

## CAPÍTULO 1

### ANTECEDENTES

#### 1.1 Energías renovables y cambio climático

El fenómeno del cambio climático es el conjunto de variaciones en el clima a través del tiempo, resultado de procesos naturales o de las actividades humanas. La más clara manifestación del cambio climático, es el calentamiento global y se refiere al incremento promedio en la temperatura terrestre y marina (SEMARNAT, 2009).

Existen algunos factores que modifican el clima en forma temporal: Cada 41 mil años la tierra cambia la inclinación sobre su eje de 21.5° a 24.5°, actualmente el ángulo es de 23.5°. Ésto se conoce como cambio en la oblicuidad; cada 25 mil 800 años, la tierra realiza un movimiento de trompo conocido como precesión; cada 100 mil años cambia la excentricidad, es decir lo elíptico de la órbita; todo esto origina una reducción en la insolación por lo que los hielos que se forman en invierno no se derriten y se van acumulando, dando como resultado las llamadas glaciaciones (SEMARNAT, 2009).

La actividad solar también tiene variaciones estacionales, como las manchas solares, que sólo pueden ser vistas con filtros especiales. Cuando el sol tiene una mayor cantidad de manchas (cada 11 mil años), emite más energía y por lo tanto el llega una mayor cantidad de la misma a la tierra.

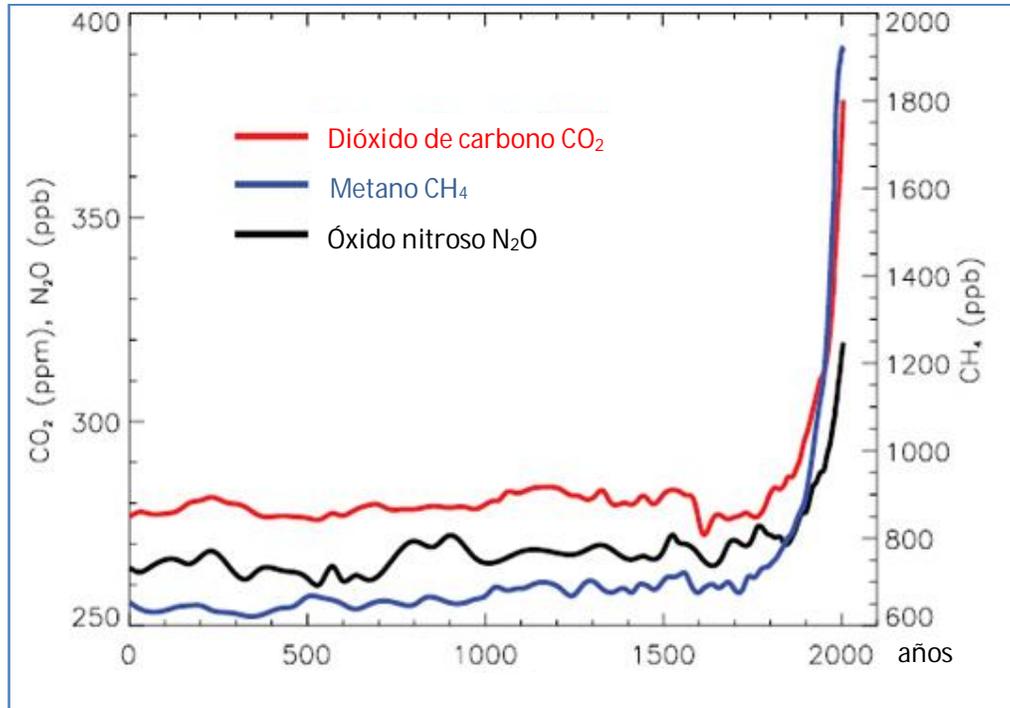
Si bien es cierto que el clima cambia de manera natural, los incrementos en la temperatura en los últimos 50 años se atribuyen a las actividades humanas, es decir, el proceso de industrialización de las naciones y la consecuente quema acelerada de los combustibles fósiles. Al quemarse, los combustibles fósiles producen gases como el dióxido de carbono que pertenece al grupo de los llamados gases de efecto invernadero (GEI). La tierra es un gran invernadero, en realidad estos gases se encuentran de manera natural en la atmósfera<sup>2</sup> y gracias a ellos la tierra posee la temperatura que hace posible la vida. Sin embargo en los últimos 50 años la concentración de dióxido de carbono ha sido la más alta jamás registrada, y las proyecciones para el siguiente siglo arrojan escenarios desalentadores, como se ve en la Figura 1.1.

Los principales gases de efecto invernadero son: Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), ozono (O<sub>3</sub>) y el vapor de agua (Figura 1.2). Algunos de estos gases generan un mayor impacto en el efecto invernadero por la gama de longitudes de onda infrarroja que son capaces de absorber. Por ejemplo, el potencial de calentamiento global del óxido nitroso con respecto al CO<sub>2</sub> es 310 veces mayor. El potencial de calentamiento del CO<sub>2</sub> se considera 1 y es la base para determinar los índices asociados con los siguientes gases.

Ante esta situación, México firmó la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC) de 1992, misma que ratificó en 1993. De igual forma, ratificó el llamado Protocolo de Kioto en el 2000 mediante el cual, los países desarrollados se comprometen a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en no menos del 5% con respecto a 1990, para el periodo de 2008-2012.

---

<sup>2</sup> La composición seca de la atmósfera terrestre es de: 78% hidrógeno, 21% oxígeno, 0.9% argón, 0.03% dióxido de carbono.

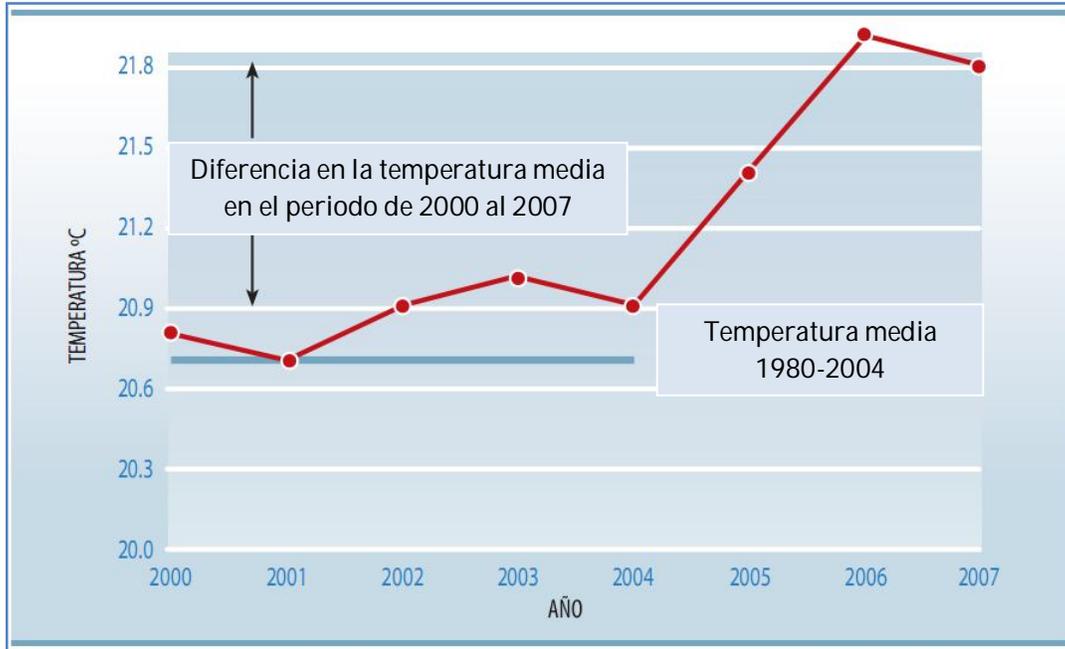


**Figura 1.1** Concentración atmosférica en partes por millón y partes por billón de los gases de efecto invernadero a través del tiempo (CICC, 2007)



