



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

EI COMPOSTEO COMO OPCIÓN PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS EN ASENTAMIENTOS IRREGULARES

T E S I N A

PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO INDUSTRIAL
PRESENTA:
GRACIELA LANDÍN MONDRAGÓN

DIRECTOR DE TESINA:
DRA. RINA AGUIRRE SALDIVAR



MÉXICO, D.F

2010



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESTE TRABAJO ESTA DEDICADO A:

Dios, por amarme y estar siempre conmigo

Mi familia, por darme todo su cariño, apoyarme, ser incondicionales, y haber formado en mí a una persona con valores y metas. Sin ustedes no habría podido lograr este sueño

Mis amigos, por llenar de alegría mi vida

Mis profesores, por los consejos y sugerencias que me ayudaron a formarme como profesionista y aún más como persona

A mi asesora de tesis la Dr. Rina Aguirre Saldivar, por el tiempo que me dedicó, su paciencia y experiencia

A la UNAM, por darme la oportunidad de aprender y crecer

GRACIAS POR TODO...

Graciela





CONTENIDO

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO	PÁGINA
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo	1
1.2 Alcances y limitaciones	2
Capítulo 2. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS	4
2.1 Historia de los residuos sólidos urbanos en la Ciudad de México	4
2.2 El consumismo y su relación con la generación de residuos sólidos	6
2.3 Definición y clasificación	9
2.3.1 Problemática socioeconómica	9
2.3.2 Problemática ambiental	11
2.4 Sistema de manejo de residuos sólidos urbanos	12
2.4.1 Generación	12
2.4.2 Separación y Almacenamiento in situ	16
2.4.3 Almacenamiento temporal	17
2.4.4 Recolección y transporte	18
2.4.5 Transferencia	20
2.4.6 Tratamiento	22
2.4.7 Disposición final	23
2.5 Sistema de manejo integral de residuos sólidos urbanos, SMIRSU	25
Capítulo 3. COMPOSTEO	27
3.1 Residuos orgánicos composteables	27
3.2 Proceso biológico	29
3.3 Procedimiento de elaboración	30
3.4 Sistemas de composteo	32
3.4.1 Lombricomposta	35
3.5 Beneficios ambientales y económicos	35
Capítulo 4. CASO DE ESTUDIO	39
4.1 Características de Ocotla	39
4.2 Diagnóstico ambiental de Ocotla	42
4.3 Selección del sistema de composteo	45
4.4 Producción de composta	47
4.5 Dimensión y costo del contenedor	48
4.6 Análisis costo – beneficio ambiental	49



Capítulo 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES **53**

BIBLIOGRAFÍA **56**

MESOGRAFÍA **58**

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Clasificación de los residuos sólidos urbanos	9
Tabla 2.2 Contenedores para almacenamiento temporal	17
Tabla 2.3 Tipos de vehículos de recolección	19
Tabla 2.4 Tipos de rellenos sanitarios	24
Tabla 3.1 Ejemplos de residuos que se pueden compostar	27
Tabla 3.2 Relación C/N	28
Tabla 3.3 Materiales que no son apropiados para compostar	28
Tabla 3.4 Tiempo de vida promedio y potencial de calentamiento global de los gases de efecto invernadero	36
Tabla 3.5 Fertilizantes den el mercado	37
Tabla 3.6 Rendimiento promedio de un kilogramo de fertilizante químico y orgánico	38
Tabla 4.1 Comparación de los sistemas de composteo	45
Tabla 4.2 Generación de RSU en Ocotla	47
Tabla 4.3 Volumen necesario del contenedor	49
Tabla 4.4 Dimensiones y costos del contenedor	49
Tabla 4.5 Tabla de beneficios	50
Tabla 4.6 Vender composta	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Porcentaje de participación de los principales países consumidores en el mundo	8
Figura 2.2 Sistema de Manejo de Residuos Sólidos Urbanos (SMRSU)	12
Figura 2.3 Generación diaria de RSU per cápita, por entidad federativa	13
Figura 2.4 Consumo final privado, producto interno bruto (PIB) y generación de RSU, 1992-2004	14
Figura 2.5 Residuos sólidos que ingresaron, recuperaron y egresaron en cada planta de selección en el 2007	15
Figura 2.6 Contenedores domésticos	16
Figura 2.7 Contenedores en vía pública	18
Figura 2.8 Descarga directa	21
Figura 2.9 Descarga indirecta	21
Figura 2.10 Sistema Integral de Residuos Sólidos Urbanos (SMIRSU)	26
Figura 3.1 Relación temperatura y pH con respecto al tiempo	30
Figura 3.2 Composición de un contenedor compostador y tubería de aireación	31
Figura 3.3 Pila estática	33



Figura 3.4 Ejemplos de compostadores de ladrillo y tela de alambre	34
Figura 3.5 Tambos compostadores	34
Figura 3.6 Cajones compostadores de 2 y 3 compartimentos	34
Figura 3.7 Lombriz rubellus	35
Figura 3.8 Porcentaje de composición de RSU en la Ciudad de México	36
Figura 4.1 Ubicación de Tlalpan en el Distrito Federal	40
Figura 4.2 Localización, clima y precipitación promedio anual en el Distrito Federal	40
Figura 4.3 Plano general e imagen satelital de Ocotla	41
Figura 4.4 Nivel de vida en Ocotla	42
Figura 4.5 Disposición de aguas residuales	43
Figura 4.6 Perros callejeros	44
Figura 4.7 Terreno baldío utilizado como tiradero	44
Figura 4.8 Riesgo por descarga eléctrica	45
Figura 4.9 Esquema de composteo en Ocotla	52



Capítulo 1. Introducción

El hombre y la naturaleza convivieron en armonía durante años. En un principio, el hombre sobrevivió adaptándose a su entorno. Analizándolo, aprendió a cazar y recolectar frutos, después construyó acueductos para alejarse del cauce de los ríos y establecer nuevos asentamientos y, con el paso del tiempo, el respeto por la naturaleza pasó a segundo plano. Fue entonces, cuando surgió un nuevo problema: las que solían ser pequeñas comunidades se convirtieron en grandes ciudades con oficios y actividades diversas, provocando la generación y almacenamiento de grandes cantidades de residuos.

Con la Revolución Industrial, el hombre automatizó sus operaciones y desarrolló técnicas para la producción de artículos en masa y la creación de productos fácilmente desechables. Fue así como apareció el consumismo, que con la ayuda de la mercadotecnia se convirtió, sin duda alguna, en una de las grandes fuentes generadoras de residuos sólidos.

Aunado a esto, en los últimos 50 años la población mexicana se duplicó mientras que la generación de residuos sólidos creció diez veces (Aguilar, 2008); actualmente se producen alrededor de 100,000 toneladas de residuos al día en todo el país (Alatorre, 2009). La dimensión de este problema supera la capacidad de atención y la disponibilidad de recursos financieros del sector público, por lo que es indispensable la participación de toda la sociedad para la prevención y control de los residuos. Por lo tanto, es necesario poner en práctica técnicas que permitan disminuir la cantidad de residuos sólidos y, en ciertos casos, reaprovecharlos. El composteo es una de las técnicas que cumple con estas características ya que reduce los residuos orgánicos que se deben llevar a rellenos sanitarios, además de aprovecharlos al convertirlos en abono.

1.1 Objetivo

Analizar la importancia del composteo como una opción para el aprovechamiento de los residuos orgánicos generados en un asentamiento irregular y, de esta manera, reducir la afectación ambiental que los mismos producen.

Para cumplir con este objetivo se establecieron las siguientes metas particulares:

- Analizar la generación de residuos sólidos urbanos como un problema socioeconómico, realizando un repaso histórico del manejo de la residuos sólidos en México y del consumismo como fuente generadora
- Analizar los efectos negativos producidos por el manejo inadecuado de los residuos sólidos en los medios: agua, aire y suelo
- Destacar la importancia de un enfoque integral para mejorar el Sistema de Manejo de Residuos Sólidos Urbanos (SMRSU), analizando cada una de sus etapas:



generación, almacenamiento in situ, almacenamiento temporal, recolección y transporte, transferencia, tratamiento y disposición final

- Estudiar el composteo, sus características y beneficio ambiental
- Selección del sitio de estudio: asentamiento irregular de la ciudad de México. Análisis del asentamiento y las características de los residuos orgánicos que ahí se producen
- Análisis de factibilidad del composteo para su aplicación en el asentamiento irregular
- De acuerdo con los resultados obtenidos, se considerará la posibilidad de comercializar la composta

1.2 Alcances y limitaciones

Debido a la cantidad de residuos sólidos generados en el país y al establecimiento de asentamientos irregulares en suelos de conservación, el presente trabajo propone la aplicación del proceso de composteo en un asentamiento irregular de la Ciudad de México. Esta propuesta se realizó dentro del siguiente marco de alcances y limitaciones.

En cuanto a fuentes de información, utilizadas para conocer características del asentamiento irregular así como de los residuos sólidos ahí generados, se encuentran:

- Datos estadísticos oficiales de la cantidad de residuos sólidos generados en la Ciudad de México y en la Delegación de Tlalpan
- Documentos proporcionados por la Delegación de Tlalpan sobre las características de sus asentamientos irregulares
- Tres estudios realizados por la Facultad de Ingeniería de la UNAM en asentamientos irregulares de Tlalpan: *Programa de Manejo Integral de Contaminantes* para San Miguel Topilejo, en el 2002; *Programa Estratégico de Manejo Ambiental* en Ayometitla, en el 2008 y finalmente, el estudio del que se desprendió esta tesina: *Programa de Reducción de Impacto Ambiental* en Ocotla, en el año 2009
- Además, se realizaron dos visitas de campo para recabar información y material fotográfico a fin de caracterizar el asentamiento seleccionado
- Se realizó una encuesta voluntaria a habitantes del sitio de estudio
- No se realizaron estudios de muestreo para determinar la composición de los residuos debido a que la información disponible era suficiente para el objetivo del trabajo: determinar la viabilidad del proceso de composteo en asentamientos irregulares

Los apartados 4.1 y 4.2 de este trabajo forman parte de un estudio realizado por estudiantes de octavo y noveno semestre de la carrera de Ingeniería Industrial de la



Facultad de Ingeniería de la UNAM (PRIA, 2009), que tuvo el objetivo de proponer medidas para reducir el impacto ambiental del asentamiento irregular de Ocotla.

La información que se presenta en esta tesina se organizó en cinco capítulos: el primero corresponde a esta introducción; en el segundo es un recuento histórico del manejo de los residuos sólidos en la Ciudad de México desde antes de la Conquista hasta nuestros días. También se incluye un análisis del fenómeno del consumismo, como una de las principales causas de generación de residuos sólidos. Posteriormente, se mencionan los daños causados a la sociedad y al medio ambiente debido al mal manejo de los residuos sólidos, y se presenta un análisis del sistema de manejo de residuos urbanos.

El capítulo tres se dedica por completo a la revisión de las características, ventajas y desventajas del composteo, para continuar en el capítulo cuatro con la selección y estudio del asentamiento irregular en donde se propuso aplicar el composteo. En el mismo capítulo se seleccionó el sistema de composteo más adecuado para ese asentamiento, además de analizar el costo y beneficio ambiental tomando como punto de partida la cantidad posible de composta producida. Finalmente, en el capítulo cinco, se presentan las conclusiones y recomendaciones de este trabajo, seguidas por las referencias bibliográficas y las consultas en línea asociadas con esta investigación.



Capítulo 2. Residuos Sólidos Urbanos

Durante años, el manejo de los residuos sólidos en todo el mundo ha sido uno de los problemas persistentes a los que la humanidad se ha enfrentado. Por esto, es importante hacer un recuento histórico con el objetivo de conocer las circunstancias que México ha enfrentado ante éste problema.

2.1 Historia de los residuos sólidos urbanos en la Ciudad de México

El problema del manejo de los residuos sólidos en México no es algo nuevo. A continuación, se muestran las etapas más importantes con respecto al manejo de los residuos sólidos en el país:

- *Anterior a la Conquista.* Se requería del trabajo de cerca de mil personas para mantener el servicio de limpieza; éste trabajo consistía principalmente en el barrido de las calles y la quema de residuos sólidos. La antigua Tenochtitlán contaba con aproximadamente 300 mil habitantes y, la residuos sólidos que no eran quemados, se evacuaban de la ciudad depositándolos en barcas amarradas en lugares estratégicos que los transportaban para venderla como abono (Silva, 1998). De acuerdo a lo recabado en la bibliografía, en ésta época existía una cultura de reaprovechamiento de residuos orgánicos.
- *Durante la Colonia.* Ésta época trajo consigo cambios de ambiente y de cultura. Las calles estaban en deterioro por la cantidad de residuos sólidos que se amontonaba en las esquinas; los vecinos arrojaban residuos sólidos, animales muertos y demás residuos por las ventanas (Silva, 1998); todo se debía a costumbres que trajeron los españoles del viejo continente. En 1790 el virrey Don Juan Vicente Quemes Pacheco de Padilla, segundo conde de Revillagigedo, promovió un ambicioso programa de reacondicionamiento de la ciudad; formó un grupo “El Bando” para recoger los residuos en carretas jaladas por mulas, además de prohibir tirar residuos sólidos en la vía pública y que los animales anduvieran libres por la ciudad (Rugby, 2009).
- *Después de la guerra de Independencia.* Se modificaron y ampliaron los reglamentos de limpieza; se obligaba a las fruterías, verdulerías, carboneros y otros comerciantes, cuyas mercancías eran exhibidas en el suelo sobre zacate o paja, a recoger sus desperdicios y sacarlos de la ciudad. Los ciudadanos tenían el compromiso de cuidar el empedrado y llevar los residuos sólidos a donde pudieran recogerlos los carros, los cuales se anunciaban usualmente con una campanilla (Rugby, 2009).
- *Finales del siglo XIX y principios del XX.* La recolección de residuos sólidos se realizaba con 80 carretones. Los ayuntamientos de los pueblos y la policía de



salubridad se convirtieron en los responsables de la limpieza de las calles, mercados, plazas públicas, hospitales, cárceles y casas de beneficencia; además de remover todo lo que pudiera alterar la salud pública. Desde este momento, el manejo de los residuos sólidos se convirtió en un problema local ya que cada pueblo tenía la obligación de tratar sus propios residuos.

Posteriormente, el equipo de limpia como tal empezó a consolidarse: contaba con una máquina para barrer y otra para regar las calles; el personal estaba compuesto por 357 peones, 13 camiones recolectores y 70 carretas tiradas por mulas. Se calcula que el volumen que se recogía era de 700 (ton/día), con una población aproximada de 500,000 habitantes. Además, fue cuando dio inicio el sistema actual de manejo de los residuos sólidos; se empezó a utilizar formalmente la campana para llamar a la gente para tirar sus residuos sólidos y se adquirió maquinaria para su recolección y transporte hacia lugares más alejados en la ciudad.

En 1936, el servicio de limpia ya contaba con 2,500 empleados, camiones tubulares, carros de volteo de 7 a 20 toneladas y carros tirados por mulas que cubrían los servicios de la periferia de la ciudad (Silva, 1998).

- *México moderno (de 1940 hasta 2002).* En la década de 1940, el Distrito Federal contaba oficialmente con dos sitios de disposición final, Santa Cruz Meyehualco y Santa Fe; el primero, en la Delegación Iztapalapa con una superficie de 150 hectáreas y el segundo en la delegación Álvaro Obregón con una superficie de 60 hectáreas (Cruz, 2002).

En 1960, se creó la Dirección General de Servicios Urbanos del Distrito Federal, de la que depende la oficina de Recolección de Residuos Sólidos encargada, hasta la fecha, de la recolección, el transporte, el tratamiento y la disposición final de los residuos sólidos de la Ciudad de México.

En 1983, el Departamento del Distrito Federal inició el saneamiento y clausura del tiradero a cielo abierto de Santa Cruz Meyehualco, ya que la mancha urbana lo había alcanzado y representaba un gran riesgo a la salud pública. Con la clausura de este tiradero se crearon el de Santa Catarina, Tláhuac, San Lorenzo Tezonco, Milpa Alta, Tlalpan y Bordo Xochiaca; los últimos cuatro se clausuraron un año después debido a la protesta pública (Cruz, 2002).

En 1985 el sitio de Santa Catarina empezó a operar como un relleno sanitario. En 1986 en Santa Fe se realizó algo similar, se adecuó el predio de Prados de la Montaña para operarlo como relleno sanitario, ya que en ese momento no existía otro lugar en el que pudieran depositarse los residuos. Para 1991, los residuos sólidos generados en el Distrito Federal se disponían en tres rellenos: el Bordo Poniente, Prados de la Montaña y Santa Catarina. En 1994, se comenzaron los trámites para la clausura de Prados de la Montaña debido a exigencias de



inversionistas dueños de terrenos adyacentes al sitio; esta clausura es la más completa que ha tenido un sitio de disposición final en México (Cruz, 2002).

En el 2002, es aprobada la Ley de Residuos Sólidos del DF, con la participación, supervisión, asesoría y evaluación de las Secretarías de Obras y Servicios y del Medio Ambiente a través de la Dirección de Servicios Urbanos y la Dirección de Regulación y Gestión Ambiental de Agua, Suelos y Residuos, respectivamente. Esta ley además de definir los que son los residuos sólidos urbanos, prohíbe arrojarlos o abandonarlos en la vía pública, áreas comunes, barrancas y sitios no autorizados y también exige a los ciudadanos separarlos (LGRSDF, 2003).

Como se observa, el problema del manejo de la residuos sólidos en la Ciudad de México inició cuando éstos dejaron de ser reaprovechados al adoptar nuevas costumbres y desde el momento en que la población aumentó precipitadamente. Es evidente que para solucionar dicho problema se necesita retomar una cultura de reaprovechamiento de los residuos sólidos urbanos como se hacía antes de la conquista, que permita reducir la cantidad de residuos generados y aprovechar de una mejor manera recursos económicos y humanos utilizados en su manejo.

