

capítulo/Trece Manejo de desperdicios sólidos

Mark W. Mike
y James R. Mihelcic

En este capítulo, los lectores aprenderán sobre el manejo de desperdicios sólidos municipales. Primeramente, los tipos de desperdicio sólido, sus cantidades, composición y propiedades físicas son descritos. Después, el capítulo se direcciona hacia el almacenamiento, recolección, transportación y desecho de desperdicios sólidos, incluyendo el reciclaje y la recuperación de materiales, el compostaje, incineración y rellenos sanitarios. El capítulo concluye con una introducción a la consulta pública, política pública y estimación de costos. El énfasis se ubica en la aplicación de conceptos básicos de balance de masa para los problemas de desperdicio sólido, con una mezcla de problemas y discusiones cuantitativas de temas de manejo más amplios.

Secciones principales

- 13.1 Introducción
- 13.2 Caracterización del desperdicio sólido
- 13.3 Componentes de los sistemas de desperdicios sólidos
- 13.4 Conceptos del manejo

Objetivos de aprendizaje

1. Describir los componentes clave de un sistema de manejo de desperdicios sólidos.
2. Identificar los objetivos del manejo de desperdicios sólidos.
3. Describir la legislación estadounidense clave correspondiente en relación con desperdicios sólidos.
4. Distinguir entre desperdicio sólido municipal y otros desperdicios sólidos.
5. Calcular las tasas de generación de peso seco y húmedo para componentes de desperdicio sólido específicos a partir de los datos disponibles.
6. Comentar las diferencias entre el manejo de desperdicios sólidos en los países desarrollados y en desarrollo.
7. Explicar las cuestiones asociadas con el diseño y operación de subsistemas exitosos de desperdicio sólido (recolección, estaciones de transferencia, instalaciones de recuperación de materiales, instalaciones de compostaje, incineradores y rellenos sanitarios).
8. Resolver problemas de mezclado para determinar una proporción de C/N apropiada para la composta.
9. Calcular requerimientos de oxígeno para los procesos de tratamiento biológico aeróbicos o térmicos, así como las tasas de generación de metano de los rellenos sanitarios con datos estequiométricos y de composición de masa.
10. Explicar las preocupaciones sobre los gases y lixiviados de rellenos sanitarios y cómo son direccionados.
11. Calcular el tamaño de un área de relleno sanitario con base en la construcción celular diaria.
12. Enfatizar con los interesados de la comunidad relacionados con emplazar un relleno sanitario o incinerador, y cuidadosamente decidir cómo llegar a un consenso.
13. Identificar métodos clave de consulta pública y sus fortalezas y debilidades.
14. Identificar opciones clave de política pública para el manejo de desperdicio sólido y resumir sus fortalezas y debilidades.
15. Estimar los costos para rellenos sanitarios de diferentes tamaños con factores de economía de escala.

13.1 Introducción

Los **desperdicios sólidos** incluyen el papel y el plástico generados en casa, la ceniza producida por la industria, los desperdicios alimenticios de cafeterías, hojas y pasto cortado de los parques, desperdicios médicos de hospitales y escombros de demolición de un sitio de construcción. Estos materiales están considerados como un **desperdicio** cuando los dueños y la sociedad creen que ya no tienen valor.

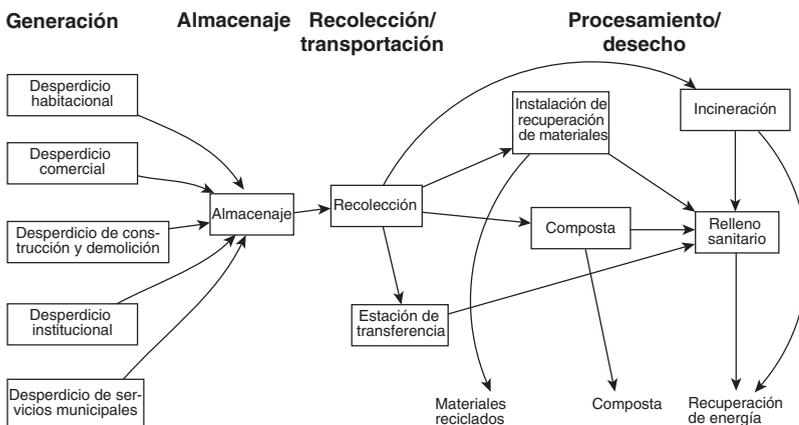
El **manejo de desperdicios sólidos** varía enormemente entre las culturas y los países y ha evolucionado a través del tiempo. Los componentes del manejo de desperdicio sólido están ilustrados en la figura 13.1. El manejo de desperdicio sólido requiere de un entendimiento de la **generación de desperdicio, almacenaje, recolección, transporte, procesamiento y desecho**. Los puntos finales en la figura 13.1 son materiales reciclados, composta y recuperación de energía; estos puntos finales se volverán más comunes a medida que la sociedad adopte prácticas más sustentables de manejo de desperdicios. Refiriéndose al capítulo 7, recuerde que el *desperdicio* es una palabra de origen humano; por lo tanto, necesita identificar maneras para minimizar la cantidad de desperdicio que se genera, transporta, procesa y desecha.