**Figura 1.2** El efecto invernadero (SEMARNAT, 2009)

El país sufre ya los efectos del calentamiento global provocado por el cambio climático. Desde el año 2000, se ha registrado un aumento de 1°C en la temperatura media anual del país (Figura 1.3). Se ha registrado un incremento de 10 cm en el nivel del mar en Veracruz desde 1995 (Figura 1.4) y el número de huracanes de gran intensidad han aumentado considerablemente en los últimos 10 años (Figura 1.5). Este aumento en la altura del mar, puede significar miles de kilómetros de costas inundadas por agua salobre (Peralta, 2008).



**Figura 1.3 Aumento de la temperatura anual promedio (SMN, 2008)**

Los gases de efecto invernadero se han generado desde siempre. El vulcanismo, la vegetación y los océanos, la actividad biológica como la respiración de plantas y animales, así como la descomposición microbiana de la materia orgánica han liberado metano, dióxido de carbono y vapor de agua desde hace miles de años. Sin embargo, los humanos han contribuido considerablemente con las actividades diarias. La generación de electricidad, la construcción, la eliminación de la vegetación, la producción de alimentos y otros bienes de consumo generan a diario un importante aumento en la concentración de los GEI.

Los países que más contribuyen al problema son: Estados Unidos, China, Rusia, Japón e India en los primeros 5 sitios y en el 13° lugar se encuentra México. En el 2002, la principal fuente de GEI en México fue el sector energético, que incluye la energía necesaria para el transporte, con un 70% de las emisiones (SEMARNAT, 2009).

No se necesita ser un gran tecnólogo para saber que si se reduce el consumo de combustibles fósiles se reducirá en la misma proporción la cantidad de GEI, sin embargo, la solución no es tan sencilla. La economía se sostiene en la explotación de los recursos, la industria y los servicios y no es posible frenar alguno de estos sectores. Una de las alternativas es mejorar la eficiencia de los procesos (que se generen al menos los mismos niveles de resultados empleando menos recursos), otra opción es el uso de tecnologías revolucionarias que aprovechen la energía que en forma natural se renueva, es decir, las energías renovables.

Se define como energía renovable a aquella cuya fuente reside en fenómenos de la naturaleza. Es decir, procesos o materiales susceptibles de ser transformados en energía aprovechable por la humanidad, que se regeneran naturalmente, por lo que se encuentran disponibles de forma continua o periódica, y se enumeran a continuación: El sol, energía solar; el viento, energía eólica; los ríos y corrientes de agua dulce, energía hidráulica; los mares y océanos, energía mareomotriz; el calor de la Tierra, energía geotérmica; las olas, energía undimotriz y la materia orgánica o biomasa.

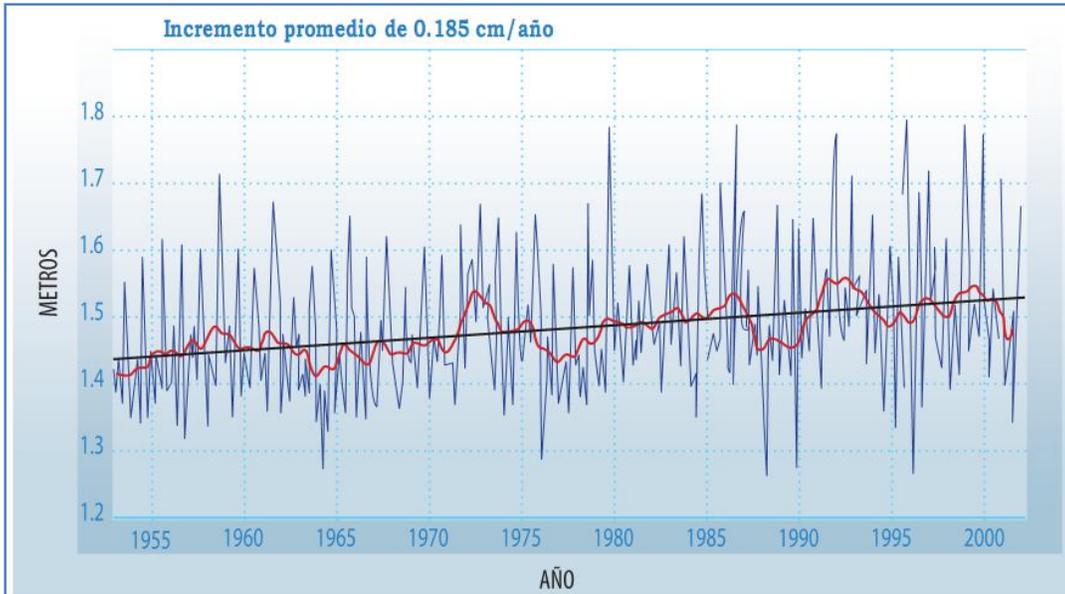


Figura 1.4 Aumento del nivel del mar en Veracruz (SMN, 2008)

## 1.2 Biomasa

La biomasa ha sido una fuente energética esencial para el hombre desde principios de la historia de la humanidad. Este recurso energético perdió importancia en el mundo industrial por la llegada de los combustibles fósiles, por lo que en la actualidad los principales usos que tiene la biomasa son domésticos.

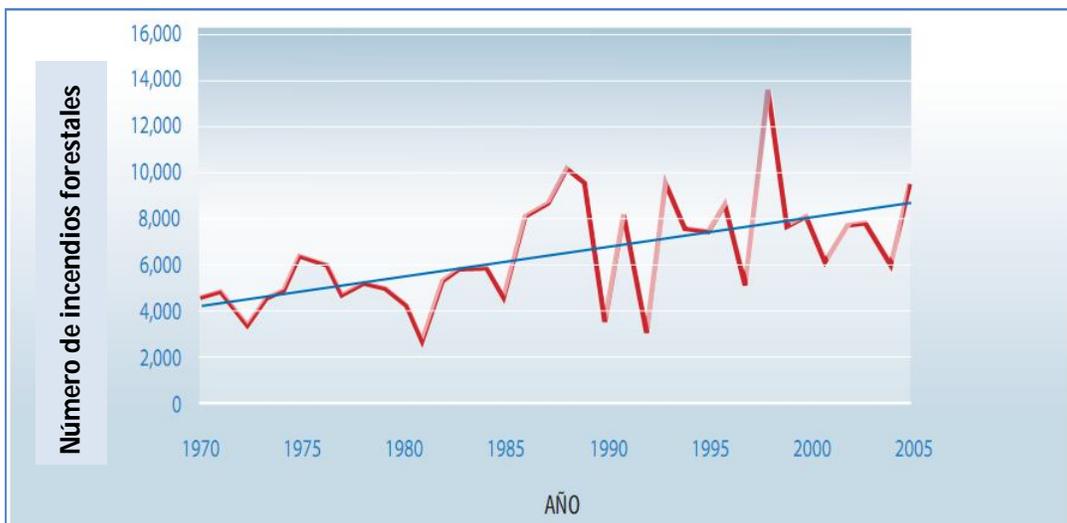


Figura 1.5 Número de incendios Forestales en México (CNF, 2007)

La biomasa, abreviatura de masa biológica, es la cantidad de materia viva producida en un área determinada de la superficie terrestre, o por organismos de un tipo específico. El término es utilizado con mayor frecuencia en las discusiones relativas sobre la energía de biomasa, es decir, al combustible energético que se obtiene directa o indirectamente de recursos biológicos. La energía de biomasa que procede de la madera, residuos agrícolas y estiércol, continúa siendo la fuente principal de energía de las zonas en desarrollo (Estrada, 2010).