Por otro lado, una de las causas principales de la generación de residuos sólidos es el consumismo, por lo que se debe analizar cómo este hábito innecesario se fue convirtiendo en un obstáculo más para la realización de estrategias enfocadas en la prevención de residuos.

2.2 El consumismo y su relación con la generación de residuos sólidos

Existen diferentes causas que originan la generación de residuos sólidos, como el clima y la escasa educación ambiental, así como el fenómeno llamado “consumismo” que es la principal causa de miles de toneladas de residuos sólidos en el mundo.

En el siglo XVIII, la Revolución Industrial trajo consigo la generación de grandes cantidades de residuos sólidos principalmente por dos causas; la primera es que los procesos industriales producían escorias y desechos en una escala mucho mayor que las actividades artesanales y la segunda, que siendo los productos más accesibles y baratos, la tentación de tirarlos para sustituirlos por otros nuevos fue mayor (Amparán, 2009). De acuerdo con la Real Academia Española, la definición de *consumismo* significa la *tendencia inmoderada a adquirir, gastar o consumir bienes, no siempre necesarios* (RAE, 2001).

El consumismo apareció como consecuencia de la producción en masa de bienes y por movimientos como el taylorismo y el fordismo (Carrasco, 2007). El ingeniero y economista Frederic W. Taylor elaboró un sistema de organización racional del trabajo, expuesto en 1912, que se basa en la aplicación de métodos enfocados al estudio de la relación entre el obrero y las técnicas modernas de producción industrial, con el fin de maximizar la eficiencia de la mano de obra y de las máquinas y herramientas (taylorismo).



Posteriormente surgió el fordismo como modo de producción en cadena; propuesto por Henry Ford, fabricante de automóviles en Estados Unidos en 1913, y que fue utilizado en forma extensiva en la industria de numerosos países hasta la década de 1970.

El fordismo representaba una combinación y organización general del trabajo desarrollado a través de cadenas de montaje, maquinaria especializada, salarios más elevados y gran número de trabajadores en la plantilla. Se sostenía que a mayor volumen de producción por medio de tecnología de ensamble a un menor costo, el excedente superaría a la élite tradicional y esta no sería la única consumidora de tecnología en la modernidad, incrementando el mercado.

Tanto el taylorismo como el fordismo revelaron que era más fácil fabricar los productos que venderlos, por lo que el esfuerzo empresarial se enfocó en la comercialización. Al terminar la Segunda Guerra Mundial, en la década de 1950, la comercialización cobró gran importancia al contribuir en el *aumento de necesidades*; las exigencias del propio desarrollo capitalista condujeron a una situación en la que la demanda del consumidor era estimulada y orientada por un mercado en constante expansión y transformación como consecuencia del cambio estructural del primitivo capitalismo de producción llamado *neocapitalismo de consumo* (Carrasco, 2007).

El neocapitalismo de consumo se basa en un sistema productivo que se encarga de aumentar las necesidades y los deseos del consumidor. Para reequilibrar los sectores de producción que originaron la crisis de 1929, se creó el concepto de consumo de masas de bienes industriales duraderos, principalmente en el sector automotriz y de electrodomésticos. Estas mercancías se abarataron debido a los avances tecnológicos y la aparición de diversos productos de idéntico valor funcional pero convenientemente distinguidos y dignificados en su forma, y en donde las clases más altas ya no se distinguían por el hecho de tener el producto, sino por la categoría y marca del mismo.

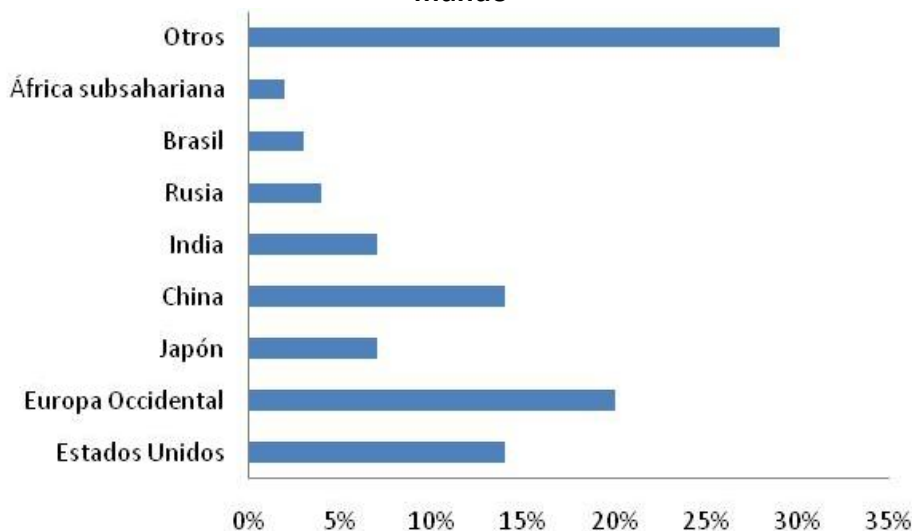
Es así como se establece la definición del consumismo, como derroche productivo, entendido como toda producción y gasto más allá de la estricta sobrevivencia, donde lo superfluo precede a lo necesario, donde el gasto precede en valor a la acumulación y la apropiación. Con el consumismo derivado de la industrialización se aceleraron los procesos de producción y con ello la generación de volúmenes mayores de residuos. Hoy en día, la influencia de los medios de comunicación agudiza el consumismo, sobrevaluando mercancías de manera que lo único que resulta importante es consumir, en un mundo en el que es más barato comprar, que solucionar.

La sociedad de consumo está integrada por 1,728 millones de personas, el 28% de la población mundial; 242 millones son residentes en Estados Unidos (el 84% de su población), 349 millones en Europa Occidental (el 89% de la población), 240 millones en China (apenas el 19% de su población), 120 millones en Japón (95%), 122 millones en India (12%), 61 millones en Rusia (43%), 58 millones en Brasil (33%) y sólo 34 millones en África



subsahariana (el 5% de la población). En la figura 2.1 se muestra el porcentaje de participación de las principales zonas consumidoras en el mundo (Darío, 2008).

Figura 2.1 Porcentaje de participación de los principales países consumidores en el mundo



El consumismo en los países industrializados, representa una amenaza sin precedentes para la naturaleza, ya que nunca se habían producido tantos bienes y, por consiguiente, tantos problemas por excedentes. En muy pocos años, la población ha pasado de tener lo mínimo a tener demasiado. Cada producto que se consume conlleva un gasto, en una proporción también nueva, sobreexplotando con ello recursos naturales no renovables. Sin embargo, todavía existen numerosas comunidades que no se pueden dar el lujo de desperdiciar nada y, de hecho, reciclan en su beneficio los residuos sólidos de sociedades más prósperas.

El consumismo impacta en todos aspectos al ambiente: en el proceso de extracción de materias primas, la producción, el procesamiento, la comercialización, el uso y la disposición final. Por lo tanto, la importancia de adoptar una nueva cultura enfocada en la minimización y prevención de residuos, adquiriendo sólo lo necesario para vivir, es un reto para nuestra generación.

El manejo de los residuos sólidos urbanos abarca desde su generación hasta su disposición final. Antes de analizar las etapas involucradas en dicho esquema de manejo, es necesario establecer el significado y clasificación de los residuos sólidos urbanos así como la problemática derivada de su manejo inadecuado.



2.3 Definición y clasificación

Un *residuo* es todo aquello que resulta como subproducto o sobrante de una actividad o proceso y que puede o no ser reutilizable, a diferencia de un *desecho*, que también es un sobrante pero que no puede ser reutilizado (Deffis, 1989).

Residuo Sólido Urbano (RSU) es el generado en una casa habitación como resultado de las actividades domésticas, los sobrantes de los productos que se consumen, envases y empaques, así como los generados por servicios públicos y establecimientos comerciales y de servicios (LGRSDF, 2003). Los RSU son muy diversos: incluyen algunos objetos de gran tamaño, como muebles, electrodomésticos, automóviles y los generados por servicios públicos por la limpieza de calles, mantenimiento de zonas verdes, funcionamiento de mercados. En la tabla 2.1 se muestra una clasificación general de los RSU y su origen específico, el cual determina la composición de los mismos.

Tabla 2.1 Clasificación de los residuos sólidos urbanos

CLASIFICACIÓN	ORÍGEN ESPECÍFICO	TIPOS DE RESIDUOS
Domiciliarios	Casa-habitación	Residuos alimenticios Residuos de jardinería
Institucionales	Escuelas, institutos y universidades Museos, iglesias Oficinas de gobierno Bancos, reclusorios	Vidrio Plástico Metales Lozas y cerámicas Cenizas
Áreas y vías públicas	Calles y avenidas Carreteras estatales y federales Parques y jardines Playas, áreas arqueológicas	Residuos alimenticios Residuos de jardinería Hueso Flores
Comercial y de servicios	Balnearios, circos, cines, teatros, Estadios, hipódromos, autódromos Plazas de toros, mercados Tianguis y centros de abastos Hoteles y moteles Oficinas, rastros, panteones Restaurantes, tiendas	Algodón Papel y cartón Tetrapack y tetrabrick Textiles sintéticos Pañales desechables Madera Cuero y hule
Construcción y demolición		Cascajo

Fuente: México, Dirección General de Servicios Urbanos, Departamento del Distrito Federal, 1994.

La información sobre el tipo de residuo generado es importante para evaluar las necesidades de equipo para su manejo y los sistemas de tratamiento a utilizar.

2.3.1 Problemática socioeconómica

El problema del manejo de los RSU es responsabilidad de todos y no sólo del servicio de recolección de residuos sólidos. Cuando decidimos eliminar algún objeto y creemos estar



terminando con un problema, lo que realmente ocurre es el principio de un complejo sistema ambiental y social en el que existen diversas relaciones entre elementos sociales, ingenieriles y ambientales. Como ejemplo encontramos el crecimiento del sector informal (pepenadores) en diferentes etapas del manejo del RSU, que extrae la mayoría de los residuos con valor comercial (Florisbela y Wehenpohl, 2009), para venderlos a empresas o intermediarios¹. La *pepena* genera trabajo para muchas familias pero también sostiene a un grupo de explotadores de personas que resultan los verdaderos beneficiarios de esta actividad.

Actualmente el 15% del total de los residuos sólidos generados en la Ciudad de México son aprovechados y recolectados por pepenadores (Castillo, 2008). Existen entre 25 y 30 mil pepenadores en la Ciudad de México (Mora, 2004); incluyendo niños, ancianos, campesinos y familias completas que prefieren esa ocupación por conseguir un ingreso mayor (de dos a tres salarios mínimos) al que podrían ganar en algún sector formal de la economía.

Los pepenadores de la Ciudad de México están organizados en tres organizaciones:

- Asociación de Selectores de Desechos Sólidos de La Metrópoli A.C.
- Frente Único de Pepenadores A.C.
- Unión de Pepenadores del D.F., Rafael Gutiérrez Moreno A.C.

En estas organizaciones los beneficios no se distribuyen como en una cooperativa; más bien se trata de una empresa privada informal, que prácticamente es propiedad del líder, no paga impuestos, ni cotiza para el pago de beneficios de su personal (Florisbela y Wehenpohl, 2009).

La *pepena* beneficia el manejo de los RSU, ya que disminuye la cantidad de residuos a disponer; sin embargo, el problema reside en los riesgos de salud a los que los pepenadores se encuentran expuestos, como infecciones respiratorias, gastrointestinales, dermatológicas y parasitarias.

En el aspecto económico es importante mencionar que hoy en día, para atender el rezago en materia de manejo de RSU en el país, se requiere de una inversión de alrededor de 9,400 millones de pesos, además de 50 instalaciones adicionales destinadas a la disposición final de los residuos sólidos (rellenos sanitarios), cada una con capacidad mínima de 300 toneladas de residuos sólidos al día y un costo de 50 millones de pesos (Alatorre, 2009).

Sin embargo, la construcción de rellenos sanitarios no es la única solución para enfrentar el problema, ya que existen otras medidas para el control de RSU. Una de ellas es el reciclaje donde, además de reducir la cantidad de RSU para disposición final, se fomenta la generación de nuevos empleos.

¹ Grupo de personas que establece el vínculo entre los pepenadores con la industria de reciclaje.



2.3.2 Problemática ambiental

En cuanto a la afectación ambiental relacionada con los RSU, ésta es principalmente provocada por la disposición de los residuos sólidos en tiraderos a cielo abierto; práctica que consiste en depositar los RSU sobre el suelo, sin control alguno, generando insalubridad, fauna nociva y contaminación en la atmósfera, suelos y acuíferos (SEDESOL, 2010).

A continuación se explican brevemente algunas de las consecuencias de un manejo inadecuado de RSU:

- *La contaminación de aguas superficiales y subterráneas.* Esto debido al vertido indiscriminado de RSU orgánicos e inorgánicos en ríos, lagos y mares que no sólo ocasiona un daño estético sino además un perjuicio en el ecosistema acuático. Otra razón es la filtración de lixiviados (líquidos que se forman por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los RSU) hacia los mantos acuíferos (LGRSDF, 2003).
- *La contaminación de los suelos.* Debido a la creación de tiraderos, que generalmente se ocasiona por un sistema de recolección ineficiente, provoca la proliferación de roedores y fuentes potenciales de transmisión de enfermedades, además del envenenamiento de especies vegetales y animales. Este tipo de contaminación también es causada al enterrar residuos en el suelo, imposibilitando su uso posterior.
- *La contaminación de la atmósfera.* Es provocada por partículas suspendidas por la acción del viento en los tiraderos y por la producción de gases tóxicos producidos por la quema de residuos sólidos. Algunos de los gases son el monóxido de carbono (CO) emitido cuando ocurre una combustión incompleta que al combinarse con la sangre puede llegar a causar la muerte; las dioxinas y furanos (gases cancerígenos) producidos por la quema de plásticos; el dióxido de carbono (CO₂) y el metano (CH₄) que se producen por la descomposición aerobia o anaerobia de los residuos orgánicos respectivamente y que son los principales gases de efecto invernadero (PRIA, 2009).

Otro aspecto que vale la pena recalcar es que la mayoría de los residuos no son materia inutilizable, y que de ellos pueden obtenerse materias primas para procesos industriales evitando así el seguir agotando los recursos naturales, además de que se ahorra agua y energía en los procesos de fabricación. Los principales materiales que se recuperan de los RSU son papel, plástico, vidrio, metal y materia orgánica.

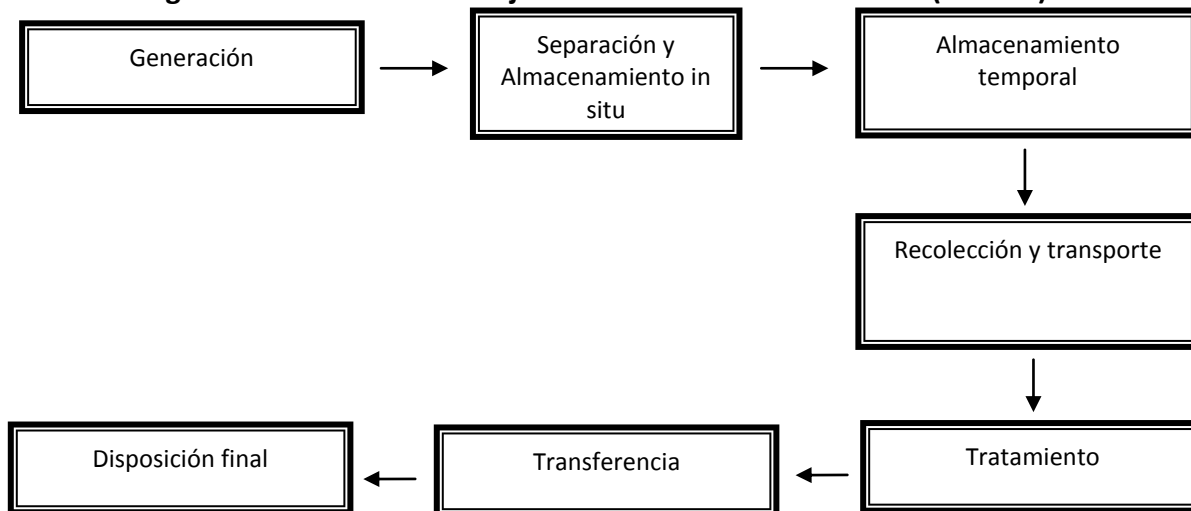
Habiendo definido el origen y los efectos de los RSU, a continuación se analiza el sistema por medio del cual se manejan los residuos, desde su generación hasta la disposición final.



2.4 Sistema de manejo de residuos sólidos urbanos

Cabe destacar la importancia de cada una de las etapas del Sistema de Manejo de Residuos Sólidos Urbanos (SMRSU), que deberá diseñarse para reducir y, si es posible, evitar los efectos negativos de los RSU a la sociedad y el ambiente. Las etapas del SMRSU se muestran en la figura 2.2.

