una etapa de aprovechamiento industrial, lográndose con esto un mejor aprovechamiento de aquellos materiales reciclables y una mayor extensión en la vida de los rellenos sanitarios.

Una consecuencia de esto es un cuantioso ahorro de energía ya que está demostrado que el elaborar nuevos productos a partir de materiales reciclables se requiere de menor energía que si fuesen elaborados a partir de materiales vírgenes <sup>[11,29]</sup>. Además, se conservan recursos no renovables y se crea un hábito de menor desperdicio, un hecho que ya es realidad en países industrializados pero que requiere de una correcta implantación por parte de las autoridades.

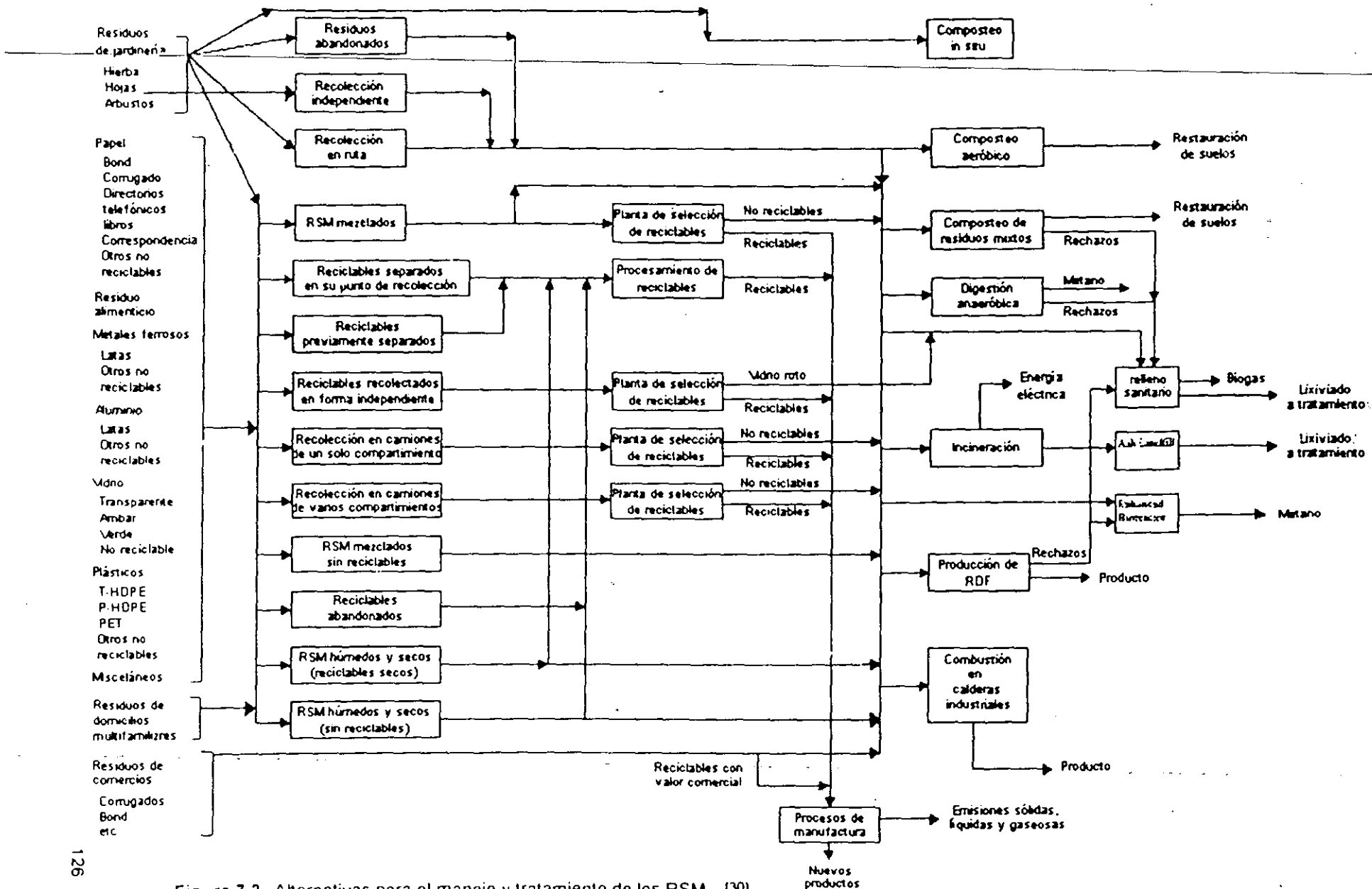
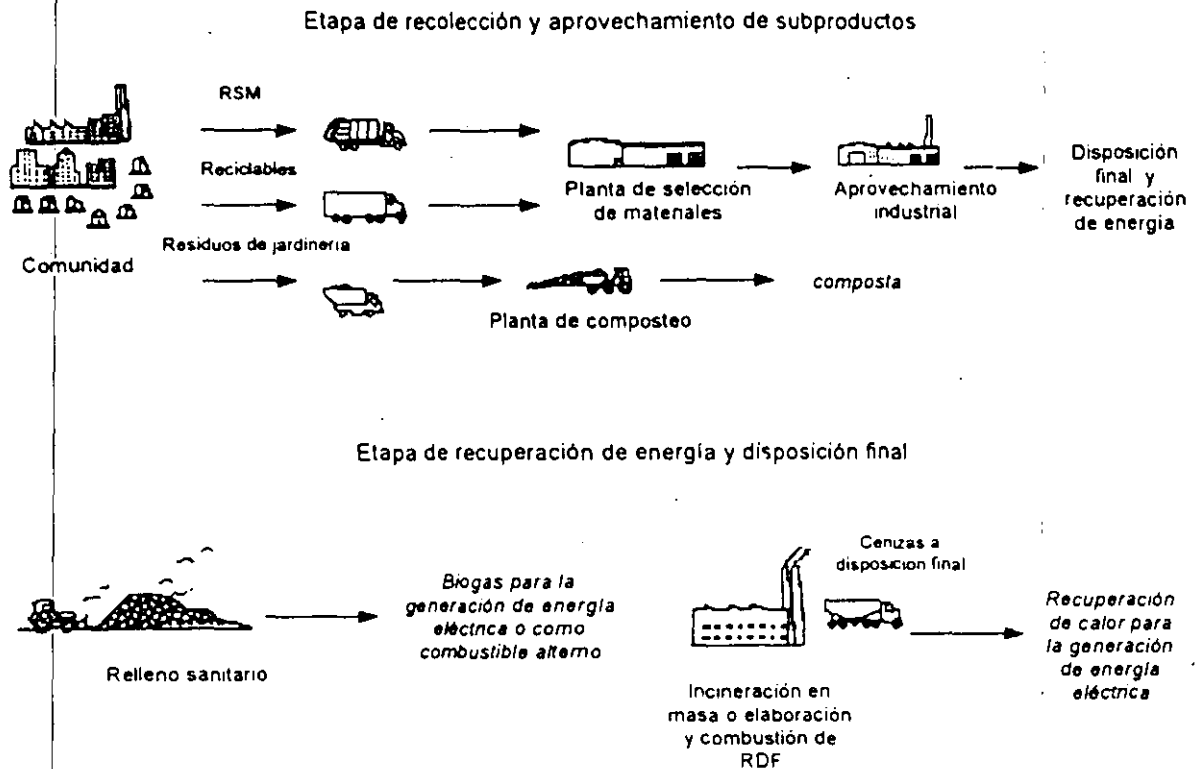