En términos energéticos, se puede considerar una fuente renovable debido a que en esencia, proviene del sol. En la fotosíntesis las plantas convierten el dióxido de carbono del ambiente y el agua del suelo en carbohidratos para formar la materia orgánica, gracias a la clorofila que ayuda a absorber la energía de la luz solar. Cuando estos carbohidratos se queman se convierten nuevamente en dióxido de carbono y agua, liberando la energía que contienen, completando un ciclo que puede preservarse indefinidamente (BUN-CA, 2002).

Existen diferentes tipos de biomasa que pueden ser utilizados como recursos energéticos; biomasa natural, residual seca y húmeda y los cultivos energéticos.

- Biomasa natural: Es la que se produce en la naturaleza sin ninguna intervención humana. El problema que presenta este tipo de biomasa es la necesaria gestión de la adquisición y transporte del recurso al lugar de utilización. Ésto puede provocar que la explotación de esta biomasa sea inviable económicamente.
- Biomasa residual (seca y húmeda): Son los residuos que se generan en las actividades agrícolas (leñosos y herbáceos) y ganaderas, en las forestales, en la industria maderera y agroalimentaria, entre otras y que todavía pueden ser utilizados y considerados subproductos. Se denomina biomasa residual húmeda a los vertidos llamados biodegradables, es decir, las aguas residuales urbanas e industriales y los residuos ganaderos
- Cultivos energéticos: Estos cultivos se generan con la única finalidad de producir biomasa transformable en combustible. Estos cultivos se pueden dividir en:
  - a. Cultivos ya existentes como los cereales, oleaginosas, remolacha, etc.
  - b. Lignocelulósicos forestales (chopo, sauces, etc.)
  - c. Lignocelulósicos herbáceos como el cardo
  - d. Otros cultivos como la patata

La utilización de la biomasa con fines energéticos tiene las siguientes ventajas, en función de la tecnología usada y las condiciones de la región en la que se sitúe:

- Disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero
- No emite contaminantes sulfurados o nitrogenados, ni apenas partículas sólidas
- Los cultivos energéticos sustituirán a cultivos excedentarios en el mercado de alimentos. Eso puede ofrecer una nueva oportunidad al sector agrícola
- Puede provocar oportunidades económicas en entornos suburbanos y rurales
- Disminuye la dependencia externa del abastecimiento de combustibles
- Aumenta la vida útil de los sitios de disposición final de residuos y facilita su operación
- Cuando se utiliza como biomasa la parte orgánica de los residuos sólidos domiciliarios, se facilita el aprovechamiento de algunos materiales

Antes de que la biomasa pueda ser usada como energía debe ser convertida en una forma más conveniente para su transporte y utilización como el carbón vegetal, gas, etanol y electricidad.

### 1.2.1 Procesos de conversión de la biomasa

- **Combustión directa:** Se utilizan sistemas para generar calor que puede ser aplicado directamente para cocción de alimentos o secado de productos agrícolas, o indirectamente en la producción de vapor para procesos industriales o generación de electricidad. Puede consistir en módulos simples como estufas, hornos y calderas o módulos avanzados como la combustión de lecho fluidizado.

Suelen ser sistemas ineficientes pues mucha de la energía liberada es desperdiciada y en condiciones no controladas pueden causar contaminación. Sin embargo, con buenas prácticas de producción como la densificación<sup>3</sup> o el secado de la biomasa, además de diseños adecuados, se logra una combustión más completa y en consecuencia una mayor eficiencia.

- **Procesos termoquímicos:** Estos procesos transforman la biomasa en un producto de más alto valor, con una densidad y un poder calorífico por unidad de masa mayor. Cuando la biomasa es quemada bajo condiciones controladas, sin hacerlo completamente, su estructura se rompe en compuestos gaseosos, líquidos y sólidos que pueden ser utilizados como combustible para generar calor y electricidad. El proceso básico se llama pirólisis o carbonización e incluye:
  - **Producción de carbón vegetal:** La biomasa se quema con una disponibilidad restringida de aire, lo cual impide que se complete. El residuo sólido se usa como carbón, el cual tiene mayor densidad, no produce humo y es ideal para uso doméstico.

La forma más antigua de producirlo es en hornos de tierra y mampostería. Para los primeros se realiza una excavación en donde se coloca la biomasa, la cual es cubierta con tierra y vegetación y en los segundos se utiliza arcilla, ladrillos e incluso acero, lo que incrementa la inversión inicial pero aumenta la eficiencia y capacidad de producción, así como la calidad final de los productos.

- **Gasificación:** Tipo de pirólisis en la que se utiliza una mayor proporción de oxígeno con el objeto de optimizar la producción de gas, constituido por una mezcla rica en metano, monóxido de carbono y nitrógeno. Las ventajas que tiene la utilización de este gas con respecto a la biomasa natural son:
  - Es versátil y se puede utilizar para los mismos usos que el gas natural
  - Puede quemarse en motores de combustión y turbinas de gas para generar electricidad y calor
  - Posee menos impurezas y al quemarse genera menos contaminantes

---

<sup>3</sup> Se refiere al proceso de compactar la biomasa en briquetas para facilitar su utilización, almacenamiento y transporte. Las briquetas son para usos domésticos, comerciales e industriales. La materia prima puede ser aserrín, desechos agrícolas y partículas de carbón vegetal, el cual se compacta a altas presiones.

- Procesos bioquímicos: Estos procesos utilizan las características bioquímicas de la biomasa y la acción metabólica de los microorganismos para que puedan producir combustible líquido o gaseoso. Son más apropiados para la conversión de la biomasa húmeda. Los más importantes son los siguientes:
  - Degradación anaerobia: Ésta transformación húmeda se realiza en un ambiente sin oxígeno y produce un combustible llamado biogás. En general, se coloca la biomasa en un recipiente cerrado y allí se deja fermentar algunos días. Dependiendo de la temperatura se produce una cierta cantidad de gas rico en metano y dióxido de carbono.<sup>4</sup>
  - Combustibles alcohólicos: Se refiere principalmente a la producción de combustibles líquidos como el etanol y metanol. El primero se produce por fermentación de azúcares y el segundo por la destilación de madera. Estos procesos se han utilizado durante siglos para la elaboración de licores y actualmente los destilados pueden ser empleados en forma pura o combinados, para transporte o propulsión de máquinas.
  - Biodiésel: Se compone de ácidos grasos y ésteres alcalinos, obtenidos de aceites vegetales, grasa animal y grasas recicladas. A partir de un proceso llamado transesterificación, los aceites derivados orgánicamente se combinan con alcohol y se alteran químicamente para formar ésteres grasos como el etil o metilo éster. Pueden ser mezclados con diésel en porción de 20%, aunque otras cantidades también sirven, dependiendo del costo del combustible base y de los beneficios esperados. Su gran ventaja es reducir las emisiones considerablemente, así como el humo y el olor (BUN-CA, 2002).