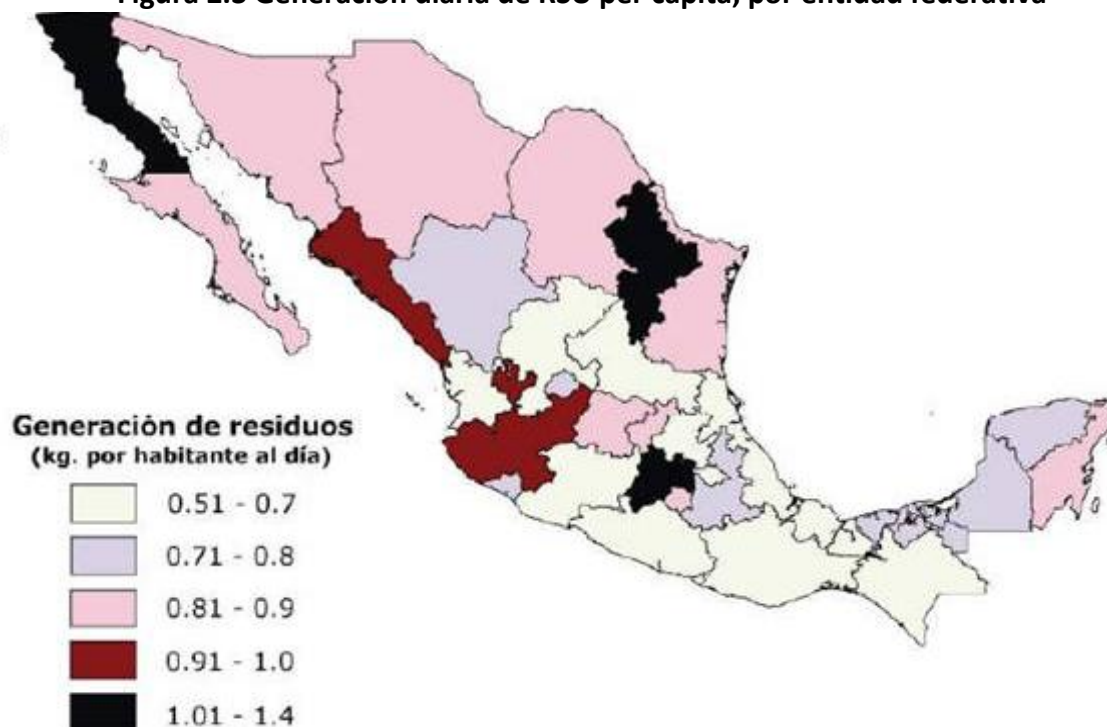
Figura 2.2 Sistema de Manejo de Residuos Sólidos Urbanos (SMRSU)



2.4.1 Generación

La generación de RSU inicia cuando el consumidor decide que un producto le resulta no deseable o inservible. En la República Mexicana la generación promedio de RSU es de 0.9 (kg/hab-día) (PEPGRM, 2007), sin embargo, esta cantidad así como su composición varían en diferentes zonas del país (ver figura 2.3).

Figura 2.3 Generación diaria de RSU per cápita, por entidad federativa



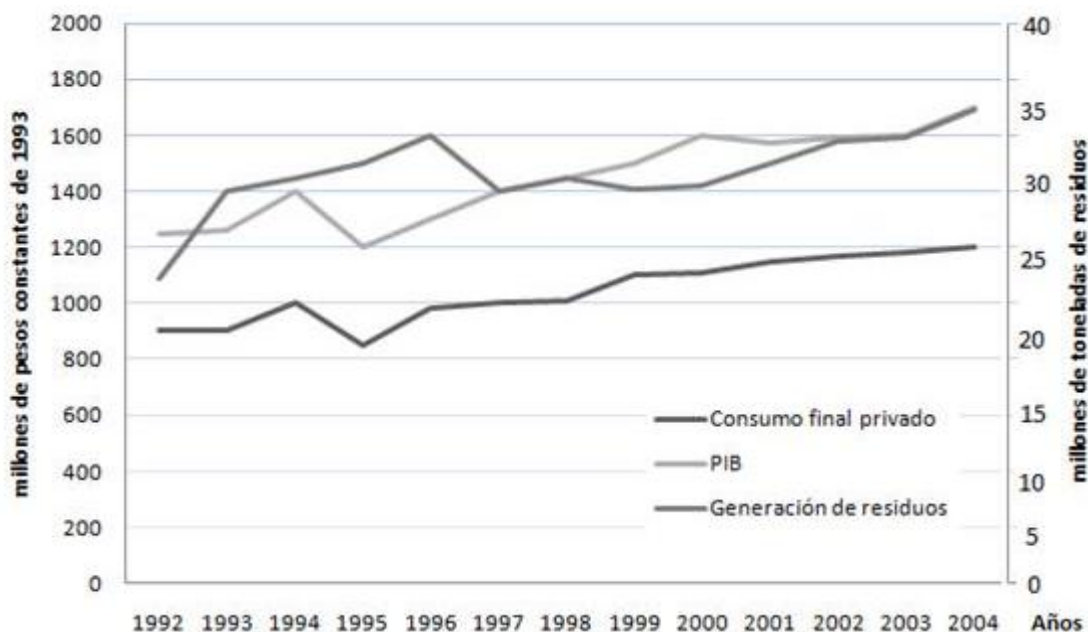
Fuente: Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal, Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México, 2009

Como se observa en la figura anterior, Estados con un nivel de industrialización alto como Nuevo León, el Estado de México y Guadalajara tienden a generar una mayor cantidad de RSU, debido a la facilidad para adquirir productos. Es así como la generación y composición de los RSU depende esencialmente de elementos determinados por cierto estilo de vida, como son:

- **Nivel de ingresos económicos.** El crecimiento en el nivel de ingresos produce un aumento de residuos debido principalmente a la cultura consumista: además de la compra de productos innecesarios, éstos poseen gran cantidad de empaques plásticos, envolturas, papeles o cartón. Por el contrario, en zonas con menor nivel económico, la compra de productos superfluos es menor, pero la cantidad de residuos orgánicos aumenta.

La figura 2.4 muestra el incremento del consumo, el producto interno bruto (PIB) y la generación de RSU en México desde 1992 al 2004. De acuerdo con el gráfico, existe una definida correlación entre las tres variables, mientras más valor monetario genera el país (PIB), las posibilidades de consumir aumentan y por consecuencia también los RSU.

Figura 2.4. Consumo final privado, producto interno bruto (PIB) y generación de RSU, 1992-2004



Fuente: INEGI, Sistema de Cuentas Nacionales de México, 2005; SEDESOL, Subsecretaría de Desarrollo Urbano y Ordenación de Territorio, México, 2005

- **Clima.** En zonas con climas cálidos y húmedos, se produce mayor cantidad de residuos orgánicos como verduras y frutas, debido principalmente a que el ritmo de descomposición se acelera, mientras que en climas más fríos la tendencia de consumo hace que se produzcan más residuos inorgánicos, como envolturas, botellas y latas.
- **Educación ambiental.** Éste factor se refiere al nivel de información adquirida para evitar la generación de grandes cantidades de residuos. Sin embargo, la educación ambiental no solo tiene el objetivo de difundir y compartir conocimiento sobre los diferentes problemas ambientales causados por la generación de residuos, sino también la creación de una nueva cultura de prevención y minimización.

La generación de residuos ha originado grandes problemas sociales, económicos y ambientales, sin embargo existen diversos tratamientos y métodos de disposición final, cuyo objetivo es reducir el impacto generado. Hoy, es necesario pensar en la minimización de los RSU como solución a dichos problemas.

Uno de los procesos que se han enfocado a esa minimización, son las 3R son un conjunto de acciones que tienen como propósito final minimizar y controlar los efectos de los RSU generados. Las 3R significan: Reducir, Reusar y Reciclar.

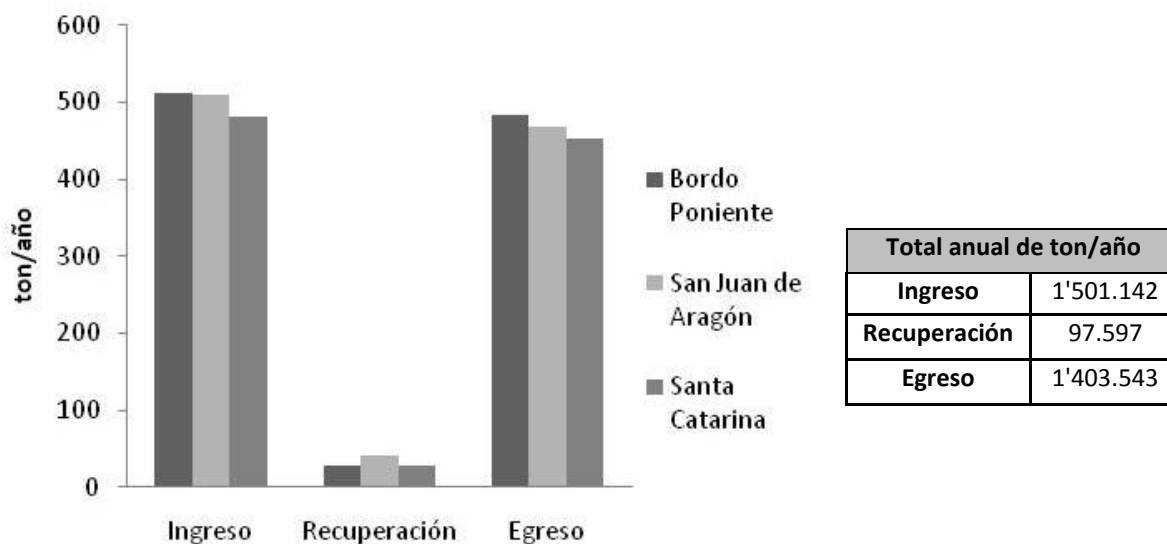
- **Reducir.** Es la minimización de los residuos que requieren disposición mediante acciones como: ampliación de la vida del producto, minimización de empaques, compra selectiva de productos o disminución del consumo.



- **Reusar.** Es el control de los residuos generados mediante la utilización directa de un producto o material sin cambiar su forma o función básica. Un ejemplo es el reúso de envases como botellas, frascos de plástico y metal o cajas de cartón y madera.
- **Reciclar.** Es el otro proceso de control mediante el cual los residuos se incorporan nuevamente a un proceso industrial como materia prima para su transformación en un producto de composición semejante, como son los vidrios rotos, papel y cartón, metales o plásticos. El reciclaje puede suponer cambiar tanto la forma como la función del producto original.

El Distrito Federal cuenta con tres plantas de separación de residuos en donde se recuperan materiales útiles para otros ciclos productivos. Del total de RSU que ingresaron en el 2007 a las plantas de selección de los rellenos sanitarios Bordo Poniente, San Juan de Aragón y Santa Catarina (ver figura 2.5), sólo el 7% fue recuperado (IRSDF, 2007).

Figura 2.5 Residuos sólidos que ingresaron, recuperaron y egresaron en cada planta de selección en el 2007



Fuente: IRSDF, 2007

De acuerdo a los datos anteriores, es notable la desproporción entre los residuos que entran a las plantas de selección, y lo que se recupera, debido a que muchos de los residuos que pudieron ser recuperados se encuentran contaminados a causa de la inexistencia de sistemas de separación in situ y de recolección. Para contribuir a la disminución de residuos que llegan a los rellenos sanitarios, el gobierno a través de la Ley General de Residuos Sólidos del Distrito Federal (LGRSDF, 2003), exige a los ciudadanos separar los residuos y además promover el reciclaje. Esta ley prohíbe arrojar o abandonar los residuos sólidos en la vía pública, áreas comunes, barrancas y sitios no autorizados; entró en vigor desde el año 2003 y preveía la aplicación de multas de 570 a 9 mil pesos o el arresto, a quien sea sorprendido violando el reglamento.

2.4.2 Separación y Almacenamiento in situ

La separación y el almacenamiento in situ es la segunda etapa del SMRSU, se refiere a la acción de retener los residuos en el lugar donde se generan (AMEY, 2003). El almacenamiento se debe llevar a cabo de manera higiénica, segura y separada, para que tanto el generador como el servicio de recolección de los residuos, se beneficien. Este almacenamiento se caracteriza por el corto tiempo de retención; los contenedores se ubican en cocinas, baños, cuartos, estancias y patios (algunos de los contenedores domésticos más comunes se muestran en la figura 2.6).

Figura 2.6 Contenedores domésticos

Caja de cartón	Caja de madera	Bote de lámina
		
Bote de plástico con tapa	Bolsa de papel	Bolsa de plástico
		

Las características que deben tener los contenedores para ésta función se realice en forma adecuada, son (Domínguez, 2006):

- Capacidad suficiente para recibir los residuos generados
- Que cuenten con tapa para evitar que los malos olores generados se esparzan
- Sin aristas afiladas para seguridad del usuario
- De fácil manejo para su limpieza, mantenimiento y desinfección por lo que los materiales recomendados son plástico, aluminio o acero inoxidable

2.4.3 Almacenamiento temporal

El almacenamiento temporal es en donde se reúnen los residuos provenientes del almacenamiento in situ para ser entregados al servicio de recolección. Para este tipo de



almacenamiento es necesario contar con contenedores apropiados que faciliten su recolección por lo que, además de contar con las características descritas para los contenedores de almacenamiento in situ, deben tener las siguientes propiedades (Domínguez, 2006):

- Resistentes debido a que estarán expuestos a las inclemencias del tiempo y a impactos fuertes durante la manipulación por parte del servicio de recolección
- Que cuenten con tapa debido a que estarán expuestos a lluvia, sol, animales callejeros y roedores
- Deben recibir mantenimiento, en caso de utilizar recipientes metálicos deben pintarse, por lo menos una vez al año, para evitar la corrosión
- El tiempo de almacenamiento es más largo por lo que su capacidad debe ser mayor que los contenedores para almacenamiento in situ (en la tabla 2.2 se presentan algunos contenedores temporales)

Tabla 2.2 Contenedores para almacenamiento temporal

1000 litros	200 litros	90 litros
Polietileno de alta densidad, 4 ruedas, carga máxima de 500 kg y peso de 56 kg.	Polietileno rotomoldeado, 2 ruedas, diseñado especialmente para lugares de gran flujo de personas.	Polietileno de alta densidad, 2 ruedas y peso de 8.4 kg.
		

Sin embargo, uno de los contenedores más comunes en vía pública, parques y unidades habitacionales es el que se muestra en la figura 2.7. En muchas ocasiones éstos contenedores se encuentran en mal estado y prácticamente nunca tienen tapa.

Figura 2.7. Contenedores en vía pública



2.4.4 Recolección y transporte

El siguiente elemento dentro del sistema, es la recolección y el transporte. De acuerdo con la Ley General de Residuos Sólidos del Distrito Federal, esta etapa consiste en la acción de recibir los residuos sólidos generados y trasladarlos a las instalaciones para su transferencia, tratamiento o disposición final. Lo anterior permite principalmente:

- Evitar que los generadores los desechen inadecuadamente
- Recuperar la mayor cantidad de materiales reciclables que se puedan comercializar
- Disponer adecuadamente los residuos no reciclables

Para realizar esta actividad es necesario tomar en cuenta las características de la localidad de acuerdo a infraestructura y vialidades existentes, así como que el generador entregue sus residuos adecuadamente y que el recolector realice oportuna, responsable y eficientemente su función.

Existen cuatro diferentes métodos de recolección y de la selección del más adecuado para cada tipo de localidad depende la eficacia del sistema completo. Los métodos de recolección son (SEDESOL, 1997):

- **Método de parada fija.** Consiste en llevar el vehículo a ciertos puntos predeterminados y esperar que los usuarios lleven sus residuos en los horarios predefinidos. El método es útil cuando los usuarios tienen la disponibilidad de hacer la entrega.
- **Método de acera.** Este método consiste en recorrer con el vehículo todas las calles de la zona y recolectar los residuos sólidos depositados en la acera. Es útil cuando los usuarios no disponen de tiempo para esperar por el camión recolector, pero presenta serios inconvenientes cuando los residuos sólidos son abandonados varias horas antes de ser recolectada o no se cuenta con contenedores apropiados para esperar la recolección.
- **Método intradomiciliario.** Éste es semejante al anterior pero en él, los operarios del vehículo recolector entran hasta las casas-habitación por los recipientes con residuos regresándolos, una vez vaciados, al sitio de donde los tomaron. Este método suele resultar más costoso que el de acera y aún más que el de parada fija.



- **Método de contenedores.** Es semejante al de parada fija ya que el vehículo recolector debe detenerse en ciertos puntos predeterminados para llevar a cabo la prestación del servicio, recolectando los residuos sólidos de grandes contenedores donde los vecinos la depositaron previamente. Puede decirse que este método es el más adecuado para realizar la recolección en centros de gran generación o donde los vecinos no tienen gran disponibilidad.

Es importante recalcar que el método por medio del cual se lleva a cabo la recolección depende de la demanda, tipo de vialidades, el grado de tecnificación de los equipos de recolección y sobre todo de la participación del usuario. Con respecto a los equipos de recolección, existe una gran variedad de vehículos recolectores; a continuación se presentan los más comunes:

Tabla 2.3 Tipos de vehículos de recolección

Equipos no convencionales	Compactadores de carga lateral
Para localidades pequeñas, bajo costo 	Capacidad 10-16 m³, mecanismo sencillo de compactación, capacidad de carga elevada 
Compactadores de carga trasera	Tipo volteo
Carga a través de una tolva, capacidad 10-20 m³, atiende contenedores pequeños, baja capacidad de carga 	Descarga rápida, capacidad de carga elevada 

El servicio de recolección es una de las etapas más caras del SMRSU (representa el 95% de los costos totales del sistema cuando este no incluye los procesos de transferencia o disposición final) (OPS, 2003) y por lo tanto representa mayores áreas de oportunidad para la minimización de costos. Uno de los factores que más influye en el sistema, es la frecuencia de la recolección, la cual deberá prever que el volumen acumulado de residuos sólidos no sea excesivo.



Una parte importante dentro del tema de recolección y transporte, es la asignación de vehículos recolectores (macrorutas) y la planeación del recorrido que debe cumplir para cargarse (microrutas). Para seleccionar el vehículo y el diseño de la microruta se necesita contar con la siguiente información:

- La generación per cápita domiciliaria
- Un mapa actualizado y detallado de la zona a recolectar, que incluya sentidos de la vialidad
- Datos de la densidad poblacional
- Características de los vehículos de recolección

Por lo tanto, para que un servicio de recolección y transporte de residuos sólidos sea eficiente deberá cumplir primordialmente con: atender a toda la población en forma sanitaria y con una frecuencia adecuada, aprovechar toda la capacidad de los vehículos recolectores y minimizar los recorridos improductivos en las rutas (SEDESOL, 1997).