Los desperdicios sólidos difieren de los desperdicios líquidos o gaseosos debido a que no pueden ser bombeados o fluidos como los fluidos. Sin embargo, los desperdicios sólidos pueden ser puestos en formas sólidas (incluyendo tierras) y por lo tanto pueden ser contenidos más fácilmente. Estas diferencias han llevado a distintos enfoques para el manejo de desperdicios sólidos a los enfoques descritos en capítulos previos para las corrientes de desperdicios líquidos y gaseosos.

El manejo apropiado de desperdicios sólidos tiene cuatro objetivos principales:

1. Proteger la salud pública.
2. Proteger el medio ambiente (incluye la biodiversidad).
3. Direccional preocupaciones sociales (equidad, justicia ambiental, estética, riesgo, preferencias públicas, reciclaje, energía renovable).
4. Minimizar el costo.

Es una práctica común para las comunidades individuales el poner pesos variables en estos objetivos. Por lo tanto, existen muchos sistemas diferentes para manejar el desperdicio sólido.



Cero desperdicio como un principio de diseño para el siglo XXI

<http://www.sierraclub.org/committees/zerowaste/>

<http://www.zerowaste.co.nz/index.sm>

Figura 13.1 Mirada global al sistema de manejo de desperdicios sólidos. El sistema consiste del almacenaje, recolección y transportación, procesamiento y desecho. La recuperación de materiales, compostaje, reciclaje y recuperación de energía son importantes en la etapa de procesamiento y desecho.

Las comunidades preindustriales se arreglaron para que el desperdicio sólido fuera recolectado y desechado en locaciones centrales denominadas *basureros*. Algunos basureros aun se encuentran hoy en día. Por ejemplo, algunas áreas costeras a lo largo de la costa del Golfo de Florida son hogares para basureros derivados de mariscos que formaron pequeñas islas que ahora pueden ser exploradas. A medida que la población, la urbanización y el consumo aumentaron, el desperdicio sólido se hizo un mayor problema. Algunos desperdicios eran dejados en las calles y callejones, alimentando a perros, cerdos y ratas. Otros desperdicios eran remolcados fuera de la ciudad y vertidos en grandes montículos. La población creciente de las ciudades y las grandes tasas de mortalidad experimentadas en muchas partes del mundo debido a plagas, cólera y otras enfermedades infecciosas llevó a una demanda para limpiar las ciudades de desperdicio sólido. La recolección organizada, el tratamiento y el desecho de desperdicio sólido comenzó a finales de los años 1800 y fue cercanamente aunada al objetivo de mejorar la salud pública y el saneamiento. Los enfoques recientes hacia el manejo de desperdicios sólidos incluyeron el alimentar con desperdicios alimenticios a los animales de granja, quemar el desperdicio para calentar el agua de la ciudad y la creación de **vertederos** de desperdicio sólido (frecuentemente en humedales) para reclamar el suelo.

Durante los años noventa, la industrialización elevada resultó en la producción de diferentes desperdicios: más *desperdicios sólidos peligrosos*. Al mismo tiempo, las poblaciones urbanas crecientes, junto con la afluencia y el consumo creciente, elevaron la cantidad de desperdicio sólido producido. Los desperdicios sólidos no recuperados fueron colocados en instalaciones de ingeniería, los cuales eran llamados **rellenos sanitarios** o de ingeniería. La mejora de los vertederos a rellenos sanitarios de ingeniería ha sido un proceso gradual durante los pasados cien años que ha llevado a sistemas complejos y técnicamente avanzados para la protección de la salud humana y el medio ambiente.