Gracias este abanico de posibilidades tecnológicas, se puede obtener energía a partir de los residuos sólidos urbanos y de los lodos de las centrales depuradoras y potabilizadoras de agua. Energía, que en principio es contaminante, pero que lo sería en mucha mayor medida si no se aprovechase, pues el proceso natural de putrefacción de la materia orgánica tiene como resultado la emisión de gas metano y dióxido de carbono (GEI).

### **1.3 Residuos sólidos urbanos (RSU)**

A partir de la segunda mitad del siglo XX, el mundo comenzó a vivir una industrialización acelerada, intensificándose con el paso de los años. Ésto provocó una expansión económica sin precedentes asociada a una mayor demanda de bienes y productos para una población cada vez más numerosa y con patrones de consumo más exigentes. Como consecuencia se han agravado los problemas ambientales de contaminación atmosférica y de generación de residuos (SEDESOL, 1999).

Desafortunadamente la falta de visión de la humanidad, para generar la infraestructura necesaria al ritmo que se acrecentaban las demandas de tratamiento y disposición adecuada de los residuos, originó que éstos últimos se depositaran en forma y lugares donde incrementaron la problemática.

Según la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos en México, éstos se clasifican en tres grandes grupos.

---

<sup>4</sup> Este tema se tratará con mayor profundidad en el siguiente capítulo

- Residuos sólidos urbanos: Son los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública, y de los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos, siempre que no sean considerados por la misma ley en otra categoría.
- Residuos peligrosos: Son todos aquellos que posean alguna característica de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contengan agentes infecciosos, así como envases embalajes o empaques que puedan contaminar los suelos.
- Residuos de manejo especial: Son aquellos generados en los procesos productivos que no reúnen las características para ser considerados peligrosos o como sólidos urbanos que son producidos por grandes fuentes de residuos sólidos.

Además de los incompatibles, que son los que al entrar en contacto o ser mezclados con agua u otros materiales o residuos reaccionan produciendo calor, presión, fuego, partículas, gases o vapores dañinos.

Tienen también la clasificación de residuos urbanos según la citada ley, los siguientes:

- Residuos procedentes de la limpieza de vías públicas, zonas verdes, áreas recreativas y playas.
- Animales domésticos muertos, así como muebles, enseres y vehículos abandonados.
- Residuos y escombros procedentes de obras menores de construcción y reparación domiciliaria.

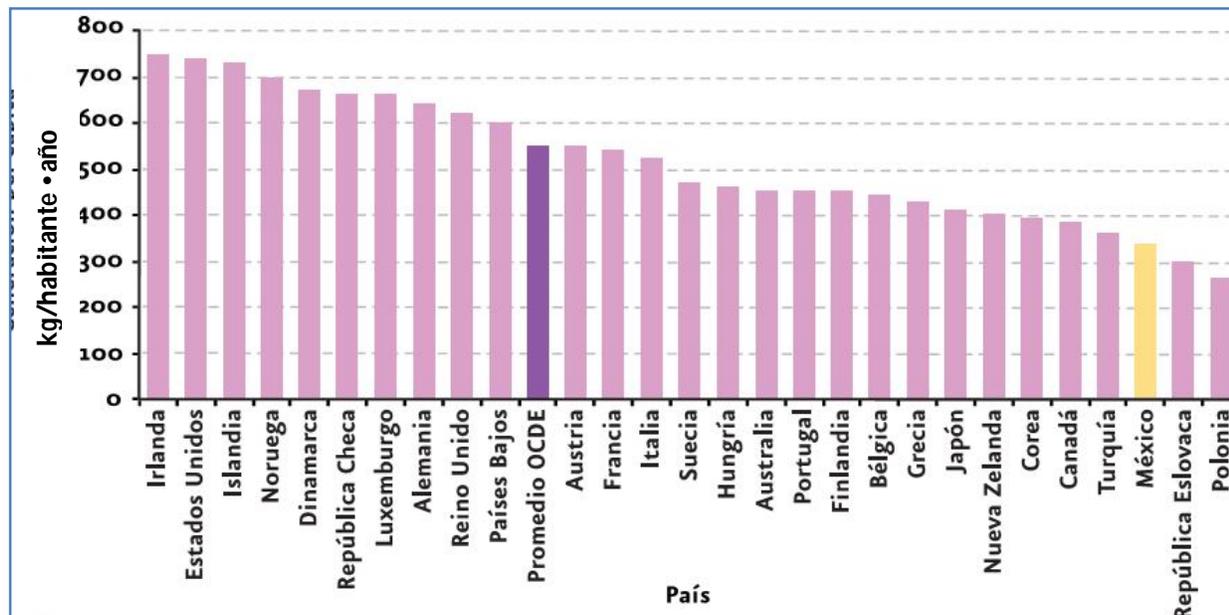
A todo esto hay que añadir la fracción de residuos producidos en los domicilios, pero que por su toxicidad tienen la consideración de residuos peligrosos y que se tratan aparte:

- Aceites minerales. Procedentes de los vehículos ciudadanos
- Baterías de vehículos
- Residuos de material electrónico. Teléfonos móviles, computadoras, etc.
- Electrodomésticos de línea blanca. Pueden contener Cloro Fluoro Carbono, perjudicial para la capa de ozono
- Medicamentos
- Pilas
- Productos químicos en forma de barnices, colas, disolventes, ceras, etc.
- Termómetros
- Lámparas fluorescentes y bombillas de bajo consumo

Durante los últimos años, en México se ha manifestado un alza importante en la cantidad de residuos generados; de 1997 a 2004 la generación total de RSU tuvo un ascenso de 40%, y seguía en aumento (SEMARNAT, 2005). En los últimos 10 años, se elevó un 26%, debido a que se relaciona íntimamente con el incremento de la población y los hábitos de consumo (SEMARNAT, 2008).

En 2007 se estimó una generación de 36.9 millones de toneladas, lo que equivale a una producción diaria de 101 mil toneladas. Esta cifra se ha logrado a través de crecimientos sin precedentes en los últimos 50 años, ya que se calcula que se incrementó desde una generación de 300 g/hab•día en aquel entonces, a casi 1 kg/día en 2007. Considerando a los países de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE), en 2006 la generación resultó un 39% menor al promedio de los países que la componen

(336 contra 550 kg/hab·año). En este año, un ciudadano mexicano generó un 29% más residuos que un polaco (Figura 1.6) y cerca del 45% de lo que generó un irlandés (OCDE, 1998).



**Figura 1.6 Generación per cápita de residuos a nivel mundial (OCDE, 2008)**

En cuanto a la generación nacional de residuos, también existen diferencias importantes por región. Por ejemplo, el centro contribuye con la mitad de la generación total de RSU, seguido por la frontera norte con el 16% del total, y el Distrito Federal con el 13%. En 10 años, la generación por zona ha aumentado considerablemente, en la región centro un 33%, en el sur 26% y 13% en el Distrito Federal. Sin embargo, la frontera norte aumentó casi tres veces su generación y la región norte la disminuyó en un 33% (SEMARNAT, 2009).