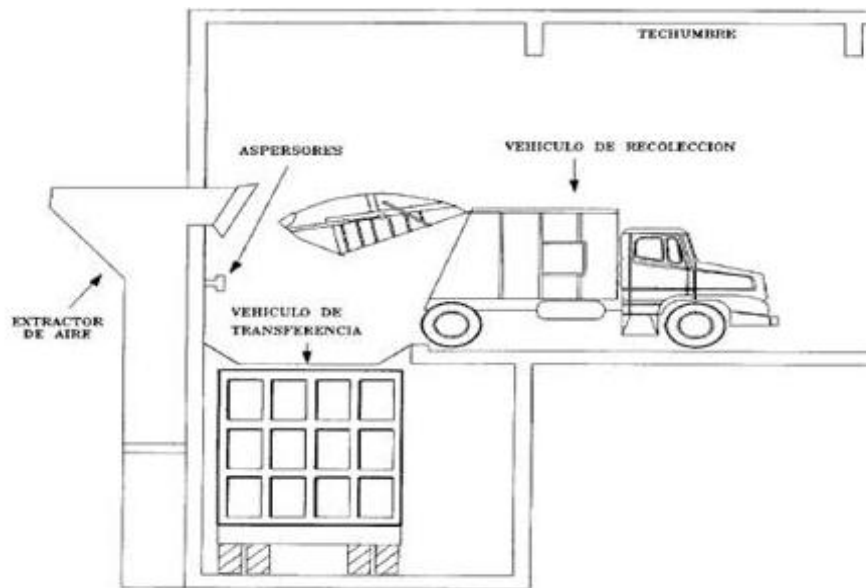
2.4.5 Transferencia

Una vez recolectados, los RSU se envían a la estación de transferencia; una estación de transferencia es el conjunto de equipos e instalaciones en donde se hace el transbordo de los residuos de un vehículo recolector a otro con mayor capacidad de carga, el cual los transportará hasta su disposición final (INE, 1996).

La decisión de instalar una estación de transferencia dentro del sistema, depende de la distancia que debe recorrer el vehículo recolector hasta el sitio de disposición final; si la distancia es mayor de 15 km se recomienda ubicar una estación de transferencia (Deffis, 1989) en el sitio más próximo posible al centro de gravedad geográfico de todas las microrutas por cubrir. En la actualidad los sistemas de transferencia son cada vez más comunes debido al continuo alejamiento entre los puntos de generación y los sitios de tratamiento y disposición final. A continuación se presentan los tres tipos de estaciones de transferencia existentes (INE, 1996):

- **Estaciones de descarga directa.** Consiste en el transbordo de los residuos sólidos de los vehículos recolectores mediante vaciado por gravedad a un tráiler descubierto, con una capacidad que varía de 20 a 25 toneladas (ver figura 2.8). En este tipo de estaciones se recibe a los vehículos, se registran y se pesan para posteriormente ser dirigidos a las rampas de acceso en el patio de maniobras donde se ubican las líneas de servicio. Los vehículos de transferencia se colocan en el patio de carga y una vez llenos se realiza el despunte, y se cubren con una lona para evitar que los residuos se dispersen en el traslado al sitio de disposición final.

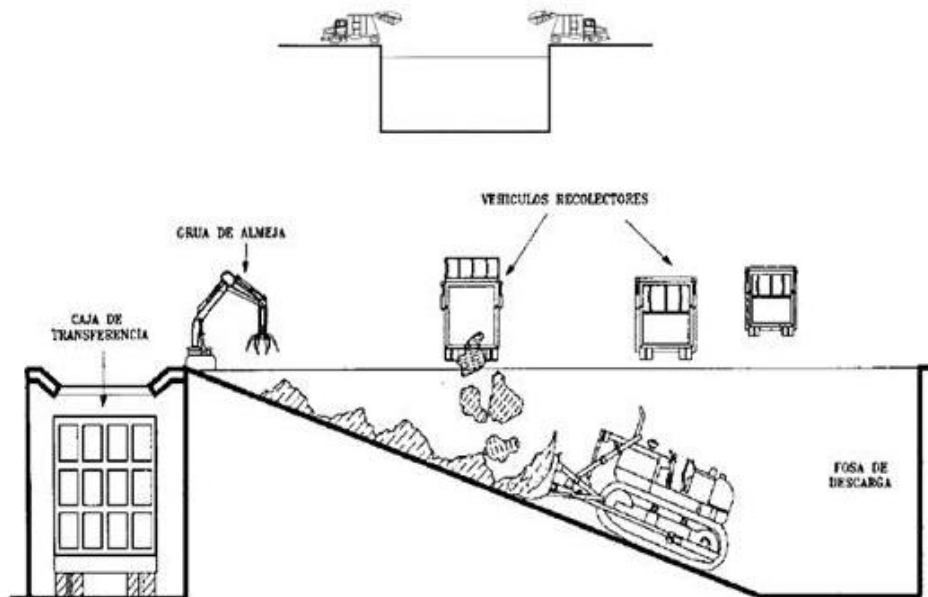
Figura 2.8 Descarga directa



Fuente: Carabias y Quadri de la Torre, 1996

- **Estaciones de descarga indirecta.** La descarga de residuos se realiza a una fosa de almacenamiento o sobre una plataforma de donde posteriormente los residuos se cargan a los vehículos de transferencia con equipos auxiliares (figura 2.9).

Figura 2.9 Descarga indirecta



Fuente: Carabias y Quadri de la Torre, 1996

- **Estación de descarga combinada.** Aquí se cuenta con las características de los dos sistemas anteriores de transferencia. Operacionalmente, es mejor que los dos sistemas previos por su carácter versátil para realizar las dos modalidades, usándolos simultáneamente o uno en vez de otro, para dar mantenimiento o en situaciones de contingencia. Su construcción es de mayor complejidad pues



requiere de mayor área de operación, de niveles para el vaciado por gravedad, de un área para el almacenamiento y de equipo auxiliar para la transferencia por descarga indirecta.

2.4.6 Tratamiento

Una vez recolectados los residuos, éstos pasan al siguiente elemento del SMRSU donde la composición de los mismos es importante para la selección del tratamiento más adecuado. El *tratamiento* es el procedimiento mecánico, físico, químico, biológico o térmico, mediante el cual se cambian las características de los residuos sólidos y se reduce su volumen o peligrosidad (LGRSDF, 2003). A continuación se describen los tratamientos más comunes:

- **Tratamientos biológicos.** Estos tipos de tratamientos se enfocan en los residuos orgánicos (alimentos y residuos de jardín) y pueden ser aerobios (en presencia de aire) o anaerobios (sin presencia de aire). Pueden ser:
 - *Composteo:* el método aerobio en donde los componentes orgánicos se biodegradan de una manera controlada hasta convertirlos en abono orgánico estable sin perjuicio para el ambiente (Gómez, 2006).
 - *Biodigestión:* método anaerobio en donde se biodegradan los residuos orgánicos en ausencia de oxígeno libre, dentro contenedores cerrados (biodigestores) obteniendo de ésta manera biogás y abono orgánico como subproducto. El biogás es un gas combustible principalmente formado por metano (CH_4) en una proporción que va de un 50% hasta un 70% y dióxido de carbono (CO_2). El biogás puede utilizarse para producir energía eléctrica mediante turbinas o plantas generadoras a gas, en hornos, estufas o calderas.
- **Tratamientos térmicos.** Existen principalmente tres tipos de tratamientos térmicos: la incineración, la pirolisis y la gasificación.
 - *Incineración:* se lleva a cabo en plantas incineradoras las cuales disponen de un foso de recepción en el que se depositan los residuos para que sean trasladados a una caldera a altas temperaturas. Las cenizas residuales se colectan en la parte inferior de la caldera y los gases pasan a una caldera secundaria y posteriormente a un proceso de limpieza, añadiéndoles cal y carbón activado. En las plantas más modernas, el vapor caliente se aprovecha para precalentar turbinas de generación de energía eléctrica (Consumer, 2007).
 - *Pirólisis:* consiste en la descomposición de los residuos orgánicos por calentamiento a altas temperaturas bajo presión y en una atmósfera pobre en oxígeno formando gases orgánicos (Colomer, 2007).



- **Gasificación:** este tratamiento es usado para convertir materiales orgánicos directamente en un gas combustible de bajo poder calorífico, mediante una serie de reacciones que ocurren en presencia de oxígeno (CPSUZ, 2009)

Estas tecnologías requieren de una alta cantidad de energía para operar, sin embargo, algunas permiten la recuperación de energía mediante el aprovechamiento del vapor generado para la industria o la generación eléctrica. Los tratamientos térmicos son de gran eficacia ya que pueden reducir su volumen hasta en un 90% (Cruz, 2008).

- **Tratamientos mecánicos.** Se basan en la reducción mecánica de tamaño con el objetivo de mejorar la eficiencia de los sistemas de disposición final. Los más conocidos son el *enfardamiento*, la *compactación* y la *tritución* (CEPIS-OPS, 2009).
- **Enfardamiento:** consiste en un sistema de prensado de residuos sólidos donde se utilizan presiones del orden de los 100 a 2000 kg/cm² para producir fardos, reduciendo el volumen original hasta una quinta parte. Posteriormente pueden ser revestidos con tela y sumergidos en un baño asfáltico o de cemento para mejorar su protección.
- **Compactación:** consiste en la reducción del volumen inicial de los residuos mediante equipos instalados en las estaciones de transferencia, los cuales son compactadores estacionarios con sistemas hidráulicos. De ésta manera se compactan los residuos dentro de los camiones que los transportan hasta el sitio de disposición final.
- **Tritución:** es la reducción de la granulometría de los residuos por medio de molinos de gran tamaño reduciendo el volumen hasta en un 30% y facilitando el proceso de biodegradación de los residuos orgánicos.

Entre otros tratamientos, se encuentran el *reciclaje* y la *neutralización*, el cual es un tratamiento químico donde la cal funciona como agente neutralizante.

2.4.7 Disposición final

Aquellos residuos que no pueden ser reusados, reciclados o recibir otro tratamiento deberán ser enviados al sitio de disposición final.

La disposición final es el depósito de residuos sólidos en sitios o instalaciones cuyas características prevean afectaciones a la salud de la población y al ecosistema (LGRSDF, 2003). Actualmente los rellenos sanitarios son la práctica más usada para disponer de los residuos sólidos, tanto en ciudades grandes como en poblados rurales. El relleno sanitario



es una obra de ingeniería que consiste en el enterramiento ordenado y sistemático de los residuos sólidos por medio de celdas unitarias compactadas en el menor espacio posible. Su construcción depende de las características del área donde se piensa instalar el relleno, por lo tanto existen tres tipos diferentes de rellenos sanitarios: de zanja, de superficie y de ladera (ver tabla 2.4).

Tabla 2.4 Tipos de rellenos sanitarios

Tipo	Características
De zanja	Se construye en zonas planas donde se excavan trincheras para depositar los residuos sólidos.
De superficie	Se cubren los residuos con tierra en la misma superficie del terreno.
De ladera	Se aprovechan las depresiones naturales para disponer los residuos sólidos.

De acuerdo con el tipo de equipo empleado para la operación de los rellenos sanitarios estos pueden ser:

- **Relleno sanitario mecanizado.** Utiliza maquinaria pesada como tractores, compactadores, trituradores, palas mecánicas, cisternas de agua para controlar el polvo y excavadores
- **Relleno sanitario manual.** Se utilizan herramientas de jardinería o albañilería como carretillas, palas, picos, azadones, piones de madera, rastrillos y rodillos

Por supuesto, el tipo de relleno depende de la cantidad de residuos sólidos a disponer, del tamaño del terreno y la disponibilidad de recursos humanos y económicos. Por razones de seguridad se recomienda que por encima de las 10 (ton/día) se debiera emplear equipo mecánico para lograr una compactación mayor a 300 (kg/m³) (NOM-083-SEMARNAT-2003).

Las principales operaciones que se realizan en un relleno sanitario son:

- Recepción de los residuos
- Formación de una celda diaria con los residuos
- Enterramiento (para relleno tipo zanja, ver tabla 2.4) y compactación de la celda
- Recubrimiento con tierra
- Limpieza y mantenimiento

La celda diaria debe tener aproximadamente una altura de 1.20 m con una cobertura de tierra de 5 a 10 cm y se deben construir y enterrar a diario, cuidando que el lugar presente un aspecto limpio a final de la jornada (CEPIS, 2009).

El desarrollo de los rellenos sanitarios actualmente ofrece la oportunidad del aprovechamiento del biogás generado. También son instaladas chimeneas, tubos de



venteo o lumbreras con el objetivo de mantener evacuadas, de forma controlada, la formación de gases en el relleno sanitario y poder prevenir problemas en las viviendas cercanas o incendios.

Por otra parte, las principales características con las que debe contar un relleno sanitario, son aquellas con respecto a la ubicación del sitio de acuerdo a los requerimientos determinados por la normatividad vigente, en éste caso la NOM-083-SEMARNAT-2003, que define la distancia que debe existir entre el relleno sanitario y zonas pobladas, cuerpos de agua tanto superficiales como subterráneos, aeropuertos y reservas ecológicas, entre otras disposiciones.

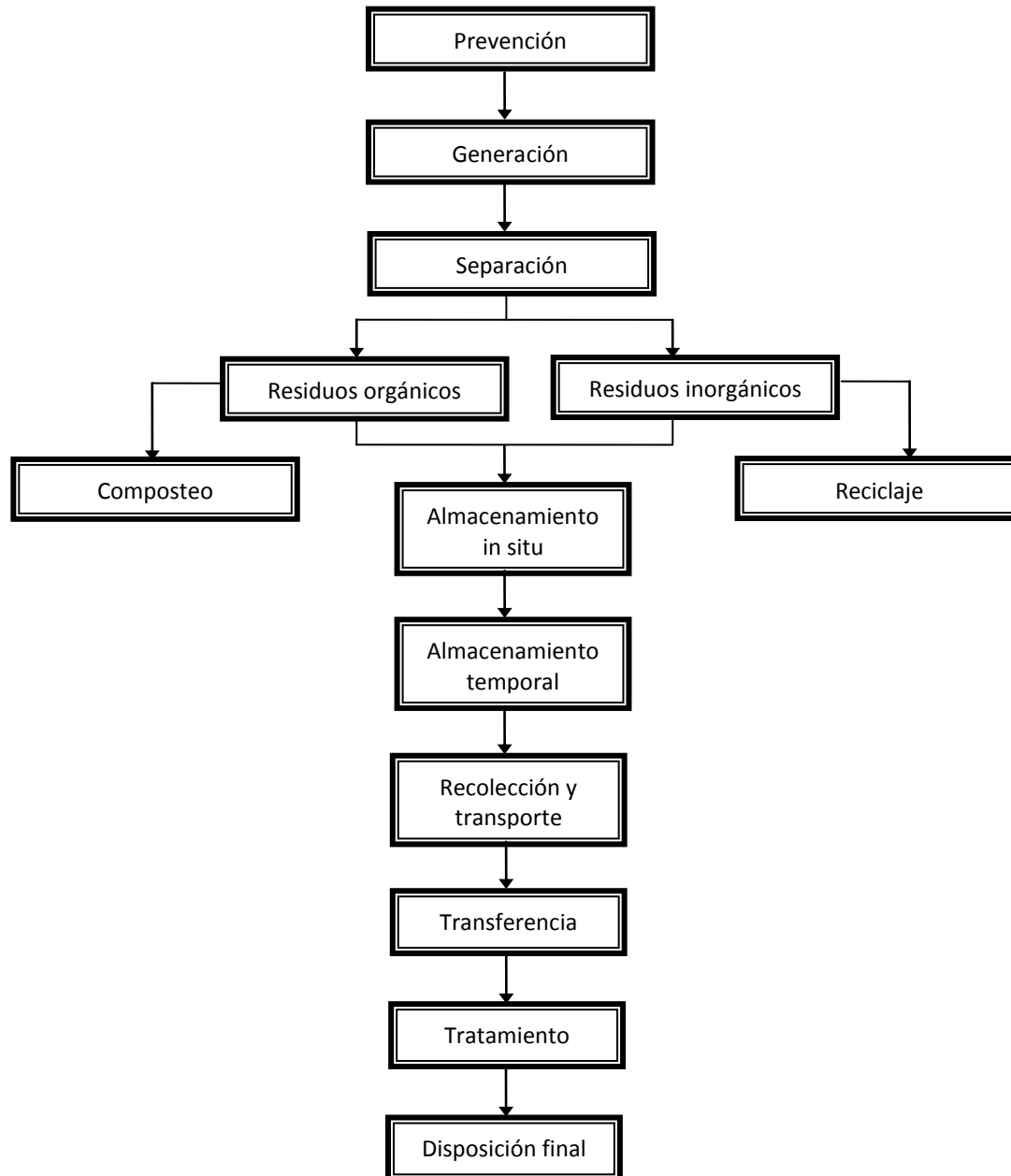
2.5 Sistema de manejo integral de residuos sólidos urbanos, SMIRSU

El SMRSU explica el ciclo de vida de los residuos sólidos, desde su generación hasta la disposición final, sin embargo es necesario un sistema más completo en donde no sólo se controlen los residuos ya producidos, sino su reaprovechamiento y, en el mejor de los casos, la prevención en su producción.

Con la incorporación de la prevención en el inicio del sistema y la integración de tratamientos de RSU en el momento de su generación, además de disminuir la cantidad de RSU enviados a disposición final, también se reducen costos y esfuerzos que se pueden aprovechar en otras áreas para generar un mayor impacto en el bienestar de la población, tales como alumbrado, pavimentación o seguridad pública. El siguiente esquema muestra un sistema más completo para el manejo de RSU, basado principalmente en la prevención como elemento principal (figura 2.10).

Uno de los tratamientos propuestos en un SMIRSU es el composteo; en el siguiente capítulo se estudia y analiza dicho proceso como una forma sencilla y eficaz de reaprovechar los residuos orgánicos, además de generar un producto de utilidad para el hombre.