La principal pieza de la legislación estadounidense que afecta el manejo de desperdicios sólidos es la **Ley sobre conservación y recuperación de recursos (RCRA)** de 1976. La RCRA dictaba el rastreo y manejo riguroso de desperdicios peligrosos. También hacía que los reglamentos mejoraran el diseño de rellenos sanitarios y redujeran el riesgo. Después siguió la *Ley de prevención de contaminación*.

En los pasados veinte años ha habido un énfasis elevado en **reducir, reciclar y reutilizar** (las tres R) como parte de la jerarquía de **prevención de contaminación** comentada en el capítulo 7. Numerosos reglamentos locales, estatales y nacionales han sido promulgados para incrementar el uso de las tres R. Estas iniciativas han sido motivadas por el deseo de reducir más los impactos adversos sociales y ambientales y de conservar los recursos naturales (incluyendo el agua y la energía). Al mismo tiempo, ha habido un reconocimiento aumentado sobre la importancia de la evaluación del ciclo de vida al evaluar las opciones de manejo de desperdicio sólido. De conformidad, las tendencias recientes le dan mayor importancia al enfoque integrado o basado en sistemas para el manejo de desperdicios sólidos.

13.2 Caracterización del desperdicio sólido

Los desperdicios sólidos pueden ser caracterizados por su fuente, uso original (por ejemplo, un vidrio o plástico), peligro o composición subyacente física o química. Los desperdicios que esparcen las enfermedades se denominan desperdicios **putrescibles**. Pueden esparcir enfermedad directa (como los pañales sucios) o indirectamente al proporcionar una fuente alimenticia para los

RCRA

<http://www.epa.gov/awsregs/laws/rcra.html>

vectores de enfermedades como insectos (moscas) o animales (ratas, perros, pájaros).

13.2.1 FUENTES DE DESPERDICIO SÓLIDO

Las fuentes de desperdicio sólido y los constituyentes típicos se identifican en la tabla 13.1. Algunos desperdicios sólidos (por ejemplo, los desperdicios de minas y la mayoría de los desperdicios agrícolas e industriales) son manejados por el generador del desperdicio. Las fuentes más pequeñas generalmente son manejadas conjuntamente bajo un sistema integrado. Los desperdicios sólidos manejados conjuntamente por una municipalidad son llamados **desperdicio sólido municipal (MSW)**. El enfoque de este capítulo es sobre el manejo de MSW, aunque muchos de los principios y procesos comentados también son relevantes para el manejo de desperdicios industriales, agrícolas y de minería.

Tabla / 13.1

Fuentes de desperdicio sólido y porcentaje típico que conforma el desperdicio sólido municipal			
Fuente	Ejemplos	Comentarios	Porcentaje típico de MSW
Habitacional	Viviendas unifamiliares, departamentos	Desperdicios de alimentos, desperdicios de patio/jardín, papel, plástico, vidrio, metal, desperdicios peligrosos del hogar.	30%–50%
Comercial	Tiendas, restaurantes, edificios de oficinas, moteles, refaccionarias de autos, pequeños negocios	Los mismos de arriba, pero más variables de fuente a fuente. Pequeñas cantidades de desperdicios peligrosos específicos.	30%–50%
Institucional	Escuelas, hospitales, prisiones, bases militares, asilos para la tercera edad	Los mismos de arriba; composiciones variables entre fuentes.	2%–5%
Construcción y demolición	Sitios de construcción o demolición de edificios, sitios de construcción de carreteras	Predominan concreto, metal, madera, asfalto, panel de yeso, y suciedad. Algunos desperdicios peligrosos posibles.	5%–20%
Servicios municipales	Limpieza de calles, parques y playas; arenilla y biosólidos de tratamiento de aguas y aguas residuales; desecho de autos abandonados y animales muertos	Las fuentes de desperdicio varían según las municipalidades.	1%–10%
Industrial	Manufactura ligera y pesada, grandes plantas de procesamiento de alimentos, plantas generadoras, plantas químicas	Pueden producir grandes cantidades de desperdicios relativamente homogéneos. Pueden incluir cenizas, arenas, lodos de molinos de papel, huesos de frutas, tanques de lodos.	No MSW
Agrícola	Granjas de cultivo, industrias lácteas, corrales de engorda, huertos	Residuos de alimentos echados a perder, abonos, materia de plantas no utilizada (por ejemplo, paja), desperdicios peligrosos.	No MSW
Minería	Minería de carbón, minería de uranio, minería de metal, exploración de petróleo/gas	Puede producir cantidades vastas de desperdicios sólidos que necesitan manejo especializado.	No MSW

FUENTE: Tchobanoglous et al., 1993.