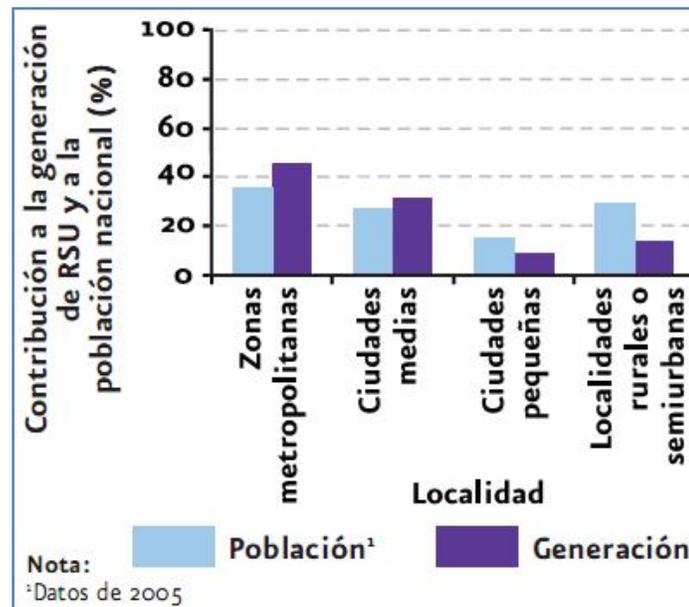
Algunos datos importantes son las relaciones entre los tamaños de las poblaciones y las contribuciones respectivas a la generación total (Figura 1.7). Por ejemplo, las poblaciones rurales o semiurbanas cuya población es menor a los 15 mil habitantes donde vive un 37% de los habitantes del país, contribuye con el 13.6% del volumen total, las zonas metropolitanas, con más de un millón de habitantes, con el 50%, aumentando un 48% en 10 años.

Según el artículo 18 de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos, los residuos sólidos urbanos podrían clasificarse en orgánicos e inorgánicos con objeto de facilitar su clasificación primaria y secundaria de acuerdo con los programas estatales y municipales de prevención y gestión integral de residuos, así como ordenamientos aplicables; a continuación se hablará un poco más de ellos.

### 1.3.1 Composición de los residuos

Según SEMARNAT (2009) se ha encontrado una correlación entre la composición de los residuos y las condiciones económicas del país. Aquellos con menores ingresos generan una menor cantidad de residuos y en sus componentes predomina la materia orgánica. En

México, la generación de RSU por tipo también ha cambiado drásticamente en los últimos años: En la década de los 50s el porcentaje de los residuos orgánicos oscilaba entre el 65 y 70%, mientras que para 2007 la cifra se redujo hasta el 50% (Figura 1.8).



**Figura 1.7 Generación de residuos sólidos urbanos por zona (INEGI, 2005)**

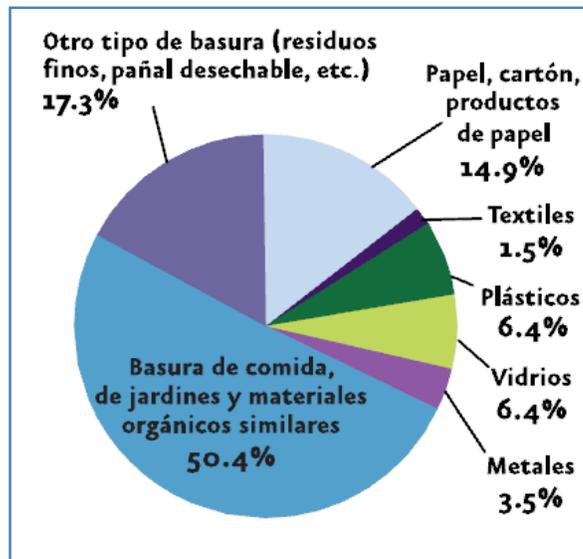
Las categorías que mejor describen los residuos en la actualidad se forman de los siguientes materiales:

- Vidrio.- Son los envases de cristal, frascos, botellas, etc.
- Papel y cartón.- Periódicos, revistas, embalajes de cartón, envases de papel y cartón.
- Plásticos.- En forma de envases y elementos de otra naturaleza
- Textiles.- Ropas y vestidos y elementos decorativos del hogar
- Metales.- Son latas, restos de herramientas, utensilios de cocina, mobiliario, etc.
- Madera.- En forma de muebles mayoritariamente
- Escombros.- Procedentes de pequeñas obras o reparaciones domésticas
- Orgánicos.- Son los restos de comida, de jardinería, etc. En peso son la fracción mayoritaria en el conjunto de los residuos urbanos. Se caracterizan por degradarse mucho más rápidamente que los demás materiales.

### 1.3.2 Problemas asociados con un mal manejo de los residuos

Cada tipo de residuo afecta de manera específica a México; los inorgánicos pueden tardar miles de años en degradarse de manera natural, por lo que contaminan el suelo, volviéndolo improductivo y cuando se mezclan con los orgánicos generan lixiviados cargados de materiales peligrosos, especialmente para los mantos acuíferos. Por su parte, los residuos orgánicos al degradarse liberan gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global; dióxido de carbono y gas metano, siendo este último 23 veces más nocivo a tal efecto (Watson y col., 2002).

Los residuos acumulados en las calles afectan la imagen y la infraestructura urbana. Cuando se acumulan cerca de las alcantarillas provocan las devastadoras inundaciones que padecen las comunidades. Contaminan los lechos de los ríos, lagos y destruyen el hogar de millones de especies en los diversos ecosistemas (Tabla 1.1).



**Figura 1.8 Generación por tipo de residuos sólidos urbanos (SEDESOL, 2005)**

Los residuos orgánicos producen malos olores, originan plagas y contribuyen para la proliferación de la fauna nociva, teniendo como consecuencia diversas enfermedades entre la población.

**Tabla 1.1 Problemas asociados a la falta de manejo de los residuos (GTZ, 2003)**

Problema ambiental	Origen
Contaminación del suelo, de lagos y ríos superficiales y subterráneos.	La filtración de líquidos que producen los residuos orgánicos, que al mezclarse con los residuos peligrosos, se convierten en una sustancia sumamente tóxica. Estos líquidos son conocidos como lixiviados.
Generación de gas	La descomposición de los residuos vegetales y animales, que además de ser tóxicos y explosivos contribuyen al problema del calentamiento global.
Interrupción de cauces de agua, o desperfectos en el funcionamiento de los sistemas de drenaje y la salida de aguas negras, lo que provoca inundaciones.	Depósito de residuos en arroyos, canales, barrancas o en las vías públicas de las localidades.
Contaminación del agua. Muerte de organismos que comen residuos, se enredan o quedan atrapados en materiales elásticos o fibrosos que los estrangulan o inmovilizan	Depósito o arrastre de todo tipo de residuos hacia lagunas, mares o ríos
Contaminación del aire	Quema de residuos que libera partículas y sustancias que se respiran y que también se suman a los gases que contribuyen al cambio climático.

Los residuos pueden generar muchos problemas a la salud humana. Se pueden producir por distintos tipos de condiciones, o componentes que pueden ser:

- De origen biológico, a lo que comúnmente se conoce como fauna nociva que crece o prolifera cuando hay residuos manejados inadecuadamente y que transporta microbios que provocan enfermedades como el cólera, la rabia y otras (Tabla 1.2).
- De origen químico, como sustancias tóxicas, corrosivas, explosivas o inflamables.
- De origen físico, como objetos punzocortantes que causan heridas por las que pueden contagiarse enfermedades como el SIDA.