Figura 2.10 Sistema Integral de Residuos Sólidos Urbanos (SMIRSU)





Capítulo 3. Composteo

El composteo es la aceleración de los procesos de biodegradación de materia orgánica en presencia de aire, obteniendo como resultado un material húmico estable. Antes, la composta se producía principalmente como mejorador de suelos, ya que repone los micronutrientes perdidos a causa del cultivo exhaustivo; sin embargo, ante el problema de la gran cantidad de residuos sólidos generados, el composteo ha cobrado mayor importancia al ser un tratamiento eficaz no sólo para reaprovechar los residuos orgánicos sino por reducir la cantidad de RSU enviados a disposición final.

Sin embargo, no todos los residuos orgánicos se pueden compostear. A continuación se presentan las características deseadas de los residuos orgánicos a procesar, el proceso biológico involucrado y los pasos a seguir para la obtención de composta.

3.1 Residuos orgánicos composteables

La selección de los residuos orgánicos a emplear para la elaboración de composta es el factor principal para asegurar una composta de calidad. El compostaje requiere de dos elementos básicos:

- Residuos verdes (con alto contenido de nitrógeno)
- Residuos cafés (con alto contenido de carbono)

En la tabla 3.1 se muestran algunas recomendaciones para la inclusión de residuos verdes y cafés dentro de la elaboración de composta.

Tabla 3.1 Ejemplos de residuos que se pueden compostar

Residuos		Observaciones
Residuos verdes	Cenizas de madera quemada	Esparcir en pocas cantidades
	Cítricos	Requieren de buena aireación
	Estiércol de animales herbívoros	Caballos, vacas, ovejas, pollos, patos, conejos, etc.
	Frutas y verduras	Usar cáscaras o pedazos
	Hojas y bolsas de té	Esparcir
Residuos cafés	Hojas perennes (<i>que no caen en otoño, como hojas del olivo, la encina y el ficus</i>)	Añadir las trituradas
	Hojas secas	Se recomienda almacenarlas en otoño para usar durante las otras estaciones
	Pasto seco	Se puede secar al sol el pasto recién cortado
	Poda	Ayuda a la aireación. Debe ser picado en pedazos pequeños de máximo 5 cm

Como se observa en la tabla anterior, la mayoría de la materia necesaria para elaboración de composta se puede obtener a partir de residuos de cocina y jardinería. La distinción entre residuos verdes y cafés es importante para asegurar su degradación; el carbono es



una fuente de energía para los microorganismos y el nitrógeno es necesario para su síntesis proteica.

Una relación adecuada entre estos dos nutrientes favorece el crecimiento y reproducción de los microorganismos. Diversos estudios señalan que la mejor relación de carbón-nitrógeno (C/N), para iniciar el composteo, es 25/1 (Trejo, 1999). Si la relación es más alta, los microorganismos requieren periodos largos para oxidar el exceso de carbón y, si es baja, ocurre una pérdida de nitrógeno en forma de amoníaco; en la tabla 3.2 se muestran la relación C/N de algunos materiales.

Tabla 3.2 Relación C/N

Material	C/N	Material	C/N
Orina	0.8/1	Restos de comida	15-20/1
Sangre	3/1	Estiércol de caballo	25/1
Lodos residuales	11/1	Cáscaras de papa	25/1
Gallinaza	15/1	Follaje o poda	50-100/1
Estiércol de vaca	18/1	Paja	60-100/1
Mezcla de pastos	19/1	Papel	350/1
Pasto verde	20/1	Aserrín	500/1

Fuente: Cruz, 2008

De acuerdo con la relación C/N, los restos de comida, el estiércol de caballo y las cáscaras de papa son ideales para el composteo, mientras que existen otros materiales como el aserrín y la orina cuyos valores son extremos. Además, existen residuos que no son recomendables ya que retardan el proceso u ocasionan la proliferación de olores y fauna nociva; ejemplos de estos se muestran en la tabla (3.3).

Tabla 3.3 Materiales que no son apropiados para compostar

Material	Observaciones
Carne, huesos, pescado	Emiten olores y atraen roedores
Comida cocida y granos	Pueden contener aceites y grasas que atraen roedores
Excrementos de animales carnívoros (perros, gatos)	Pueden contener organismos patógenos
Aceites y grasas	Se pudren y huelen mal
Malezas y plantas persistentes (<i>acacia baileyana</i> o <i>mimosa</i> , <i>citrus aurantium</i> o <i>naranja amarga</i>)	Contienen semillas que retardan el proceso
Material inorgánico (vidrios, latas, metales y plásticos)	Ensucian la composta y no son biodegradables
Plantas enfermas	Pueden contener organismos patógenos
Productos lácteos (queso, mayonesa, aderezos, leche, yogurt y crema)	Sus grasas aíslan el aire en el proceso

Fuente: Gómez, 2006

Los microorganismos presentes en los residuos orgánicos, en el aire o la tierra con la que se mezclan, llevan a cabo un proceso de degradación el cual va a depender de diversos factores como temperatura y humedad. Dicho proceso le da a la composta las características necesarias para su posterior empleo; el proceso se describe a continuación.



3.2 Proceso biológico

El composteo se caracteriza por el predominio de metabolismos respiratorios aeróbicos en compañía de variaciones de temperatura, humedad, aireación y pH. Dichos metabolismos se llevan a cabo en la pila de compostaje (residuos orgánicos), la cual está formada por una zona cortical y una zona central (núcleo). En la zona central es en donde se presentan los cambios térmicos más evidentes, y donde claramente se diferencian las siguientes etapas de descomposición:

- **Etapas inicial o latencia.** Empieza desde la conformación de la mezcla (residuos verdes y cafés), hasta que se perciben incrementos de temperatura. La duración de esta etapa es muy variable, entre 24 y 72 horas, a temperatura ambiente entre 10 y 12°C y pilas adecuadamente conformadas según se describe en el apartado 3.4 (Colomer, 2007).
- **Etapas mesotérmica-A.** Destaca la participación de bacterias aerobias, anaerobias y hongos. La actividad metabólica incrementa paulatinamente, produciendo una variación de temperatura de 10 a 40°C.
- **Etapas termogénica-B.** La temperatura aumenta, agotando los nutrientes, hasta llegar aproximadamente a los 75°C. Esta etapa es de gran interés para la higienización de la composta, ya que son eliminados organismos patógenos, hongos, esporas, semillas y elementos biológicos indeseables.

En operaciones de compostaje por medio de pilas estáticas (ver sección 3.4), se recomienda mantener esta etapa por más de 3 días y airear en el momento en que llegue a la temperatura máxima para evitar condiciones anaeróbicas (Navarro, 2009). Las etapas **A** y **B** ocurren durante 3 ó 4 semanas aproximadamente (Mascha, 2007).

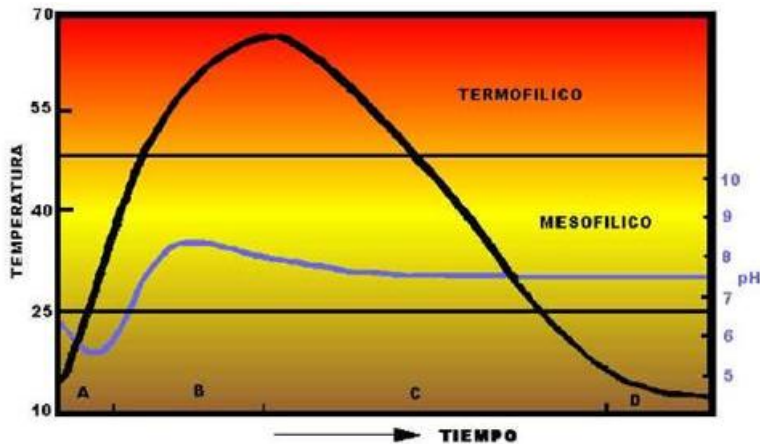
- **Etapas mesotérmica-C.** Con el agotamiento de los nutrientes comienza el descenso paulatino de la temperatura, durante casi 4 semanas, hasta presentarse valores muy cercanos a la temperatura ambiente (Mascha, 2007). En ese momento, se presenta la composta biológicamente estable y se da por concluido el proceso.
- **Etapas de maduración-D.** La temperatura se mantiene estable y se desarrollan microorganismos capaces de utilizar como nutrientes los materiales que siguen presentes en la composta; esta etapa se conoce como maduración y dura aproximadamente 2 semanas (Mascha, 2007).

Para que se cumpla el proceso en su totalidad, los residuos a compostar deben encontrarse en la zona central por lo que es necesario remover los residuos periódicamente. En cuanto al rango de pH tolerado por las bacterias es relativamente amplio, no obstante un pH cercano al neutro (6.5-7.5) asegura el desarrollo favorable de la



gran mayoría de los microorganismos (Colomer, 2007). La siguiente figura (3.1) muestra la relación entre temperatura y pH con respecto a las diferentes etapas y el tipo de bacterias que están presentes (meso o termófilas) en cada una.

Figura 3.1 Relación temperatura y pH con respecto al tiempo



Fuente: Gómez, 2006

3.3 Procedimiento de elaboración

Antes, se explicó la importancia de la selección de los residuos orgánicos a compostar. A continuación se describe el procedimiento a seguir así como los cuidados necesarios para la obtención de la composta:

Selección. Además de eliminar los residuos no deseables, es importante tomar en cuenta la relación carbón-nitrógeno (C/N) de la mezcla a compostar (ver tablas 3.1, 3.2 y 3.3).

Trituración. Permite aumentar la superficie disponible para el ataque de los microorganismos, predispone los materiales a la descomposición y forma una masa más homogénea. Sin embargo, también disminuye la permeabilidad, y la aireación será más difícil; regularmente se recomienda triturar la materia orgánica en partículas de aproximadamente 25 mm de diámetro (Colomer, 2007).

Formación de la pila en el contenedor compostero. Se recomienda añadir los materiales verdes y cafés por capas de 5 cm (ver tabla 3.1); una parte de verdes por cada parte de cafés hasta llenar el contenedor compostero.

Ventilación. Para lograr una buena ventilación y asegurar la presencia de oxígeno se puede realizar lo siguiente:

- Colocar en medio de la pila, ramas que permitan el paso de aire
- Poner la mezcla en estratos de acuerdo a los diferentes tipos de residuos y darle vuelta cada cierto tiempo, nunca debe voltearse la mezcla más de una vez cada tres días (Navarro, 2009)



- Colocar objetos desde la base a la superficie y luego quitarlos para que permitan el paso de aire

Puede ayudar colocar un tubo perforado en el centro de la composta para que sirva como respiradero (ver figura 3.2). En caso de una mala aireación se producirán olores nauseabundos, producto de degradación anaeróbica, o fuertes olores a amoníaco producto de la amonificación.

Figura 3.2 Composición de un contenedor compostador y tubería de aireación



Humedad. Humedecer uniformemente (entre el 40% y 60% en peso). El material debe ser húmedo al tacto, pero no debe escurrir agua (Trejo, 1999). Si la composta está muy seca y los materiales no se mantienen unidos sino que se desintegran, hay que agregar agua o materiales húmedos, y si la mezcla está muy húmeda, hay que agregarle materiales secos o darle vuelta con frecuencia para que se seque.

Protección. Cubrir la mezcla con un plástico o alguna tapa para conservar el calor y protegerla de la lluvia.

Aspecto. Lentamente el volumen de la mezcla irá disminuyendo en la medida que el material se vaya degradando. Una vez que el contenedor compostero se llene, se deja descansar aproximadamente dos meses si la temperatura ambiente promedio es de 25°C o hasta alrededor de seis meses si la temperatura es menor (12°C) (Gómez, 2006). La composta ya terminada tiene un color café oscuro o negro grisáceo con olor a tierra (CEPIS, 2009).



El procedimiento y características anteriores pueden ser aplicables tanto para la producción de composta a pequeña escala, por medio de contenedores composteros, o también para la formación de las pilas de composteo descritas en el apartado 3.4. Para sistemas más complejos como los reactores (fermentación acelerada) se utilizan equipos que siguen la misma función y logran reducir el tiempo de fermentación hasta a 15 días (López, 1975).

Recomendaciones. Añadir a la mezcla lodo de aguas residuales ofrece grandes ventajas, ya que enriquece la composta con materia orgánica y microorganismos; sin embargo, los lodos suelen ser compactos y húmedos, por lo que pueden llegar a bloquear la fermentación; para evitarlo es necesario reducir la granulometría de los lodos para asegurar una mezcla lo más uniforme posible y no pasar de una proporción en peso del 10% (López, 1975).

Rendimiento del compostaje. Para conocer la cantidad aproximada de composta a producir, primero es necesario cuantificar la materia orgánica que entra al proceso, este valor lo obtenemos con la siguiente fórmula:

$$Mo = (Ge)(Hab)(\%mo) \text{ [kg/día]} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

donde:

Mo: materia orgánica (kg/día)

Ge: generación per cápita de residuos (kg/hab-día)

Hab: número de personas que generan los residuos (hab)

%mo: porcentaje de materia orgánica en los residuos

Con la fórmula anterior obtenemos la cantidad de residuos orgánicos producidos y, se sabe que durante el proceso de composteo la mezcla se reduce entre 50 y 85% (Rodríguez, 2006), por lo tanto es posible estimar la cantidad de composta producida:

$$Composta = Mo - (\%red)(Mo) \text{ [kg/día]} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

El porcentaje de reducción (*%red*) depende del tiempo de composteo y la actividad microbiana. La selección adecuada de los residuos influye directamente en la calidad de la composta y su posible precio comercial.

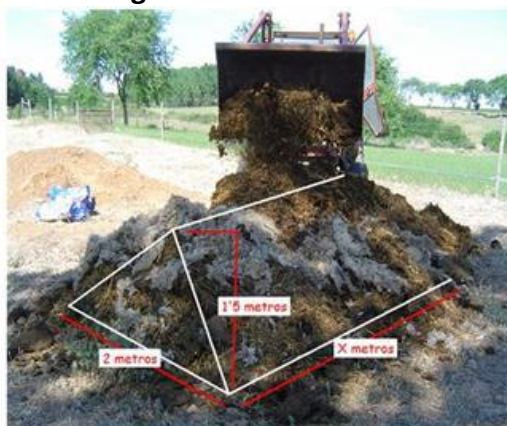
3.4 Sistemas de composteo

Existe más de un arreglo físico del sistema de composteo, para la producción de composta. La elección del sistema depende de las características y cantidades de recursos para compostar y la disponibilidad de superficie, así como del tiempo disponible para su elaboración. A continuación se describen los sistemas más utilizados:



Pila estática. La operación de este sistema es muy sencilla, por lo que es el más recomendado para áreas rurales. Después de separar de los residuos biodegradables, estos se colocan en pilas cuyas secciones pueden ser triangulares o circulares (ver figura 3.3). La altura de las pilas es muy importante, ya que pueden presentarse condiciones anaeróbicas; cuando se utilice equipo manual para su construcción, la altura máxima deberá ser de entre 1.50-1.80 m, mientras que el ancho no deberá superar los 2.5 m.

Figura 3.3 Pila estática



En pilas con sección rectangular, como regla general, puede considerarse 2 veces el ancho que lo alto, y el largo está en función de la cantidad de material a compostar y del área donde se efectúe la operación.

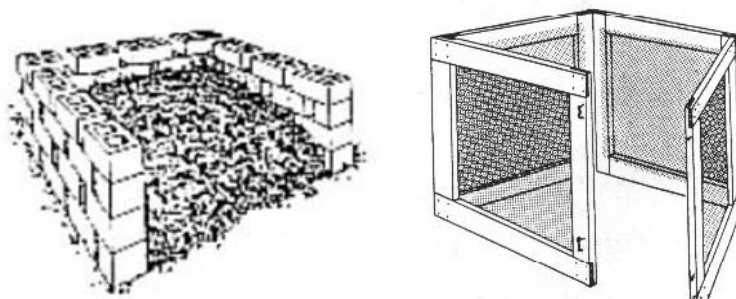
Reactor o fermentación acelerada. Los residuos orgánicos previamente triturados se almacenan en torres, silos, cilindros o células. Se añade agua y se insufla aire, poniendo en movimiento la mezcla por medio de rodillos para reducir la fase de fermentación. Este sistema controla mejor la temperatura ayudando a destruir más eficazmente los agentes patógenos. Este tipo de sistemas es más eficiente, sin embargo, la inversión inicial llega a ser de 6 a 10 veces más elevada que la de las pilas estáticas (López, 1975).

Contenedor. Un contenedor compostador (compostadora) es un recipiente específicamente diseñado para elaborar composta en pequeñas cantidades, dentro del hogar. Existen diversos contenedores que pueden construirse o habilitarse fácilmente, a continuación se presentan los más comunes:

- **Compostador cúbico.** El contenedor se puede formar con ladrillos, madera, tela de alambre o, incluso, excavando un agujero en el mismo terreno. Es recomendable dejar un lado libre o que sea sencillo de desmontar para facilitar el volteo así como para retirar la composta lista y dejar espacios entre las tablas o ladrillos para facilitar la entrada de aire; este tipo de contenedores son ideales para terrenos con poco espacio ya que las dimensiones varían de acuerdo a las necesidades del usuario, sin embargo es recomendable un compostador de mínimo 1 m³ de volumen (Cruz, 2008).



Figura 3.4 Ejemplos de compostadores de ladrillo y tela de alambre



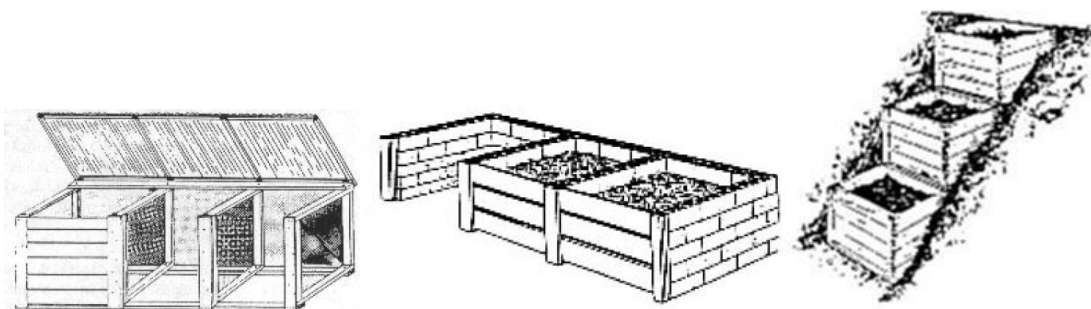
- **Tambos.** Se recomienda hacerles entre 24 a 48 orificios de 1 cm de diámetro para una buena ventilación (Cruz, 2008) y para evitar la entrada de agua de lluvia en los tambos se aconseja utilizar tapas.