Figura 7.2. Alternativas para el manejo y tratamiento de los RSM. [30]



## Alternativas para el aprovechamiento de los RSM en la ciudad de México



**Figura 7.3** Secuencia de una estrategia para el manejo integral de los RSM con recuperación de energía en la ciudad de México

Para que un programa de reciclaje tenga éxito, los subproductos deben encontrar un buen mercado. Si bien en la ciudad de México no existe la capacidad suficiente para reciclar lo que disponemos en los rellenos sanitarios, en el extranjero esos materiales tienen una mayor demanda. Esto último es lo que ocurre actualmente con la mayor parte de los materiales recuperados en las plantas de selección: los materiales se exportan y vuelven como productos terminados. Esto demuestra que existe una gran oportunidad para la industria del reciclaje en México, sin embargo no se ha hecho la empresa y se requiere una iniciativa a nivel nacional para apoyar esta actividad.

Por medio de la separación de los residuos desde su origen (en los hogares, comercios e industria) se facilitan las labores de selección y reciclaje, así como disminuye la contaminación de estos materiales por humedad, microorganismos y agentes químicos. En este aspecto habría que ampliar el programa de separación de RS llevado actualmente a cabo por las autoridades a nivel piloto. La separación de RS como parte de los programas de reciclaje implica más que un cambio en nuestros hábitos de consumo y desperdicio, requiere de un cambio de mentalidad y de cultura ambiental.

Si el valor comercial de los RSM se encuentra en los materiales reciclables, la experiencia en México para su separación es amplia. La pepena ha sido un problema social, pero que ha beneficiado mucho como actividad.

Tabla 7.3 Ahorro de energía en el reciclaje de subproductos <sup>a</sup>

Material	% de ahorro
Papel	20 <sup>b</sup>
Vidrio	40
Acero	74
Aluminio	95
Plásticos	—

<sup>a</sup> Ref. de [11].

<sup>b</sup> También disminuye aproximadamente en un 60% el agua que se consume en el proceso de elaboración.

En la estrategia propuesta, una vez que se ha realizado el aprovechamiento de subproductos tanto en las plantas de selección como en la industria, queda el tratamiento y disposición final de los residuos remanentes. Es un error el pensar que no se encontrarán materiales reciclables como papel y plásticos dentro de estos residuos. Esto se debe a que se encuentran contaminados y por no existir la suficiente demanda o capacidad para procesarlos. De hecho, en los Estados Unidos se recupera en promedio sólo el 17% de los RSM generados; sin embargo en ciudades como Seattle se recupera el 45% gracias a la cantidad de programas de reciclaje existente, los impuestos pagados por la disposición final y una mayor conciencia de su población <sup>(29)</sup>.

La gran cantidad de residuo alimenticio y demás orgánicos hace propicia la práctica del relleno sanitario como método de disposición final. El recurso energético es el biogas generado.

Para el resto de materiales que forman parte del rechazo en la etapa de aprovechamiento de subproductos, el tratamiento puede ser por incineración. Aquí se encontrarían el papel, cartón, plásticos, cuero y textiles contaminados o que no resultan factibles de reciclar. La cantidad de materiales con bajo poder calorífico, como el residuo alimenticio y la presencia de material inerte junto con metales y vidrio, sería mínima gracias a su previa separación y aprovechamiento. Estos materiales también pueden ser empleados como combustible en calderas industriales al ser transformados en RDF, según los requerimientos del sistema.

De esta manera, se les da a los subproductos un tratamiento y uso de acuerdo a sus características físicas, químicas y biológicas, sin que las actividades de reciclaje constituyan un estorbo para la recuperación óptima de energía a partir de estos.

Determinar la cantidad de energía que consumiría y generaría una estrategia de este tipo en la ciudad de México no puede ser hecha en base de estudios realizados en el extranjero debido a una simple razón anteriormente expuesta: nuestros RSM son diferentes. Sin embargo se debe de pensar en una estrategia que contemple la recuperación de energía a partir de los RSM en la ciudad de México. Lo amerita las grandes cantidades generadas a diario.

**Tabla 7.4 Descripción de los beneficios por etapas dentro de la estrategia propuesta para el MIRS en la ciudad de México**

Etapa	Beneficios dentro del tratamiento o disposición final	Beneficios en materia energética
Recolección y aprovechamiento de subproductos	<p>Separación desde su origen de los RSM</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Facilita las operaciones de recolección, selección y aprovechamiento de subproductos</li> <li>• Disminuye la contaminación por agentes químicos o biológicos de los materiales reciclables</li> <li>• Facilita el dar un tratamiento a las diversas fracciones de los RSM de acuerdo a sus características y propiedades</li> </ul>	<p>Al disminuir la contaminación por otros agentes, se incrementa la calidad como combustible de los residuos destinados a la incineración</p>
	<p>Mejor aprovechamiento de los materiales reciclables</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aproximadamente el 34% de los RSM de la ciudad de México son reciclables. Si se recuperara el 40% de estos materiales, se evitarían 1,550 toneladas para disposición final, tres veces la capacidad de las tres plantas de selección existentes</li> <li>• Se fomenta el aprovechamiento de materiales reciclables por parte de la industria en forma directa</li> </ul>	<p>Ahorro de energía al elaborar nuevos productos evitando parcialmente la explotación de recursos no renovables (ver tabla 7.3)</p>
	<p>Se tiene un "reciclaje" de los residuos de jardinería al producir con ellos composta que puede ser aprovechada para la restauración de suelos o como un aditivo de nutrientes en los rellenos sanitarios</p>	