**Tabla 1.2 Enfermedades provocadas por la fauna nociva de los residuos sólidos (GTZ, 2003)**

Fauna nociva	Enfermedades que provoca	Información especial
Moscas	Cólera, fiebre tifoidea, salmonelosis, disentería, diarreas.	Las moscas pueden transmitir al menos 20 enfermedades graves. Su radio de acción puede ser de 10 km en 24 horas. En sólo un kg de residuos se pueden reproducir cerca de 70,000 moscas.
Cucarachas	Fiebre tifoidea, gastroenteritis, lepra, intoxicación alimentaria.	Las cucarachas pueden transmitir más de 70 enfermedades y cerca de 8% de la población humana es alérgica a ellas.
Ratas	Peste bubónica, tifus murino, leptospirosis, diarreas, disentería, rabia.	Las ratas, además de que pueden transmitir enfermedades graves, contribuyen al deterioro y a la contaminación de los alimentos. Provocan también daños a los edificios y casas y pueden provocar incendios ya que roen el plástico de los cables eléctricos. Un dato asombroso, es que una sola pareja puede dar origen a cerca de 10 mil descendientes en el transcurso de un año.
Mosquitos	Malaria, fiebre amarilla, dengue, encefalitis vírica.	

Otras enfermedades más graves aún son las causadas por la contaminación de agua o suelo con residuos de muy alta toxicidad, como es el caso del mercurio, cadmio, y otros productos empleados en actividades mineras, agrícolas e industriales. A veces estos residuos tan tóxicos también vienen de las propias casas, aunque por supuesto en cantidades mucho menores que en el caso de la industria.

Aunado al problema ambiental y de salud, tener una imagen de suciedad provoca efectos económicos negativos, ya que en una zona con grandes acumulaciones de basura baja el

precio de los terrenos y casas, disminuye el atractivo turístico de las regiones y hace que los comerciantes o inversionistas no se interesen en hacer sus negocios en esas localidades.

El antiguo problema de la gestión de los residuos radicaba en cómo minimizar sus impactos en la flora y fauna, en los recursos, en la salud de las personas, en la calidad de vida, en los ciclos ecológicos y también en la infraestructura. Sin embargo, el nuevo reto, es desarrollar sistemas de tratamiento que, además de abatir la problemática actual, sean económicamente viables y auto sostenibles, minimizando de una vez por todas, la huella ambiental que dejan las ciudades.

#### 1.4 Gestión y manejo integral de los residuos sólidos

El manejo tradicional de los residuos urbanos comprende las fases de recolección, transporte y depósito en sitios o tiraderas municipales. En cada una de estas fases se producen impactos sobre el medio ambiente y la salud que pueden prevenirse, disminuirse o evitarse.

Para aprovechar los residuos y aproximarnos al modelo sostenible (Figura 1.9) que necesita el planeta, existen diferentes alternativas de gestión. Antes de hablar de la tecnología sería interesante revisar el siguiente modelo de consciencia enfocado en resolver el problema de los residuos desde las fuentes de generación (Arvizu, 2010).



**Figura 1.9 Modelo de manejo integral de residuos sólidos urbanos (GTZ, 2006)**

Los puntos o etapas que se deben incluir en un plan de manejo integral de residuos sólidos urbanos según la Guía para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Municipales (Medina y Jimenez, 2001) son:

1. Reducción en la fuente
2. Reutilización y reciclaje
3. Tratamiento
4. Disposición final

Un interesante complemento a las alternativas tecnológicas es el modelo de las 5Rs, que se describe a continuación:

- *Rechazar*: Se refiere a un consumo inteligente al comprar productos que generen el mínimo impacto ambiental posible y evitando la adquisición de productos que a pesar de ser necesarios tengan implicaciones ambientales de importancia
- *Reducir*: La idea es consumir sólo lo indispensable y evitar adquirir artículos o servicios innecesarios en nuestras actividades diarias
- *Reutilizar*: Se refiere a encontrar otros usos para los productos cuyo objetivo principal ya ha sido cubierto o simplemente alargar la vida útil de los mismos
- *Reparar*: Para volver a encontrar un uso para algunos materiales como se menciona en el punto anterior, es en ocasiones necesario realizar alguna modificación o arreglo en el producto original
- *Reciclar*: Debería ser la última alternativa a elegir, ya que se refiere a procesos tecnológicos con aplicación de recursos energéticos y materiales que se podrían ahorrar. Tiene una aplicación limitada para ciertos materiales causada principalmente por la dificultad para encontrar mercados viables económicamente para los productos del reciclaje. Aún así, el impacto ambiental de la utilización de la mayoría, sí produce ahorros y ventajas ambientales

Aquí se presentan algunos ejemplos de los tratamientos que se pueden llevar a cabo para el aprovechamiento de ciertos materiales.

#### **1.4.1 Tratamientos comunes para los RSU**

##### *Tratamiento de los plásticos*

Los envases de plástico pueden someterse a tres tipos de procesos:

1. Reciclado mecánico
2. Reciclado químico
3. Valorización energética

El primero consiste en trocear el material para introducirlo posteriormente en una máquina extrusora-granuladora para moldearse después por los métodos tradicionales. Solamente puede aplicarse a los termoplásticos, que son aquellos que funden por la acción de la temperatura. Presenta dos problemas fundamentalmente. El primero es que el plástico ya utilizado pierde parte de sus propiedades lo que obliga a emplearlos en la fabricación de otro tipo de productos con menos exigencias. El segundo es la dificultad para separar los distintos tipos de plásticos. Para ello se han desarrollado diversos sistemas.

El segundo, reciclado químico se utiliza cuando el plástico está muy degradado o es imposible aislarlo de la mezcla en que se encuentra. Se define como la reacción reversible de la polimerización hacia la recuperación de las materias primas. Según el tipo de polímeros se distinguen dos clases de procesos:

1. Polímeros de adición. Por dos procedimientos diferentes :
  - Vía térmica. Se usan los siguientes sistemas:
    - Pirólisis
    - Gasificación
    - Cracking
  - Vía catalítica. Son los siguientes:
    - Hidrogenación
    - Hidrocracking
    - Cracking.
2. Polímeros de condensación. Se aplican los siguientes:
  - Hidrólisis
  - Metanólisis
  - Glicólisis
  - Otros

Por último la valorización energética es un tratamiento adecuado para plásticos muy degradados. Es una variante de la incineración en la que la energía asociada con el proceso de combustión es recuperada para generar energía. Las plantas en las que se realiza se asemejan a una central térmica pero difieren en el combustible que en este caso son residuos plásticos.

#### *Tratamiento del vidrio*

Los envases de vidrio se pueden reciclar sin que el material pierda ninguna de sus propiedades. Una vez recogidos son limpiados de toda partícula de tierra o grasa. Las botellas pasan por algunos tamices y martillos para formar un polvo más fino, que sometido a altas temperaturas en un horno, se funde para ser moldeado nuevamente en forma de botellas, frascos, tarros, etc. que tienen exactamente las mismas cualidades que los objetos de que proceden. El proceso supone un ahorro de materias primas y de energía muy considerable.