Figura 3.5 Tambos compostadores



- **Compartimentos.** Los arreglos de varios cajones sirven para hacer la mezcla manejable y controlada, se pueden hacer de madera, ladrillos o tela de alambre. Estos se agrupan en 2 o 3 compartimentos, donde el material se puede voltear, mezclar y separar dependiendo del tiempo de maduración de la composta.

Figura 3.6 Cajones compostadores de 2 y 3 compartimentos



Se pueden fabricar diversidad de contenedores compostadores siempre y cuando tengan la capacidad suficiente y aseguren la humedad y ventilación adecuadas.



3.4.1 Lombricomposta

Existe una variante importante dentro de los sistemas de composteo. La lombricomposta, o vermicomposta, que emplea lombrices para ayudar a los microorganismos con la degradación de la materia orgánica, y puede ser empleado como auxiliar para acelerar el proceso de biodegradación en cualquiera de los sistemas antes mencionados. En este proceso, las lombrices transforman los minerales no asimilables presentes en los residuos biodegradables, en nitratos y fosfatos, directamente asimilables para las plantas. El producto de la lombricomposta son las heces fecales de las lombrices que es humus extremadamente fino, sin elementos tóxicos, inodoro y con características ideales de fertilizante.

Las siguientes lombrices pueden ser utilizadas para el proceso:

- Lombrices rubellus
- Eisenia Foetida (lombriz roja californiana)
- Eisenia Andrei

Figura 3.7 Lombriz rubellus



La producción de lombricomposta está directamente ligada a la cantidad de lombrices operando y al cuidado que se le dé, por lo que es recomendable tenerlas a una temperatura entre 20 y 25°C para asegurar una mayor eficiencia del sistema. Se recomienda un ambiente oscuro y húmedo, el pH óptimo es de 6 ó 7 (Gómez, 2006).

Las lombrices comen diariamente el equivalente a su peso, por lo que un kilogramo de estos gusanos procesa un kilogramo de residuos orgánicos cada día (Martín, 2009); si la cantidad de lombrices es menor se generarán malos olores y, en exceso, ocasionará la muerte de éstas hasta quedar un número acorde con la materia orgánica disponible. Las lombrices se añaden en la superficie de la mezcla de donde migran al interior del cuerpo de residuos formando túneles que ayudan en la ventilación del sistema.

3.5 Beneficios ambientales y económicos

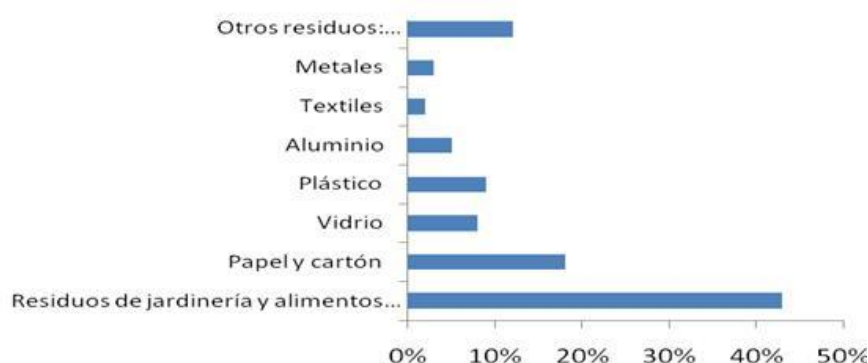


La composta es un mejorador natural de suelos, los nutre y mejora su textura; desprende sus nutrientes por un período de tiempo prolongado, permitiendo su aprovechamiento por las plantas a medida que van creciendo, y también permite aumentar la capacidad de absorción de agua. La composta que se produce con los residuos orgánicos de un municipio u hogar, puede utilizarse para la plantación de árboles y además, si se garantiza que no hay tóxicos presentes, se puede utilizar para el cultivo de hortalizas.

En la Ciudad de México, poco menos de la mitad (43%) de los residuos sólidos generados son de naturaleza orgánica, mientras que el resto están compuestos por materiales inorgánicos tales como metales, plásticos, telas y papel (ver figura 3.8) (PEMA, 2008). Por medio de los datos anteriores y, sabiendo que el composteo es un tratamiento que utiliza solamente materia orgánica, se podría llegar a reducir una cantidad muy importante de los RSU generados.

Esta reducción de RSU traería consigo una menor inversión en el manejo de los residuos, que actualmente tiene un costo aproximado de 250 (\$/ton) en México (Aguilar, 2008) destinado a infraestructura: áreas de almacenamiento, recolección y disposición final. Además, el aprovechamiento de residuos orgánicos disminuye el impacto ambiental en suelos, agua y atmósfera que los RSU producen.

Figura 3.8 Porcentaje de composición de RSU en la Ciudad de México



Por otro lado, el uso de composta como fertilizante orgánico sustituye el empleo de fertilizantes químicos que contienen gran cantidad de nitratos y nitritos que, en combinación con el oxígeno por la actividad bacteriana forman óxido nitroso (N_2O), un gas de efecto invernadero, incluso más peligroso que el dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4), ya que su tiempo de vida promedio y el potencial de calentamiento global (GWP) es aun mayor (ver tabla 3.4) (SEMARNAT, 2009).

Tabla 3.4 Tiempo de vida promedio y potencial de calentamiento global de los gases de efecto invernadero

	Tiempo de vida promedio (años)	GWP (global warning potential)
CO ₂	50 - 200	1
CH ₄	9 - 15	23



N ₂ O	120	296
------------------	-----	-----

Finalmente, el precio comercial de la composta depende de varios factores, algunos de ellos son: la selección de la materia prima, el tiempo de composteo, y la realización adecuada del proceso ya descrito. A continuación se presentan los precios en el mercado de algunos fertilizantes orgánicos y químicos:

Tabla 3.5 Fertilizantes en el mercado

Tipo	Nombre	Presentación	Composición	Dosis	Precio (M.N.2010)
QUÍMICOS	Miracle-Gro Fertilizante universal soluble en agua 	500 gr	N 15% P ₂ O ₅ 30 K ₂ O 15	15.15 gr/ m ² 3 veces al año	52.00
	Scotts Fertilizante de liberación continua 	1.36 kg	N 11% P ₂ O ₅ 7 K ₂ O 7	82.52 gr/m ² Cada dos meses	50.00
	Nutrigarden Alimento para todo tipo de pasto 	5 kg	N 14% P ₂ O ₅ 2 K ₂ O 6	100 gr/m ² Cada dos meses	99.90
ORGÁNICOS	Humus de Lombriz Rancho Los Molinos 	2 kg	Materia orgánica 15.75 %	200 a 300 gr/m ² Cada 3 meses	24.00
	Super Abono Natural	1 kg	Materia orgánica 56.60 % Abono de borrego 50% Tabaco en polvo 50%	1 kg/m ² 2 veces al año	25.50



Tipo	Nombre	Presentación	Composición	Dosis	Precio (M.N.2010)
					
	Tabaco en polvo 	5 kg	Materia orgánica 66.50%	500 gr/m ² Cada 3 meses	125.01
	Abono de borrego 	5 kg	Materia orgánica 20%	500 gr/m ² Cada 3 meses	69.90

Se puede observar una marcada diferencia entre los precios y rendimientos entre los fertilizantes químicos y los orgánicos. En promedio un kilogramo de fertilizante químico rinde para casi 40 m² a un costo de \$53.58, mientras que un kilogramo de fertilizante orgánico rinde 2.5 m² a un costo de \$19 (tabla 3.6). Por lo tanto, si se quisieran abarcar los mismos 40 m² con un fertilizante orgánico se necesitarían \$304. Lo anterior muestra que un fertilizante orgánico llega a ser casi 5 veces más caro que el químico, sin embargo los fertilizantes orgánicos no dañan al ambiente, tienen la misma función que los químicos y reducen la cantidad de residuos que se envían a disposición final.

Tabla 3.6 Rendimiento promedio de un kilogramo de fertilizante químico y orgánico

	Área abarcada	Costo
Fertilizante químico	40 m ²	\$53.58
Fertilizante orgánico	2.5 m ²	\$19.00

El empleo de fertilizantes orgánicos, como la composta es una herramienta para solucionar problemas en el manejo de residuos y el cambio climático; disminuyen la emanación de N₂O, además de evitar la destrucción de diversos ecosistemas originados por la disposición inadecuada de residuos.

El composteo es un proceso sencillo que ofrece la ventaja de adecuarse, en cuanto a tamaño y costo, a las necesidades del usuario. Sin embargo, para obtener buenos resultados se necesita conocer las características de los residuos orgánicos disponibles, las cuales reflejan el estilo de vida de determinada localidad; esto se analizará en el siguiente capítulo.





Capítulo 4. Caso de estudio

Para el diseño del proceso de composteo, el presente trabajo consideró como sitio de estudio el asentamiento irregular de Ocotla en la Delegación Tlalpan, Ciudad de México.

A partir de 1970 delegaciones del sur del Distrito Federal (Magdalena Contreras, Tlalpan, Tláhuac y Xochimilco) pasaron de tener unos 385 000 habitantes a cerca de 1 200 000 en 1990 (Mollá, 2006). Fue así como la Delegación Tlalpan se fue consolidando como la segunda con mayor tasa de crecimiento dentro de la Ciudad, y sus zonas de desarrollo urbano han sobrepasado el plan delegacional. Como consecuencia, existen 148 asentamientos irregulares¹ (entre ellos Ocotla) en suelos de conservación ecológica, áreas boscosas y zonas de recarga acuífera (PMIC, 2002).

Para poder regularizar dichos asentamientos, uno de los requisitos que pide el gobierno, es realizar un diagnóstico ambiental en el sitio para conocer la situación de los habitantes y la afectación ambiental que producen; la Facultad de Ingeniería de la UNAM, ha realizado diversos diagnósticos ambientales en la zona. En 2002 se elaboró el *Programa de Manejo Integral de Contaminantes* (PMIC, 2002) para San Miguel Topilejo (que incluyó Ocotla); en 2008 el *Programa Estratégico de Manejo Ambiental* (PEMA, 2008) para el asentamiento de Ayometitla (cercano a Ocotla), y en el 2009 el *Programa de Reducción de Impacto Ambiental* (PRIA, 2009) específico para Ocotla. Dichos estudios, se basaron principalmente en encuestas, visitas de campo y documentación proporcionada por la Delegación de Tlalpan.

Ocotla, por ser uno de los asentamientos irregulares de la Delegación Tlalpan, estar relativamente cerca de Ciudad Universitaria, contar con estudios previos y ser el lugar de residencia de uno de los miembros del PRIA, se convirtió en la mejor opción para analizar las ventajas de los sistemas de composteo para el manejo de RSU. La información de Ocotla que a continuación se presenta, se obtuvo de los programas ya mencionados: PMIC, PEMA, PRIA e información oficial disponible en internet.

4.1 Características de Ocotla

El asentamiento irregular de Ocotla se encuentra en la microcuenca de Arroyo Santiago, dentro del pueblo de San Miguel Topilejo en la Delegación Tlalpan, localizada al suroeste (19°09'57'' latitud norte y 99°09'57'' longitud oeste) del Distrito Federal (ver figura 4.1)

¹ Grupo de personas establecidas en un terreno dividido o lotificado para fines de vivienda, sin contar con las autorizaciones expedidas por las autoridades competentes en términos de la normatividad urbana (LRAHIEQ, 2007).

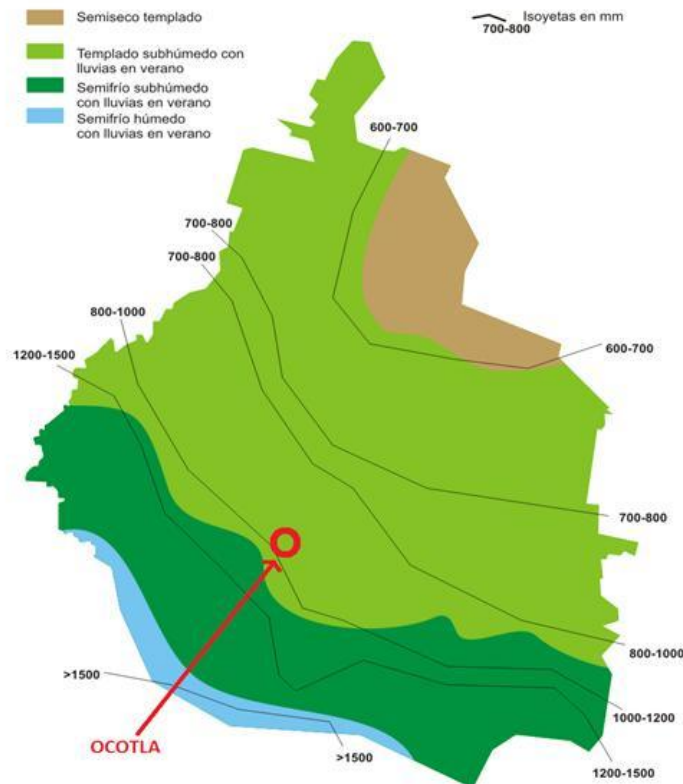


Figura 4.1 Ubicación de Tlalpan en el Distrito Federal



Tlalpan cubre 33,061 ha y es una de las zonas de mayor belleza paisajística y de más alta calidad ambiental de la ciudad (Mollá, 2006). Predomina el suelo de conservación de dos modalidades: 1) rescate y preservación ecológica y 2) producción rural agroindustrial. La precipitación pluvial media anual es de 750 mm y específicamente para el área de San Miguel Topilejo (donde se encuentra Ocotla) oscila de 800 a 1000 mm. Predomina el clima templado subhúmedo con lluvias en verano (figura 4.2).

Figura 4.2 Localización, clima y precipitación promedio anual en el Distrito Federal





De acuerdo con el Programa Delegacional de Desarrollo Urbano 2007, Ocotla es un polígono con una superficie de 148,263 m², a una altitud promedio de 2,840 msnm, cuenta con 317 lotes (figura 4.3), 122 familias y 450 habitantes.

Figura 4.3 Plano general e imagen satelital de Ocotla



De los 317 lotes existentes, 253 están construidos: 165 están habitados y 88 deshabitados; y 64 son baldíos. En general, el asentamiento tiene características urbanas, pero aún existen algunos terrenos de cultivo y espacios utilizados como granjas de traspatio.

El nivel de vida en Ocotla es muy variado según se pudo deducir por el material de construcción de las viviendas (ver figura 4.4).



Figura 4.4 Nivel de vida en Ocotla



4.2 Diagnóstico ambiental de Ocotla

Come se mencionó, para recabar información acerca del asentamiento en estudio se utilizaron estudios previos como el PMIC, el PEMA y el PRIA. Sin embargo, para la siguiente parte del trabajo, la información se obtuvo particularmente del PRIA.

El PRIA, fue un proyecto realizado durante el último semestre del 2009 por parte de un equipo conformado por 12 estudiantes de los últimos semestres de la carrera de Ingeniería Industrial de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Dicho proyecto, tuvo el objetivo de evaluar los efectos negativos al ambiente provocados por los habitantes del asentamiento y proponer alternativas de solución. Para facilitar el trabajo, el PRIA fue dividido en seis temas ambientales:

- Agua potable
- Manejo de aguas residuales
- Contaminación atmosférica
- Manejo de residuos sólidos urbanos
- Manejo de residuos peligrosos
- Riesgo ambiental

Para lograr el objetivo se diseñó la siguiente metodología:

- Integración del grupo de trabajo por medio de ejercicios de creatividad e integración. Posteriormente se formaron seis grupos de trabajo para cada uno de los temas ambientales
- Revisión teórica de los aspectos ambientales a considerar
- Planeación del trabajo de campo en base a estudios similares como el PMIC y el PEMA
- Obtención de información y diseño de material de apoyo, como información proporcionada por la delegación, datos del PMIC, 20 encuestas aplicadas a habitantes que voluntariamente accedieron a responderla y se prepararon mapas del asentamiento a utilizar en las posteriores visitas de campo



- Visita preliminar por secciones para recorrer las principales calles del asentamiento, junto con uno de sus habitantes que también es integrante del equipo de trabajo
- Aplicación de encuestas y recopilación de información de campo en una reunión con habitantes de Ocotla para informarles el objetivo del estudio
- Procesamiento de la información y elaboración de diagnóstico
- Estudio de alternativas y elaboración de propuestas
- Presentación de resultados y entrega de reporte final en una reunión con los habitantes de Ocotla

De tal manera que los resultados obtenidos están respaldados por un trabajo sólido de documentación e investigación que partió del siguiente diagnóstico ambiental de Ocotla:

Agua potable. Ocotla no cuenta con una red de distribución de agua potable por lo que su fuente de abastecimiento es principalmente *pipas* proporcionadas por la Delegación con un costo de \$10/m³, además de la captación de agua pluvial. Para la solución a los problemas del manejo de este tipo de agua, el PRIA recomendó instalar sistemas ahorradores de agua y sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia.

Manejo de aguas residuales. Debido a la poca disponibilidad de agua, los habitantes comúnmente re-usan el agua; sin embargo su disposición es inadecuada al emplear, en su mayoría, fosas sépticas con infiltraciones al subsuelo o descarga del agua residual directamente al suelo (ver figura 4.5). Se propuso la instalación de sistemas de disposición apropiados (fosas sépticas) y la construcción de un humedal artificial por cada vivienda como tratamiento de aguas residuales.