Recuperación de energía  
y disposición final

Tratamiento por incineración

- Existe una reducción en volumen de los RSM tratados superior al 85%, lo cual reduce en la misma proporción los requerimientos de capacidad en los rellenos sanitarios
- Los rellenos sanitarios para la disposición de cenizas generan menores cantidades de lixiviado, y pueden ser aprovechadas en la industria de la construcción

Generación de vapor y energía eléctrica  
(24 kWe/tonelada/día <sup>a</sup>)

Al producir RDF se obtiene un combustible más uniforme en sus propiedades y que puede ser comercializado para alimentar calderas industriales o para la generación de electricidad

Disposición final en relleno sanitario

- Se deposita la mayor parte de la materia orgánica, de donde la mayor parte es residuo alimenticio (aprox. 4,000 ton/día)
- Los requerimientos de espacio para esta práctica se minimiza en cerca del 50% gracias a la incineración y el reciclaje

La generación de biogas es rica debido a la alta concentración de materia orgánica en el depósito, el cual puede ser empleado como combustible alternativo o de forma directa para generar energía eléctrica (2.35 kWh/m<sup>3</sup> de metano aproximadamente <sup>b</sup>)

<sup>a</sup> considerando la composición media de los RSM de la ciudad de México y un poder calorífico de 10,260 kJ/kg, consultar la sección 7.1.2

<sup>b</sup> Cifra para los RSM depositados en el relleno de Prados de la Montaña, consultar la sección 7.1.1

## Conclusiones y recomendaciones

Al estudiar en materia de energía la disponibilidad de los RSM en la ciudad de México, se tuvo que analizar la situación actual del manejo de estos mismos. Esto nos lleva a considerar las distintas carencias y factores que de alguna forma hay que reforzar para poder implantar un MIRS que contemple la recuperación de energía de forma eficiente.

Estos factores pueden resumirse en tres puntos:

1. La falta de un fomento al reciclaje de subproductos y una necesaria minimización en la generación de RSM.
2. La escasa normatividad existente con relación al manejo y tratamiento de los RSM.
3. La necesidad de dar un impulso al desarrollo de las fuentes renovables de energía comenzando por explotar el potencial de los RSM de la ciudad de México.

Si estos tres puntos son contemplados en la implantación de un MIRS, se puede llevar a cabo una óptima recuperación de energía y aprovechamiento de materiales ya que los RSM podrán comenzarse a ver como un recurso y se les podrá dar un tratamiento de acuerdo a sus propiedades.

Son de llamar la atención las enormes cantidades de materiales reciclables que a diario se generan (34% del total) y que sin embargo en otros países son aprovechados para volver como productos terminados. Esto nos indica que existe una gran oportunidad para la industria del reciclaje en México. Si bien la mejor solución al problema de los RSM consiste en minimizar las cantidades generadas a diario, esta actividad contribuye significativamente a esta tarea como también a la preservación de recursos naturales y el ahorro de energía.

Para hacer más eficientes las labores de selección de materiales es necesario impulsar el plan de separación de RSM desde su origen. De esta forma se minimiza su contaminación por otros agentes y se mejora su calidad como materia prima. En este sentido hay que ampliar el programa llevado a cabo actualmente por las autoridades a nivel piloto, tarea nada fácil porque el separar nuestros residuos también implica un cambio en nuestros viejos hábitos de consumo y desperdicio.