#### *Tratamiento del papel y cartón*

Consiste en la recuperación de las fibras de celulosa, mediante separación en soluciones acuosas en las que se incorporan sustancias tensoactivas<sup>5</sup> con el fin de eliminar la tinta. La tinta queda en la superficie del baño y se puede separar con facilidad.

Una vez retirada la tinta, se somete la suspensión de las fibras a un secado sobre una superficie plana, para recuperarlas. Después pasan por unos rodillos que las aplanan y compactan, saliendo finalmente la lámina de papel reciclado.

#### *Tratamiento de los metales*

Los envases de acero estañado, más conocidos como hojalata, son perfectamente reciclables, se emplean en la fabricación de otros envases o como chatarra en las fundiciones siderúrgicas después de haber sido desestañada la hojalata. Todo el acero recuperado se recicla por las necesidades de las acereras. El proceso de reciclado de la hojalata reduce el consumo energético de forma muy notable.

---

<sup>5</sup> Sustancias que influyen por medio de la tensión superficial, en la superficie de contacto entre dos fases, pueden aglomerar, emulsionar o flocular líquidos para formar o deshacer mezclas.

Los envases de aluminio se consideran materia prima en los mercados internacionales. Su reciclado supone un elevado ahorro energético y los materiales obtenidos mantienen sus propiedades al fundirse repetidas veces. Para separarlos del resto se utiliza un mecanismo denominado de corrientes inducidas de Foucault<sup>6</sup> que proyecta hacia fuera de la cinta transportando los envases de aluminio, pega a ésta los férricos y deja igual a los demás. En combinación con sistemas de electroimanes sirve para completar la separación de los metales.

### *Otros residuos*

Los neumáticos pueden sufrir diferentes procesos:

- Recauchutado, con lo que puede volver a utilizarse. Consiste en volver a realizar el dibujo gastado
- Corte. Para que mediante un fundido a presión se puedan fabricar felpudos, zapatillas, etc.
- Trituración. Con dos variantes:
  - Trituración a temperatura ambiente
  - Trituración criogénica. Ésta última utiliza bajas temperaturas por debajo de su temperatura de transición vítrea convirtiéndolo en un material frágil y quebradizo. Se obtiene así un grano fino y homogéneo

El triturado se emplea como:

- Caucho asfáltico. Mejora el drenaje de la capa asfáltica así como prolonga la duración del pavimento y reduce su fragilidad
- Hormigón de asfalto modificado
- Combustible en grano. El caucho compuesto por un 83% de carbono en peso tiene una capacidad calorífica de 35 MJ/kg. La combustión debe estar muy controlada porque los neumáticos contienen azufre
- Utilización en el sistema de compost de fangos. El neumático triturado se utiliza para favorecer la oxigenación y el compost

Los aceites de automoción usados son residuos peligrosos. Contienen productos de la degradación de los aditivos que se les añaden como fenoles, compuestos de cloro, hidrocarburos polinucleares aromáticos clorados (Hidrofluorocarbonos HF<sup>7</sup>), compuestos de plomo, etc. Son procesados por destilación que permiten obtener nuevamente aceites de una calidad comparable a los obtenidos del crudo.

Por último los residuos voluminosos como muebles, electrodomésticos son recuperados por particulares y asociaciones que los reparan y revenden o utilizan. Se debe tener en cuenta que ciertos electrodomésticos de línea blanca como frigoríficos deben tratarse para su desguace por personal especializado por contener clorofluorocarbonos (CFC) de

---

<sup>6</sup> El principio físico que produce la repulsión de las latas de aluminio se relaciona a la inducción electromagnética. Una corriente es inducida en la lata, por el campo magnético de la máquina, que al estar en movimiento produce una fuerza de repulsión que hace que se salte. Los materiales ferrosos se adhieren a la banda y los no ferrosos son los que saltan fuera de ella.

Por su parte, los materiales orgánicos se pueden someter a dos clases de procesos:

- Proceso anaerobio. Metanización
- Proceso aerobio. Proceso de compost

El primero, denominado también tratamiento anaerobio, es un proceso biológico acelerado artificialmente, que tiene lugar en condiciones muy pobres de oxígeno o en su ausencia total, sobre substratos orgánicos. Como resultado se obtiene una mezcla de gases formada por un 60% de metano, 40% dióxido de carbono y un 1% de amoníaco y ácido sulfhídrico. El gas combustible, metano, permite obtener energía.

El sistema de compost es la transformación biológica de la materia orgánica en productos húmicos conocidos como compost y que se emplean como fertilizante. Se realiza en presencia de oxígeno y en condiciones de humedad, pH y temperatura controlados (GTZ, 2006).

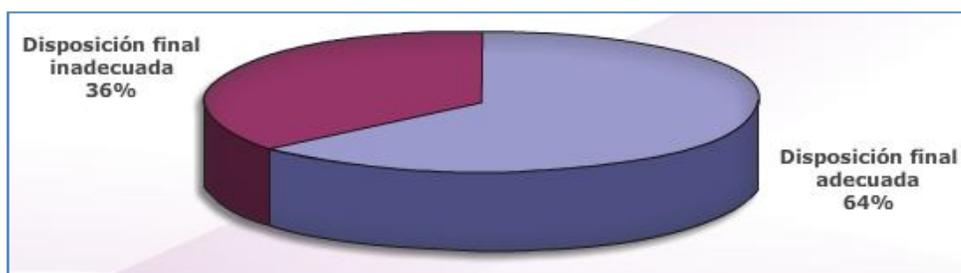
En el primer caso es preciso haber separado previamente la materia orgánica para que no presente ninguna clase de impurezas ni lleve restos de medicinas, sustancias tóxicas, etc.

En primer lugar se procede a su molido y después se dispone en hileras de dos metros y medio a cielo abierto. Las pilas son volteadas periódicamente con el fin de facilitar la oxigenación y evitar su fermentación anaerobia. El volteo llega a hacerse hasta dos veces por semana mientras la temperatura se mantiene alrededor de 55°C y el grado de humedad de la hilera es de entre el 50% y el 60% (Phillips, 2007).

A partir del tercer volteo, la temperatura se mantiene en los 25°C indicando que ya ha finalizado la fermentación. Ésto ocurre transcurridas tres o cuatro semanas. Después se deja otro periodo equivalente para que se cure y luego proceder a su afino, para retirar cualquier clase de impureza (partículas metálicas, trozos de vidrio, etc.) que pudiera haber quedado. Existen otras variantes a cielo abierto como la pila estática aireada. Por último, se han desarrollado sistemas de cubierta con el fin de optimizar el proceso y sobre todo evitar malos olores.

#### 1.4.2 Rellenos sanitarios

En el país existen 2,445 municipios, de los cuales se sabe que menos del 5% tienen un manejo adecuado de sus residuos. Se estima que sólo se recolecta el 87% del peso que se genera. En México, existen sólo 114 rellenos sanitarios y 24 sitios controlados por lo que solamente el 64% de los residuos tiene una disposición final adecuada (Figura 1.10) y 37 mil toneladas diarias se disponen en barrancas, lotes baldíos, cuevas y terrenos no adecuados (Afferden y col, 2002).



**Figura 1.10 Disposición de residuos en México (SEMARNAT, 2010)**

Existen 4 tipos comunes de rellenos sanitarios en el mundo y a continuación se detallan las características que los distinguen.