Figura 4.5 Disposición de aguas residuales



Contaminación atmosférica. Se detectaron como principales causas de contaminación, la defecación al aire libre de animales (112 perros) (figura 4.6) y la erosión provocada por falta de pavimentación. Debido a esto, se recomendó la esterilización y dormición canina así como el empedrado en todas las calles de Ocotla.



Figura 4.6 Perros callejeros



Manejo de residuos sólidos. El manejo de residuos sólidos es inadecuado. Se emplean recipientes improvisados como contenedores domésticos, principalmente bolsas de plástico. No hay contenedores públicos y el 35% de los habitantes no tiene la oportunidad de entregar sus RSU al servicio de recolección ya que la mayoría de las veces no se encuentran en su domicilio en el momento en que el camión hace la recolección, por lo que calles y terrenos baldíos se usan como tiraderos (figura 4.7). Las alternativas propuestas fueron utilizar dos contenedores con tapa, de polietileno de alta densidad y de diferentes colores para almacenar y separar los residuos sólidos en cada vivienda, instalar contenedores de almacenamiento temporal (apartado 2.4.3) para residuos orgánicos e inorgánicos en cinco puntos del asentamiento donde hace la parada el vehículo de recolección actualmente, y realizar composta casera.

Figura 4.7 Terreno baldío utilizado como tiradero



En base a las 20 encuestas realizadas, la comunidad de Ocotla, está acostumbrada a aprovechar todos los materiales con los que cuenta (35% de la población), por lo que el 65% de la comunidad separa sus residuos y aprovecha los desperdicios que producen, ya sea como abono para plantas o como comida para sus animales (figura 4.8). Con esto, la posibilidad de poner en práctica el composteo en Ocotla es viable en cuanto a la cultura de reaprovechamiento de residuos orgánicos con la que ya cuenta la comunidad.

Manejo de residuos peligrosos. Pinturas, productos de limpieza, aceites, pilas, medicinas, pesticidas, jeringas, pañales, etc. son depositados junto con los RSU, principalmente debido a la falta de información para su identificación. Se propuso realizar campañas de



información y emplear contenedores únicamente para el almacenamiento de residuos peligrosos.

Riesgo ambiental. Ocotla carece de infraestructura urbana adecuada, por lo que existen algunos factores de riesgo ambiental. Estos son: descargas ocasionadas por instalaciones eléctricas inadecuadas (figura 4.9), sin aislamiento y con materiales en deterioro o por sobrecarga; inundaciones provocadas por la irregularidad del terreno e incendios, debido a fugas en las instalaciones que utilizan gas LP. Se recomendó cambiar conexiones eléctricas y tuberías de gas, empedrar calles, y contar con un botiquín de primeros auxilios.

Figura 4.8 Riesgo por descarga eléctrica



Como se puede observar, es necesario crear estrategias que den solución a los problemas antes planteados, como el manejo inadecuado de los RSU. Se debe destacar la importancia del diseño de un sistema de composteo que vaya acorde con el estilo de vida de los habitantes de Ocotla. En cuanto a la aceptación del composteo como una técnica destinada a la reducción de RSU en Ocotla, el 75% de las personas encuestadas se muestra accesible a conocer dicho proceso y los beneficios que éste otorga.

4.3 Selección del sistema de composteo

Para la selección del sistema de composteo, es necesario tomar en cuenta algunas características propias del lugar, así como de sus habitantes. La comparación de dichas características para los cuatro sistemas de composteo mencionados en el capítulo 3, se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 4.1 Comparación de los sistemas de composteo

Sistema	Requerimiento de espacio	Factores a considerar
Reactor	Grande	• Requiere terreno comunal • Capacitación • Mano de obra especializada • Maquinaria especializada (dispositivos de riego y aireación, motor, tornillo sinfín, entre otros)



		• Participación comunitaria • El costo llega a ser de 6 a 10 veces mayor que el sistema de pilas estáticas
Pilas estáticas	Grande (ver apartado 3.4)	• Requiere terreno comunal • Mano de obra no calificada para operación, mantenimiento y vigilancia • Maquinaria (trituradora, tractores y palas) • Participación comunitaria • Medio costo
Contenedores	Pequeña (mínimo de 1m ³)	• Contenedor • Participación individual • Bajo costo
Lombricomposta	Pequeña (mínimo de 1m ³)	• Contenedor • Lombrices • Participación individual • Medio costo

La clasificación de costos de los cuatro sistemas (alto, medio y bajo) se realizó tomando como base la comparación entre el sistema de pilas estáticas y por el reactor anaerobio, el cual llega a ser de 6 a 10 veces mayor (LOPEZ, 1975). De tal manera que los sistemas de contenedores y lombricomposta fueron clasificados con un costo menor al no contar con requerimientos tan especializados (maquinaria y mano de obra) como en los dos sistemas anteriores.

Para decidir qué sistema emplear, se consideraron principalmente dos criterios: disponibilidad de espacio y costo; ya que Ocotla, al ser un asentamiento de nivel socioeconómico de bajo a medio, no puede realizar fuertes inversiones para comprar o rentar un terreno destinado al composteo, ni para adquirir la maquinaria necesaria. De tal manera, los sistemas por pilas y por reactor quedan descartados, ya que son los dos sistemas que más recursos económicos necesitan.

Por el contrario, los sistemas por contenedores y la lombricomposta no necesitan grandes extensiones de terreno, ya que son sistemas fácilmente adaptables en cuanto a tamaño y pueden ser controlados por pocas personas. Sin embargo, la lombricomposta requiere un costo extra para la compra de la lombriz (\$450/kg) y más cuidado en el mantenimiento (ML, 2010).

Por lo tanto, el sistema más adecuado, de acuerdo con las características de la localidad, es el composteo en contenedores, ya que ofrece un proceso muy sencillo y se adapta fácilmente a las posibilidades y necesidades del usuario.

Ya seleccionado el sistema más apropiado, a continuación se realiza un estimado de la cantidad de composta a producir de acuerdo a las características de Ocotla.



4.4 Producción de composta

Como se mencionó en el capítulo 3, para conocer la cantidad de composta a producir es necesario saber de cuánta materia orgánica se dispone (Mo); de acuerdo con la ecuación 3.1 para este cálculo, se necesitan tres datos: generación per cápita (Ge), número de personas que generaron los residuos (Hab), y el porcentaje de materia orgánica presente en los residuos ($\%mo$).

Generación per cápita. Se refiere a la cantidad de residuos generados por un habitante en kilogramos al día. Para estimar la generación per cápita, se tomaron datos de la Delegación de Tlalpan y de la Ciudad de México ya que el asentamiento tiene las mismas características urbanas. La Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales reportó para la Ciudad de México en el 2004, una generación per cápita de 1.4, mientras que la Delegación de Tlalpan notificó una generación de 1.16 para el mismo año. Por otro lado, la UNAM, por medio del PMIC y el PRIA reportó una generación per cápita de 0.88 y 0.73 respectivamente (según datos obtenidos a partir de encuestas a los habitantes del asentamiento).

Tabla 4.2 Generación de RSU en Ocotla

Fuente de información	Generación per cápita (kg/hab-día)
SEMARNAT	1.4
Delegación Tlalpan	1.16
PMIC, 2002	0.88
PRIA, 2009	0.73
Promedio	1.04

Por lo tanto, para determinar el valor de generación per cápita en Ocotla a utilizar en el presente trabajo, se promediaron los datos disponibles (ver tabla 4.2), obteniendo un valor de 1.04 (kg/hab-día).

Número de personas que generaron los residuos. De acuerdo con los estudios realizados por el PMIC y el PRIA, para la comunidad de Ocotla se tiene un número promedio de 6 habitantes por vivienda.

Porcentaje de materia orgánica. Debido a la cercanía del asentamiento con la Ciudad de México, características como el clima y los hábitos de consumo se considera que el porcentaje de materia orgánica presente en los RSU generados en Ocotla es del 43% (ver figura 3.8).

Establecidas las variables y sustituyendo los datos en la ec. 3.1 se tiene que para un día la cantidad de materia orgánica generada en una vivienda en el asentamiento de Ocotla es de 2.68 (kg).

$$Mo = \left(1.04 \frac{kg}{hab-día}\right) (6 hab)(0.43) = 2.68 [kg/día]$$



Sin embargo, del total de la materia orgánica residual en una vivienda, el 6.98% está compuesto por huesos y casi el 15% por pescado, pollo y carne, residuos que no son recomendables para la elaboración de la composta y que en muchas ocasiones son el alimento de animales domésticos (apartado 4.2). Debido a esto, la cantidad de materia orgánica destinada a la composta puede ser:

$$Mo_{disponible} = 2.68 - 0.0698(2.68) - 0.15(2.68) = 2.09 \text{ [kg/día]}$$

La Mo a la que se hace referencia todavía no incluye la cantidad de residuos café a utilizar, por lo tanto se debe duplicar la Mo anterior para considerarlos:

$$Mo_{total} = 2 * 2.09 = 4.18 \text{ [kg/día]}$$

Del total de Mo se sabe que llega a reducirse entre el 50% y el 85% dependiendo del tiempo de composteo y la actividad microbiana, es decir, la relación entre el tiempo de composteo y la cantidad de composta producida es inversamente proporcional. Atendiendo esta relación es posible considerar dos casos:

- Caso 1. Cuando se obtiene el 50% del total de materia orgánica en composta para un proceso de dos meses
- Caso 2. Cuando se obtiene el 15% para un proceso de seis meses

Así, la composta neta producida con la materia orgánica generada en un día durante un proceso de composteo de 2 y 6 meses a partir de la ecuación 3.2 es de 2.09 y 0.63 (kg) respectivamente.

$$\text{Caso 1} = (4.18 \text{ kg}) - (0.5)(4.18 \text{ kg}) = 2.09 \text{ [kg/día]}$$

$$\text{Caso 2} = (4.18 \text{ kg}) - (0.85)(4.18 \text{ kg}) = 0.63 \text{ [kg/día]}$$

4.5 Dimensión y costo del contenedor

Una vez establecida la cantidad de materia orgánica a tratar, y sabiendo que el sistema de composteo por contenedores es el más adecuado para el asentamiento, lo que sigue es determinar las dimensiones del contenedor a emplear. Para lograr disminuir la cantidad de RSU casi a la mitad, se necesita que se reaprovechen continuamente los residuos orgánicos, es decir, que la separación de la materia orgánica en los RSU se realice diariamente para su posterior composteo. Por lo tanto, para llevarlo a cabo se tiene que contar con un contenedor capaz de almacenar los residuos orgánicos que diariamente se producen, hasta obtener la composta.

Establecido lo anterior, se analizarán dos contenedores, uno para el Caso 1 (dos meses de almacenamiento) y otro para el Caso 2 (seis meses de almacenamiento). Para obtener el volumen (ver tabla 4.3), se utilizó un peso volumétrico de 291 (kg/m³) para la materia orgánica (PMIC, 2002).



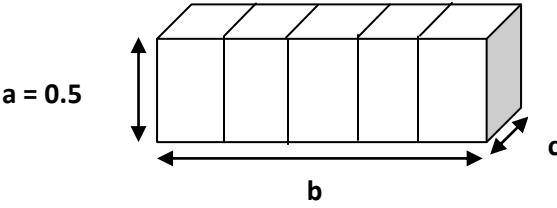
Tabla 4.3 Volumen necesario del contenedor

Caso	Mo diaria (kg)	Tiempo de compostaje (días)	Mo total generada (kg)	Volumen (m ³)
1	4.18	62	259.16	0.89
2	4.18	186	777.48	2.67

Teniendo el volumen promedio del contenedor a utilizar, en la tabla 4.4 se presentan las dimensiones de un contenedor rectangular con cajones con una altura de 0.5 metros, que brinda la facilidad de manejar la composta de acuerdo a su tiempo de maduración (ver apartado 3.4).

Tabla 4.4 Dimensiones y costos del contenedor

Caso	Contenedor rectangular (m)	Costo (\$)*
1	b = 1.89 c = 0.95	200
2	b = 3.27 c = 1.63	300



*El costo incluso puede ser nulo si se excava un agujero del tamaño adecuado en el terreno.

El objetivo es que el contenedor pueda almacenar la materia orgánica hasta que ésta sea apta para su utilización, por lo tanto se debe dimensionar para el tiempo en que el proceso haya culminado (2 a 6 meses) y siga estando disponible para la descarga de nuevos residuos. El usuario deberá analizar qué tipo de contenedor se adecua más a sus necesidades y posibilidades.

4.6 Análisis costo – beneficio ambiental

El análisis costo – beneficio tiene como objetivo proporcionar una medida de la rentabilidad del proyecto mediante la comparación de los costos previstos, con los beneficios esperados en la realización del mismo. Los costos son la suma de recursos que se han invertido para producir algo, por lo tanto, están directamente relacionados con la función manufacturera o fabril (la adquisición de materia prima hasta su transformación en producto o servicio); los costos deben ser tangibles, es decir, se pueden medir mediante alguna unidad económica. Los beneficios en cambio, pueden ser tangibles o intangibles.



En este caso el análisis se realiza para conocer la rentabilidad que podrían obtener los habitantes en Ocotla al fabricar composta, ya sea para el uso en su vivienda o para venderla. El único costo involucrado en la elaboración de composta es el que causa la fabricación del contenedor, \$200 para dos meses y \$300 para seis meses. Por otro lado, los beneficios se presentan en la tabla 4.5.

Tabla 4.5 Tabla de beneficios

Beneficios	\$
Ahorro al no comprar fertilizante	19 / kilogramo
Ahorro al no dar propina al servicio de recolección de RSU	10 / semana
Fuente de ingresos económicos al vender la composta	Se determina a continuación
Sustitución de fertilizante químico por orgánico	Intangible
Reducción de RSU entregados al servicio de recolección	Intangible

Como se observa, dos de los cinco beneficios involucrados son intangibles; sin embargo, la sustitución de fertilizantes químicos por orgánicos y la reducción de RSU son factores de cambio para la disminución de la contaminación en suelos, agua y atmósfera antes descritos y el esfuerzo se verá reflejado a largo plazo en los mantos acuíferos menos contaminados y en la menor cantidad de residuos sólidos en sus calles.

En caso de que los habitantes opten por usar la composta, el análisis se basa únicamente en el ahorro que existe entre comprar fertilizante orgánicos (con un costo promedio de 19 \$/kg en supermercados) y el de fabricar el contenedor en el cual pueden producir su propia composta. La otra opción sería que los habitantes elijan vender su composta, en este caso es importante establecer el precio de venta.

En el mercado, el precio promedio es 19 (\$/kg) de fertilizante orgánico, por lo que ese precio sería el máximo a considerar. Con un precio de inicio de 10 (\$/kg) se ofrece casi un 50% de ahorro para consumidores acostumbrados a comprar fertilizantes en los supermercados; con este precio aparte de beneficiar a consumidores ya establecidos se da la opción de vender composta de calidad a nuevos clientes, dando a conocer los beneficios y usos de la composta a un bajo precio.

Al vender la composta a un precio de 10 (\$/kg), los habitantes recuperan su inversión inicial (fabricación del contenedor) vendiendo 20 (kg) en el caso de dos meses de preparación, o 30 (kg) en seis meses de preparación (ver tabla 4.6).



Tabla 4.6 Vender composta

Caso	Tiempo de compostaje (días)	Composta diaria (kg)	Costo del contenedor (\$)	Precio de venta (\$/kg)	Composta necesaria a vender (kg)	Tiempo total de recuperación (días)
1	62	2.09	200	10	$200/10 = 20$	$62+20/2.09 = 71$
2	186	0.63	300	10	$300/10 = 30$	$186+30/0.63 = 233$

El rango de recuperación de 71 a 233 días, depende totalmente de las condiciones en las que se llevó a cabo el proceso de composteo, como la selección de la materia prima y su preparación (capítulo 3). Sin embargo, asegurando un buen proceso, el tiempo de recuperación de 71 días es un periodo corto, sobre todo destacando que los primeros 62 días son el tiempo de preparación, en el que se procesa la materia orgánica para empezar a producir a partir del día 63; de éste momento en adelante, diariamente se estarán produciendo 2.08 (kg) de composta con un ingreso neto de 20.8 (\$/día) por vivienda para los habitantes de Ocotla.

Sólo para el gobierno, la realización del composteo en Ocotla significa un ahorro de un 21% (residuos orgánicos sin huesos, pollo, pescado y carne) en la inversión para el manejo de residuos sólidos, permitiendo invertirlo en mejorar otras etapas del SMRSU o en otros servicios enfocados al bienestar del asentamiento.

En el siguiente esquema se presenta el proceso general que se llevó a cabo para establecer el composteo en el asentamiento.



Figura 4.9 Esquema de composteo en Ocotla





Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

Ante el acelerado aumento de la cantidad de residuos sólidos generados en la Ciudad de México, la aplicación de técnicas enfocadas a su disminución es cada vez más urgente. Debido a esto, el interés por estudiar el composteo se originó debido a la eficacia y sencillez con la que se reaprovechan casi en su totalidad los residuos orgánicos.

La ingeniería industrial se caracteriza por tener una formación integral, es decir: brinda la capacidad de entender y analizar diferentes tipos de procesos; y, facilita la propuesta de mejoras y soluciones de gran impacto para sistemas simples y complejos. Debido a esto, las aportaciones más importantes de este estudio fueron:

- a) análisis sistémico de los residuos sólidos urbanos en una comunidad
- b) y la propuesta de una solución eficaz, eficiente e integral

Como se observó en el capítulo 2, el composteo es uno de los tratamientos que forman parte de un Sistema de Manejo Integral de RSU por lo que analizarlo por separado sin considerar los posibles efectos y reacciones de los otros elementos del sistema sería un error. Con el análisis sistémico del SMIRSU y el conocimiento de la eficiencia del composteo como reaprovechamiento de los residuos orgánicos, fue posible llegar a la conclusión de que una forma de mejorar el manejo de los residuos, es aplicar dicho tratamiento justo al momento de generación, donde causa un mayor impacto al evitar la recolección y transporte (ver figura 2.9).