Es muy importante el resaltar que sólo existe una sola Norma Oficial Mexicana (NOM-083-ECOL-1996) en materia de RSM, la cual establece los requisitos técnicos que deben observarse en la disposición final de RSM en rellenos sanitarios. Si se pretende llevar a un marco de MIRS las tareas de recolección, tratamiento y disposición final de los RSM, es necesario que exista una normatividad que cubra todos estos aspectos y, muy en particular, en el de la recuperación de energía ya sea por procesos térmicos o biológicos.

Si el principal obstáculo para el aprovechamiento de la energía contenida en los RSM es su alto costo, entonces es necesario hacer un balance con respecto a lo que se está pagando por mantener el esquema actual de manejo en donde los productos reciclables son pobremente aprovechados, se hace una disposición final acelerada y no se realiza ningún aprovechamiento del biogas generado en los rellenos sanitarios.

Para definir los flujos de materiales y el balance de energía en la estrategia propuesta, es necesario elaborar un estudio a lo largo de todo el ciclo de los RSM partiendo desde su generación e identificando los hábitos de consumo de la sociedad, siendo muy importante el que sea llevado a cabo con nuestros residuos por su particular composición física. Esta información es el punto de partida para identificar los potenciales de aprovechamiento, estimar los costos de la recuperación de energía y establecer un marco normativo para la regulación de las distintas actividades involucradas.

Los RSM de la ciudad de México son extremadamente ricos en materia orgánica (alrededor del 80% del total), lo cual hace propicio el aprovechamiento del biogas generado por la descomposición anaeróbica en rellenos sanitarios. El biogas puede ser empleado como combustible alternativo o de forma directa para generar energía eléctrica, con 2.35 kWh/m<sup>3</sup> de metano, aproximadamente. Bajo el esquema de MIRS propuesto, los requerimientos de espacio para esta práctica se minimizan en cerca del 50% gracias a la incineración y el reciclaje.

También hay que considerar que la aplicación de la digestión anaeróbica controlada merece una mayor investigación para ser aplicada en pequeñas comunidades, donde la materia orgánica es abundante y el biogas podría ser aprovechado con fines domésticos.

Para reducir el espacio requerido en los rellenos sanitarios, la incineración es una alternativa por la cual se determinó que pueden obtenerse alrededor de 24 kWh/ton/día y una reducción en volumen superior al 85%. Sin embargo, su alto costo hace que sea una opción aparentemente poco viable, pero si se examina la importante reducción en volumen de los RSM y se toma en cuenta que es la actividad que genera la mayor cantidad de energía se vuelve una alternativa que, sin depender de ella, ayuda a prolongar la vida de los rellenos sanitarios. Por otra parte, al fabricar RDF se puede concebir un producto de mayor calidad que se emplee en la industria como sustituto del carbón o el combustóleo en plantas generadoras de electricidad.

La ciudad de México ofrece más de once mil toneladas diarias de diversos materiales que antes de ser llevados al relleno sanitario pueden ser transformados en algún bien. Esta gran oferta de RSM hace de estos un recurso prácticamente inagotable y lo que se puede hacer en la ciudad de México, tanto en materia de manejo como de recuperación de energía, debe servir de ejemplo para las demás ciudades del país.

El empleo de la energía obtenida a partir de los RSM tiene su justificación al desplazar parcialmente el uso de combustibles fósiles, reducir los impactos al ambiente durante su manejo y disposición final, aprovechar de una forma más eficiente los materiales reciclables, y sobretodo, al valorar un recurso que lejos de ser un desecho puede llegar a ser la solución de más de un problema.

Se espera que la contribución de este trabajo sirva para hacer un llamado de atención a las autoridades, haciendo ver que el actual esquema de manejo de RSM exige un cambio ante la creciente generación y sobrepoblación de la ciudad de México; y que se considere la recuperación de energía como un impulso al empleo de las fuentes renovables dentro de un nuevo MIRS, ya que los beneficios son grandes y necesarios para la sociedad del futuro en nuestro país.