1.- Relleno sanitario tradicional (húmedo). Esta tecnología consiste en la disposición final de los residuos generados por comunidades urbanas y rurales a nivel municipal de tal forma que la disposición final en el suelo no cause perjuicio al medio ambiente y molestias o peligros para la salud y seguridad pública. Se colocan los residuos en celdas o capas compactadas, cubiertas con tierra arcillosa, utilizando maquinaria pesada para la distribución, homogeneización y compactación. Antes de comenzar la operación se prepara el sitio para evitar al máximo la infiltración de lixiviados en el suelo. Es posible utilizar una geomembrana que es una placa de plástico de alta densidad o se compacta el suelo original que debe ser de tipo arcilla o tepetate lo que cuenta con un factor alto de protección y baja permeabilidad. Al mismo tiempo se construyen obras adyacentes de control y monitoreo como pozos de venteo, de observación de agua subterránea e instalaciones para la recolección y tratamiento de lixiviados.

2.- Relleno sanitario con pre-tratamiento de alta compactación (seco). Su principal objetivo es acelerar y facilitar el control de los rellenos sanitarios a través de la reducción del volumen con una prensa embaladora. El tratamiento puede contener varios procesos adicionales como selección manual o totalmente automatizada hasta el encapsulamiento de las pacas, con plásticos los cuales pueden adaptarse a las necesidades locales, a la variación de la cantidad y las propiedades de los residuos. Aumenta al doble la vida útil de un relleno húmedo, disminuye en un 75% la cantidad de material de cobertura, se reduce la dispersión de plagas y materiales ligeros, facilita el manejo, reduce problemas de hundimiento, puede inhibir la degradación biológica, reduce la cantidad de operadores en el sitio pero se compensa con los que deben incluirse en la compactación y sigue necesitando los sistemas de monitoreo y control de lixiviados y gas.

3.- Relleno con pre-tratamiento mecánico biológico. La estabilización de los rellenos convencionales puede llevarse a cabo en 25 años y en rellenos secos hasta 100 años. Para que el periodo de monitoreo no deba extenderse tanto tiempo se debe minimizar el potencial contaminante de los mismos antes de disponerlos y la forma de lograrlo es extraer al máximo los materiales orgánicos convirtiéndolos en material inerte. El tratamiento consiste en dos etapas: Mecánico para acondicionar los residuos y biológico para la estabilización de los mismos. El tratamiento acelera (hasta 5 años de monitoreo) y facilita el control de los rellenos a través de la reducción de volumen (50-70%), cantidad y calidad de lixiviados (20-40% de la DBO original y emisión de biogás (1-5% del teórico total).

4.- Relleno sanitario manual. Ésta técnica constituye una alternativa apropiada para el manejo ambiental de los residuos sólidos de menos de 40,000 habitantes, que no pueden adquirir el equipo necesario para un relleno mecanizado. Cuenta con cerco perimetral, drenaje periférico para la desviación de aguas pluviales, impermeabilización, drenaje de lixiviados, sistema de evacuación de biogás y casetas de vigilancia. Virtualmente es apto por los bajos costos de operación y menor inversión inicial pero se crean problemas para controlar la vida útil del relleno cuando no se cuenta con la experiencia necesaria para controlar la entrada de los RSU (Kebekus, 2000).



**Figura 1.11 Preparación de un sitio de disposición  
(Wehenpohl y col., 2003)**

Según la NOM-083-SEMARNAT-2003 (Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones de selección de sitio, el diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura, y obras complementarias de un sitio de disposición final) la disposición final es la acción de depositar o confinar permanentemente residuos en sitios e instalaciones cuyas características permitan prevenir su liberación al ambiente y las consecuentes afectaciones de la salud de las personas y ecosistemas. Este método consiste en depositar en el suelo los desechos sólidos, los cuales se esparcen y compactan reduciéndolos al menor volumen posible para que así ocupen un área pequeña. Luego se cubren con una capa de tierra y se compactan nuevamente al terminar el día.

Según la clasificación de la NOM-083 existen tres alternativas para la disposición final, contempladas por el estado, los sitios no controlados, los controlados y los rellenos sanitarios. Los últimos cumplen con los requisitos de obra de infraestructura y operación, así como con la impermeabilización a diferencia de los sitios controlados que sólo cumplen con las dos primeras. Los sitios no controlados o "tiraderos a cielo abierto" son inadecuados y no cumplen con ninguna normatividad.

Para construir un relleno sanitario es importante seleccionar el terreno que reúna condiciones técnicas adecuadas como son: Topografía, tipo de suelo, nivel a que se encuentran las aguas subterráneas y disponibilidad de material para cubrir la basura.

El relleno debe contar con (Hernández y col., 2003):

- Una buena compactación de los desechos, antes y después de cubrirlos con tierra.
- Cubrimiento diario de la basura con una capa de tierra especial o un material que cumpla con las especificaciones de la norma.

- Controlar con drenajes y otras técnicas los líquidos o lixiviados y los gases que produce el relleno, para mantener las mejores condiciones de operación y proteger el ambiente.
- Evitar por medio de canales y drenajes que el agua de lluvia ingrese al relleno sanitario.
- Una supervisión constante, tanto de los administradores como de las organizaciones comunales.
- Monitoreo de los mantos acuíferos.
- Monitoreo de los residuos entrantes al relleno, cantidades y características.
- Sistemas de administración para evitar la entrada de residuos peligrosos.

Algunos de los beneficios asociados con la disposición final de los residuos son (Afferden y col, 2002):

- Los residuos sólidos urbanos diariamente son compactados y cubiertos con tierra, lo que impide la anidación de especies consideradas plagas, como ratas, cucarachas, moscas, etc. La compactación y cubierta impide que el viento disperse al aire partículas contaminantes.
- El suelo donde se construya el relleno sanitario es protegido con diferentes capas de materiales impermeables, que impiden la filtración de lixiviados tóxicos y su derivación a pozos o lagunas de monitoreo y control.
- El calor y la presión alta provocarán la producción de gases (metano principalmente), que puede ser utilizado para producción de energía eléctrica y combustible para otras necesidades mismas de operación del relleno sanitario.

Los rellenos sanitarios tienen las siguientes implicaciones que se derivan de la falta de atención en las etapas iniciales del proceso de gestión adecuado (Jaramillo, 1991):

- Se depositan residuos y desperdicios que podrían ser utilizados para la industria del reciclaje.
- Su correcta operación y mantenimiento es costosa. El mínimo error o descuido, puede provocar contaminación y generará más costos para su remediación.
- Después de su clausura, se tendrá que monitorear hasta por 50 años para garantizar que no hay escape de contaminantes al suelo, aire y cuerpos de agua subterráneos o superficiales que se encuentren cerca.
- Una vez clausurado, tiene que pasar un periodo de mínimo 20 años para que el "terreno" pueda usarse; solo podrán construirse jardines, algunas especies de árboles, pero no casas, edificios ni producir cultivos o especies agrícolas.
- Los lixiviados se vuelven líquidos tóxicos, prácticamente imposibles de tratar.

Es por esto que la investigación se centra en el desarrollo e implantación de tecnología para ofrecer un adecuado tratamiento de los residuos, con el fin de aprovecharlos y reducir la cantidad que llega a los rellenos sanitarios para aumentar su vida útil, facilitar su operación y reducir las implicaciones ambientales que generan y los riesgos asociados.