13.2.2 CANTIDADES DE DESPERDICIO SÓLIDO MUNICIPAL

La tabla 13.2 proporciona las cantidades de desperdicio sólido municipal generado y manejado en Estados Unidos desde 1960 hasta 2005. Advierta cómo las tasas de generación se han elevado dramáticamente en solo un poco más de 40 años. Aunque las tasas de reciclaje aumentaron en los años noventa, durante el mismo periodo, la tasa de producción de desperdicio también se elevó continuamente. En su conjunto, los ciudadanos estadounidenses gastaron más en los años noventa, reciclaron más y desecharon más desperdicio.

La tasa de generación de 2005 de 0.75 mg por persona por año excluye los escombros de construcción y demolición y los biosólidos de las plantas de tratamiento de aguas residuales (los cuales, como se enlistó en la tabla 13.1, frecuentemente son incluidos en el desperdicio sólido manejado por una municipalidad). Como regla aproximada, una tasa de generación global para el MSW en la mayoría de los países industrializados es ahora de aproximadamente 1 mg por persona por año. Debido a que el desperdicio sólido habitacional hace de 30 a 50% del MSW, esto se convierte a una tasa de generación de desperdicio habitacional de aproximadamente 1 kg por persona por día.

La cantidad de MSW generada puede variar dentro de un año, entre las áreas urbanas y rurales, geográficamente, con los ingresos y entre países. La fracción manejada por el reciclaje, el compostaje, la incineración o los rellenos sanitarios varía aun más de conformidad con las condiciones locales. Es común leer reportes de que una ciudad o condado en particular producen más desperdicio que otros. Sin embargo, estos reportes necesitan leerse con cuidado, debido a que diferentes autoridades cuentan diferentes corrientes de desperdicio, y algunos definen desperdicio *producido* como desperdicio que permanece después del reciclaje y el compostaje. Una clave es la de entender las diferencias entre las *tasas de generación* y *tasas de descarte* (la diferencia entre ser parte de la corriente de desperdicios que es reutilizada o reciclada).

**Discusión en clase**

La EPA reporta que la cantidad de desperdicio sólido de casas en Estados Unidos típicamente se eleva en 25% entre el Día de Acción de Gracias y de Año Nuevo, de 4 millones de toneladas a 5 millones de toneladas. ¿Qué cambios específicos tecnológicos, políticos y de comportamiento humano pueden implementar los habitantes de hogares y la comunidad para reducir el volumen del desperdicio generado durante la temporada festiva?

Tabla / 13.2**Cantidades de desperdicio sólido municipal en Estados Unidos a través del tiempo**

	Mg por persona por año ¹					
	1960	1970	1980	1990	2000	2005
Generación	0.44	0.54	0.61	0.75	0.77	0.75
Reciclaje	0.03	0.04	0.06	0.11	0.17	0.18
Composta	Mala	Mala	Mala	0.01	0.05	0.06
Incineración	0.00	0.00	0.01	0.11	0.11	0.10
Relleno sanitario ²	0.42	0.50	0.54	0.52	0.43	0.41

¹ Estas cantidades excluyen los escombros de construcción y demolición y los biosólidos de las plantas de tratamiento de aguas residuales.

² Esto incluye pequeñas cantidades de desperdicio incinerado a través de la recuperación de energía y no incluye desperdicios producidos durante el reciclaje, el compostaje y la incineración (por ejemplo, cenizas).

FUENTE: EPA, 2006a.