---

## Referencias

1. Tchobanoglous, G., H. Theisen y S. A. Vigil: *Integrated Solid Waste Management*, Mc Graw Hill, Singapur, 1993
2. Rhyner, C., L.J.Schwartz, R.B. Wenger, y M.G. Kohrell: *Waste Management and Resource Recovery*, Lewis Publishers, E.U.A., 1995
3. Woodruff, E.B., H.B. y T.F. Lammers: *Steam Plant Operation*, Mc Graw Hill, E.U.A., 1992
4. Richards, Dick, R. Gould, D. Skelly, M.M. Sachs y D. Dreher: *Waste to Energy Commercial Facilities Profiles*, Pollution Technology Review No. 177, Noyes Data Corporation, E.U.A., 1990
5. Manser, A.G.R. y A.A. Keeling: *Practical Handbook of Processing and Recycling Municipal Waste*, Lewis Publishers, E.U.A., 1996
6. Severini, P.: *La gestión de la basura en las grandes ciudades*, Centro de Investigaciones sobre América del Norte, Universidad Nacional Autónoma de México, 1995
7. Trejo V. R.: *Procesamiento de la basura urbana*, Editorial Trillas, México, 1994
8. *Memorias del Foro Internacional de Incineración de residuos peligrosos*, FEMISCA A.C., México D.F., Agosto de 1998
9. Diaz, L.F., G. M. Savage, L.L. Eggerth y Clarence G.: *Composting and Recycling Municipal Solid Waste*, Lewis Publishers, E.U.A., 1993
10. Deffis C.A.: *La basura es la solución*, Arbol Editorial, México, 1994
11. *Contaminación por residuos sólidos*, publicación de la SEMARNAP, México D.F., 1997
12. Tchobanoglous, G., H. Theisen y S. A. Vigil: *Gestión Integral de Residuos Sólidos*, Volumen I, Mc Graw Hill, España, 1994
13. *Estaciones de transferencia de residuos sólidos en áreas urbanas*, Instituto Nacional de Ecología, México, D.F., 1996
14. Diaz, L. F., G.M. Savage y Clarence G.: *Resource Recovery from Municipal Solid Wastes*, CRC Press, E.U.A., 1982
15. Brunner R.C.: *Incineration systems*. Van Nostrand Reinhold Company, E.U.A., 1984

16. Pavoni, J.L.: *Handbook of solid waste disposal, materials and energy recovery*, Van Nostrand Reinhold, E.U.A, 1975
17. Wolpert, V.M.: "Incineration of municipal solid waste combined with energy production, latest developments", *Renewable energy*, vol.5, part II, pp. 782-785, Reino Unido, 1994
18. Tyson, S.K., M. Rymes y E. Hammond: "Future potential for municipal solid waste energy development", National Renewable Energy Laboratory, E.U.A, 1993
19. Hadjon, R.: "Making waste into energy in America", Alexandria Environmental Policy Foundation, E.U.A, 1998
20. González del Carpio, C.: "Redirecting organics in Mexico City", *BioCycle*, Junio, 1997
21. Stafford, D.A., D. L. Hawkes y R. Horton: *Methane production from waste organic matter*, CRC Press, E.U.A, 1980
22. *Clean energy from municipal solid waste*. Greenhouse gas technology information exchange, IEA Bioenergy Agreement Task XIV, ETSU, Harwell, Reino Unido, 1997
23. Monreal, J.C.: *Biogas recovery from sanitary landfill sites in Santiago, Chile*. Documento no publicado
24. *Directorio de motores alternativos*. Energía, mayo/junio 1998, España
25. Gutiérrez V.J.: *Trends of renewables in Mexico*, Universidad Anáhuac, México
26. Gutiérrez V.J.: *Renewables in Mexico in the 21st century*. IEEE-SPM Berlin, 1997
27. Orta, L.M.T., T.N. Rojas y Monje: *Recuperación del biogas de rellenos sanitarios*, segundo informe de avance, Instituto de Ingeniería UNAM, 1998
28. *Data summary of municipal solid waste management alternatives*, vol.1, National Renewable Energy Laboratory, E.U.A, 1992
29. Grove, N.: "Recycling", *National Geographic*, vol. 186, no.1, julio 1994
30. Dumas, R.: *Energy usage and emissions associated with electric energy consumption as part of a solid waste management*, North Carolina State University, E.U.A, 1997
31. Arvizu, J.L.: *Energía a partir de la basura*, Boletín del Instituto de Investigaciones Eléctricas, noviembre-diciembre, 1997