Es así como se plantea una solución eficaz, eficiente e integral ante el problema del manejo de los RSU, ya que se reduce la cantidad de RSU enviados a disposición final y se ahorran recursos económicos en diferentes etapas del sistema. La ingeniería industrial participa de ésta manera, no sólo analizando una parte del sistema por sí sola, sino interrelación con el todo creando así un beneficio integral.

Por otra parte, conociendo el impacto provocado por el composteo en el SMIRSU, las conclusiones más relevantes del presente trabajo son:

1. El composteo reaprovecha los residuos orgánicos reduciendo hasta en un 21% (capítulo 4) la cantidad de residuos sólidos que se entregan al servicio de recolección. De ésta manera, se evita la inversión de recursos económicos empleados en la recolección, transferencia, tratamiento y disposición final
2. La elaboración de composta aporta beneficios ambientales:
 - Reducción de la cantidad de RSU enviados a disposición final
 - Disminución de óxido nitroso en la atmósfera, debido a la sustitución de fertilizantes químicos por orgánicos
 - Vías públicas y áreas verdes más limpias
 - Mantos acuíferos menos contaminados al llegar menos residuos orgánicos a tiraderos y rellenos sanitarios



3. La calidad de la composta producida depende principalmente de la selección de los residuos orgánicos y de su preparación

4. Para la aplicación del tratamiento es necesario conocer las características de los RSU generados en el sitio donde se planea llevar a cabo el composteo. Con esto, se conoce la factibilidad para hacer composta y su posible calidad

Existen diferentes sistemas de composteo y su selección depende de características propias del sitio donde se planea elaborar.

La mejor manera de conocer las características de los RSU es realizando un muestro de los mismos sin embargo, como se describió en el capítulo 1, para este trabajo no se realizó porque lo que se quiere es mostrar un panorama general de los efectos y beneficios generados a partir del composteo en el asentamiento, y con los datos obtenidos de las diversas fuentes de información fue posible.

Es importante observar que para llevar a cabo satisfactoriamente el composteo se tienen que tomar en cuenta las necesidades y posibilidades económicas y de espacio con las que cuente el usuario. En el capítulo 3, se mostraron diversos sistemas de composteo, sin embargo el mejor de ellos será aquel que sea más fácil y cómodo de utilizar por el usuario.

Otros posibles beneficios al realizar el composteo son:

- a) El ahorro del gobierno local al manejar menor cantidad de residuos:
Habría un ahorro de un 21% en la inversión total en el manejo de los RSU, lo que permitiría invertir lo ahorrado en mejorar otras etapas del servicio.
- b) Produciendo su propia composta, los habitantes del asentamiento se ahorrarían en promedio 19 (\$/kg) en fertilizantes comprado en supermercados
- c) La ayuda económica que tendrían los habitantes del asentamiento si optan por vender la composta
 - Cada vivienda tendría un ingreso neto de 20.8 (\$/kg) diarios a partir del día 72 de iniciado el proceso.

Como se observa en los incisos anteriores, la aplicación del composteo en el asentamiento es factible, ya que aparte de beneficiar económicamente al SMIRSU, aporta beneficios económicos a los habitantes del asentamiento, además de fomentar una cultura de reaprovechamiento de residuos y, al mismo tiempo, de cuidado al ambiente.

Acciones como el composteo generan grandes cambios en cuanto a la reducción de efectos negativos al medio, sin embargo también es necesario pensar en acciones que prevengan dichos efectos antes de generarlos, algunas de éstas son:



- Comprar sólo los productos necesarios, y que estos sean más duraderos y de calidad
- Alquilar o pedir prestado algún producto que sólo se utilizará ocasionalmente
- Evitar usar una bolsa de plástico nueva cada vez que se realiza alguna compra
- Evitar el consumo de envases, envoltorios y/o embalajes innecesarios
- Aplicar las 3R (ver capítulo 2)

Finalmente, considero importante recomendar el involucramiento de la ingeniería industrial en temas ambientales para generar soluciones integrales y de impacto en problemas como el manejo de residuos sólidos, el calentamiento global o la escasez de agua, además de inculcar una cultura de cuidado del medio ambiente en las nuevas generaciones de jóvenes empezando desde el hogar.



BIBLIOGRAFÍA

Colomer, Francisco (2007), *Tratamiento y gestión de residuos sólidos*, Primera edición, México, Editorial Limusa.

Cruz, Katy (2008), *Manejo y tratamiento de residuos orgánicos e inorgánicos en viviendas sustentables*, Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.

Deffis, Armando (1989), *La residuos sólidos es la solución*, 1ª edición, México, Editorial Concepto México

Domínguez, Jessica (2006), *Sistema de manejo integral de residuos sólidos municipales para pequeñas localidades*, Tesis para obtener el título de Maestra en Ingeniería. Posgrado de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.

Gómez, Uriel (2006), *Elaboración de composta a partir de residuos orgánicos generados en el consorcio minero Benito Juárez (Peña Colorada) y su aprovechamiento en la reforestación de terrenos*, Tesis para obtener el título de Ingeniero de Minas y Metalurgista, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Heinke, Gary y Glynn, Henry (1999), *Ingeniería Ambiental*, 2ª edición, México, Pearson Education.

López, Jaime (1975), *Residuos sólidos urbana. Recogida, eliminación y reciclaje*, 5ª edición, España, Editores Técnicos Asociados, S.A.

PEMA (2008), *Programa Estratégico de Manejo Ambiental*, Reporte del proyecto elaborado para el asentamiento Ayometitla en la Delegación de Tlalpan del Gobierno del Distrito Federal por la Coordinación de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, México.

PMIC (2002), *Programa de Manejo Integral de Contaminantes*, Reporte del proyecto elaborado para la Delegación de Tlalpan del Gobierno del Distrito Federal por la Coordinación de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, México.

PRIA (2009), *Programa de Reducción de Impacto Ambiental*, México, Reporte del proyecto elaborado para el asentamiento Ocotla en la Delegación de Tlalpan del Gobierno del Distrito Federal por la Coordinación de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, México.

Silva, Antonio (1998), *La dimensión espacial del manejo de la residuos sólidos en la Ciudad de México: un análisis geográfico*, Tesis para obtener el título de Licenciado en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras. Universidad Nacional Autónoma de México.



Trejo, Rodolfo (1999), *Procesamiento de la residuos sólidos urbana*, 3era edición, México, Editorial Trillas



MESOGRAFÍA

Aguilar, José (2008), *El mejor residuo es el que no se genera*, [página web en línea], México, El Consumidor, 24/08/08, [citado 20-02-10], disponible en internet: [http://www.scribd.com/doc/5007738/Entrega-Especial-Residuos sólidos](http://www.scribd.com/doc/5007738/Entrega-Especial-Residuos-sólidos)

Alatorre, Adriana (2009), *México: aumenta residuos sólidos y faltan rellenos*, [página web en línea], México, Periódico El Reforma, 15/02/09, [citado 09-09-09], disponible en internet:

[http://www.giresol.org/index.php?option=com_content&view=article&id=1241:mexico-aumenta-residuos sólidos-y-faltan-rellenos&catid=115&Itemid=100009](http://www.giresol.org/index.php?option=com_content&view=article&id=1241:mexico-aumenta-residuos-sólidos-y-faltan-rellenos&catid=115&Itemid=100009)

AMEY (2002), *Reglamento de limpia y manejo de residuos sólidos no peligrosos del municipio de Mérida*, [página web en línea], México, Ayuntamiento de Mérida Estado de Yucatán, [citado 11-10-09], disponible en internet: <http://merida.gob.mx/eco/merida/reglimpia.pdf>

Amparán, Francisco (2009), *Breve historia de la evolución de la residuos sólidos, los días, los hombres, las ideas*, [página web en línea], México, Periódico El Siglo de Torreón, [citado 01-09-09], disponible en internet: [http://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/307180_breve-historia-de-la-evolucion-de-la-residuos sólidos-l.html](http://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/307180_breve-historia-de-la-evolucion-de-la-residuos-sólidos-l.html)

Carabias, Julia y Quadri de la Torre, Gabriel (2009), *Estaciones de transferencia de residuos sólidos en áreas urbanas*, [página web en línea], México, Instituto Nacional de Ecología, [citado 26-09-09], disponible en internet: <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/download/105.pdf>

Carrasco, Rosa (2007), *La sociedad del consumo: origen y características*, [página web en línea], Contribuciones a la Economía, [citado 28-08-09], disponible en internet: <http://www.eumed.net/ce/2007a/acr.htm>

Castillo, Héctor (2008), *El Zar de la residuos sólidos. Caciquismo en la Ciudad de México*, [página web en línea], México, Periódico El Siglo de Torreón, 16/05/2008, [citado 05-10-09], disponible en internet: [http://vidasinresiduos sólidos.blogspot.com/feeds/posts/default](http://vidasinresiduos-sólidos.blogspot.com/feeds/posts/default)

CEPIS (2009), *Guía para el manejo de residuales sólidos en ciudades pequeñas y zonas rurales*, [página web en línea], Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria, [citado 02-09-09], disponible en internet: http://www.cepis.org.pe/curso_mrsm/e/fulltext/pequena.pdf

CEPIS-OPS (2009), *Alternativas del procesamiento y la disposición final de la residuos sólidos. La opción del reciclaje como recuperación energética y de material*, [página web en línea], Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y la Organización Panamericana de



la Salud, [citado 18-09-09], disponible en internet: <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsacd/013540/013540-01.pdf>

Consumer (2007), *Incineración de residuos sólidos: necesarias para unos, contaminantes para otros*, [página web en línea], España, Revista Consumer Eroski, Marzo 2002, [citado 18-09-09], disponible en internet: <http://revista.consumer.es/web/es/20020301/medioambiente/38816.php>

CPSUZ (2009), *Procesos termoquímicos*, [página web en línea], España, Centro Politécnico Superior de la Universidad de Zaragoza, [citado 18-09-09] disponible en internet: <http://www.cps.unizar.es-proter/Gasificaci%F3n.htm#gasificacion>

Cruz, Reynaldo (2002), *Metodología propuesta para la clausura de tiraderos a cielo abierto, caso de estudio*, México, [página web en línea], XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, [citado 15-01-10], disponible en internet: www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico26/iv-016.pdf

Darío, Jesús (2008), *Consumismo en México*, [página web en línea], México, Universidad de las Américas Puebla, 2008, [citado 01-09-09], disponible en internet: <http://www.scribd.com/doc/8644227/consumismo-en-mexico-Final>

Florisbela, Anna y Wehenpohl, Gunther (2009), *De pepenadores y triadores. El sector informal de los residuos sólidos municipales en México y Brasil*, [citado 09-09-09], disponible en internet: <http://www.gta.de/de/dokuments/es-svabfall-infothek-is-download-pepenadorestriadores.pdf>

GDF (2006), *Matriz de características para determinar clases de construcciones de uso habitacional*, [página web en línea], México, Gobierno del Distrito Federal, [citado 15-02-10], disponible en internet: <http://www.finanzas.df.gob.mx/documentos/matrizCaracteristicas2006.pdf>

González, Juan Carlos (2009), *Higiene, salubridad y epidemias en la Nueva España: el caso de Guadalajara durante el siglo de las luces*, [página web en línea], México, [citado 02-09-09], disponible en internet: <http://www.sincronia.cucsh.udg.mx/cruzw06.htm>

INE (1996), *Estaciones de transferencia de residuos sólidos en áreas urbanas*, Instituto Nacional de Ecología, [página web en línea], 1ª edición, México, 03/12/96, [citado 10-09-09], disponible en internet: http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub=105

IRSDF (2007), *Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal*, [página web en línea], México, Secretaría de Medio Ambiente, [citado 02-10-09], disponible en internet: <http://www.sma.df.gob.mx/rsolidos/inventario/presentacion.pdf>



LGRSDF (2003), *Ley general de Residuos Sólidos del Distrito Federal*, [página web en línea], México, Gobierno del Distrito Federal, 22/04/03, [citado 04-09-09], disponible en internet: http://www.provecino.org.mx/pdfs/leyes/Ley_Residuos_Solidos_DF.pdf

LRAHIEQ (2007), *Ley para la Regularización de los Asentamientos Humanos Irregulares del Estado de Querétaro*, [página web en línea], México, Gobierno del Estado de Querétaro, 20/07/07, [citado 18-02-10], disponible en internet: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/133.pdf>

Martín, Piedad (2009), *Lombrices usadas para reciclar la residuos sólidos*, [página web en línea], México, ConocimientosWeb, [citado 26-09-09], disponible en internet: <http://www.conocimientosweb.net/portal/article1641.html>

Mascha, Wembacher (2007), *Información sobre compost y compostero*, [página web en línea], Alemania, Simon Feiertag, 06/02/09, [citado 02-02-10], disponible en internet: <http://www.ethno-botanik.org/Sonstiges/Compostero/Compostero.html>

Medina, José y Jiménez, Isabel (2001), *Minimización y manejo ambiental de los residuos sólidos*, [página web en línea], 1ª edición, México, Instituto Nacional de Ecología, 15/11/07, [citado 26-09-09], disponible en internet: <http://www.ine.gob.mx/publicaciones/libros/345/sresiduos.html>

ML (2010), *Lombriz*, [página web en línea], México, Mercado Libre, [citado 20-03-10], disponible en internet: http://listado.mercadolibre.com.mx/LOMBRIZ_DisplayType_G_Qshow_48

Mollá, Manuel (2006), *El crecimiento de los asentamientos irregulares en áreas protegidas. La delegación Tlalpan*, [página web en línea], México, Investigaciones Geográficas Boletín del Instituto de Geografía UNAM, 07/02/06, [citado 17-02-10], disponible en internet: <http://www.igeograf.unam.mx/instituto/publicaciones/boletin/bol60/b60art5.pdf>

Montes, Consuelo (2010), *Efluentes gaseosos – tratamiento*, [página web en línea], Argentina, Universidad de Antioquia, [citado 26-02-10], disponible en internet: <http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/entregacs.asp?IdEntrega=645>

Mora, José (2004), *El problema de la residuos sólidos en la Ciudad de México*, [página web en línea], México, Fundación de estudios urbanos y metropolitanos, 23/04/04, [citado 02-08-09], disponible en internet: <http://fundacion-christlieb.org.mx/estudios/estudio30.pdf>

Navarro, Ricardo (2009), *Manual para hacer composta aeróbica*, [página web en línea], El Salvador, Centro Salvadoreño de Tecnología Apropiable, [citado 03-12-09], disponible en internet: <http://www.cesta-foe.org/recursos/pdfs/composta.pdf>



NOM-083-SEMARNAT-2003, *Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial*, [página web en línea], México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, publicada el 20 de octubre de 2004 y entró en vigor a partir del 19 de diciembre de 2004, disponible en internet: [http://www.semarnat.gob.mx/leyesyformas/Normas Oficiales Mexicanas vigentes/NOM-083-SEMAR-03-20-OCT-04.pdf](http://www.semarnat.gob.mx/leyesyformas/Normas%20Oficiales%20Mexicanas%20vigentes/NOM-083-SEMAR-03-20-OCT-04.pdf)

OPS (2003), *Evaluación regional de los servicios de manejo de residuos sólidos municipales 2003*, [página web en línea], México, Organización Panamericana de la Salud, [citado 22-09-09], disponible en internet: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd65/mexico.pdf>

PEPGRM (2007), *Políticas y estrategias para la prevención y gestión integral de Residuos en México 2007*, [página web en línea], México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, [citado 20-09-09], disponible en internet: http://siscop.ine.gob.mx/novedades/politica_y_estrategias_gir.pdf

RAE (2001), *Diccionario de la Lengua Española*, [página web en línea], 22ª edición, España, Real Academia Española, 2001, disponible en internet: http://buscon.rae.es/draeI/SrvltConsulta?TIPO_BUS=3&LEMA=consumismo

Rodríguez, Nancy (2006), *Preparación y usos de la composta*, [página web en línea], Puerto Rico, Autoridad de Desperdicios Sólidos, [citado 04-02-10], disponible en internet: http://www.ads.gobierno.pr/secciones/reciclaje/composta/presentacion-preparacion_de_composta.pdf

Rugby, Maky (2009), *Comercio, residuos sólidos y vida cotidiana en la Ciudad de México en los siglos XVIII y XIX*, [página web en línea], México, Caleidoscopio histórico: formas y colores de la historia, 12/05/09, [citado 02-09-09], disponible en internet: [http://articulosdelahistoria.blogspot.com/2009/05/comercio-residuos sólidos-y -vida-cotidiana-en-la.html](http://articulosdelahistoria.blogspot.com/2009/05/comercio-residuos-solidos-y-vida-cotidiana-en-la.html)

SEDESOL (1997), *Manual para el desarrollo de rutas de recolección de Residuos Sólidos Municipales*, [página web en línea], México D.F, Human Consultores, S.A. de C.V., [citado 22-09-09], disponible en internet: http://sedesol2006.sedesol.gob.mx/subsecretarias/desarrollourbano/sancho/manuales/manuales_residuos_solidos/Diseno_Rutas_Recoleccion.pdf

SEDESOL (2010), *Manual para la rehabilitación y clausura de tiraderos a cielo abierto*, [página web en línea], México, Secretaría de Desarrollo Social, [citado 11-04-10], disponible en internet: http://www.bajacalifornia.gob.mx/spa/servicios/residuos_solidos/rehab_clausura_tiraderos.pdf



SEMARNAT (2009), *Los seis gases de efecto invernadero considerados por el protocolo de Kioto*, [página web en línea], Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, [citado 22-11-09], disponible en internet: http://www.semarnat.gob.mx/queessearnat/politica_ambiental/cambioclimatico/Documents/CICC/gasesprotocolo.html

Valderrama, Aldo (2010), *Disposición de Residuos Sólidos Urbanos en el Relleno Sanitario de la ciudad de Puno*, [página web en línea], Perú, Monografías, [citado 12-02-10], disponible en internet: <http://www.monografias.com/trabajos14/contamin-relleno/contamin-relleno.html>