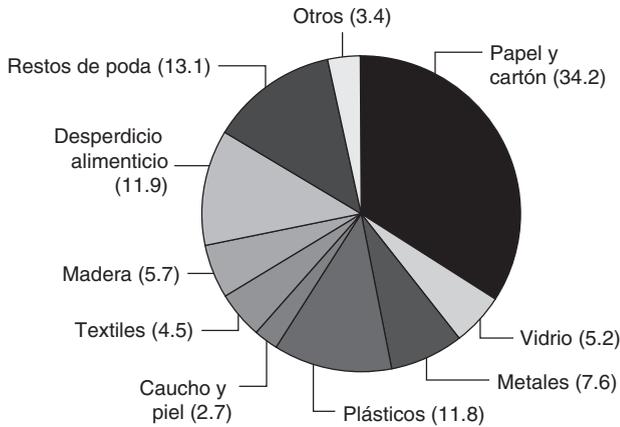


Figura 13.2 Porcentaje de varios materiales (en base de masa) que componen el desperdicio sólido municipal de Estados Unidos, 2005

Datos de EPA (2006a).

13.2.3 MATERIALES EN EL DESPERDICIO SÓLIDO MUNICIPAL

La figura 13.2 muestra el desglose de porcentajes estimados de los varios materiales encontrados en el MSW en el punto de generación. Esta información puede utilizarse para evaluar cuáles corrientes de desperdicio pueden ser destinados para programas de compostaje o de recuperación de materiales. Por ejemplo, la figura 13.2 muestra que un alto porcentaje del desperdicio global es desperdicio de poda (13.1%) y papel/cartón (34.2%). Los tipos de materiales en el MSW también han cambiado a través del tiempo. La figura 13.3 muestra este cambio durante los pasados 45 años, especialmente para materiales asociados con el embalaje (plástico y papel/cartón).



Discusión en clase

Con base en los datos mostrados en las figuras 13.2 y 13.3, ¿para qué materiales desarrollaría inmediatamente un programa de prevención de contaminación? ¿Qué desperdicios destinaría para la reducción de fuentes y cuáles destinaría para el reciclaje?

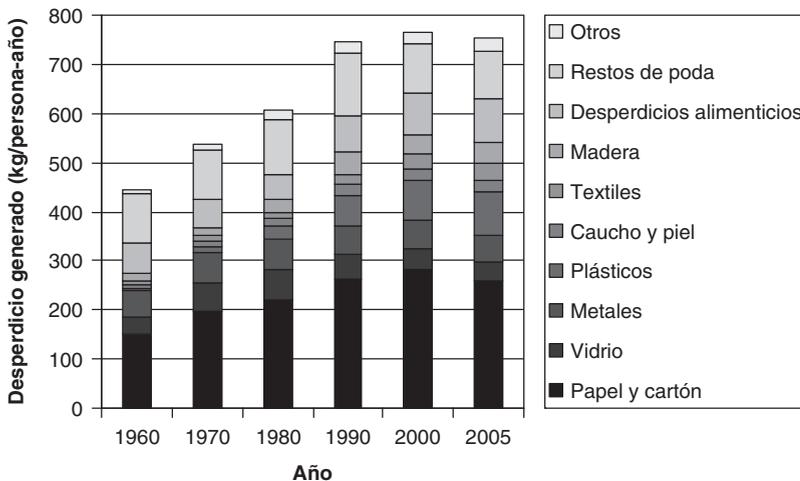


Figura 13.3 Tasa de generación de varios materiales en el desperdicio municipal sólido estadounidense, 1960-2005

Data from EPA, (2006a).

Recuadro / 13.1 Caracterización global del desperdicio sólido

El desperdicio sólido generado en los países en desarrollo es mucho menor (0.15 a 0.3 mg por persona por año) que en los países desarrollados (0.7 a 1.5 mg por persona por año). La composición del desperdicio también difiere a través del mundo como se muestra en la tabla 13.3. Las diferencias clave en la composición del desperdicio en los países en desarrollo incluyen la fracción más alta de putrescibles orgánicos y la menor fracción de productos manufacturados como papel, metales y vidrio.

Los hogares con mayores ingresos generan más material inorgánico de desperdicio de embalaje, mientras que los hogares con menores ingresos producen una mayor frac-

ción de más material orgánico al preparar los alimentos de ingredientes base. Sin embargo, algunos hogares con mayores ingresos en el mundo en desarrollo pueden generar la misma cantidad de material orgánico debido a que preparan alimentos más frescos y sin empaque. Estas diferencias tienden a reducirse a medida que los países se desarrollan en sus economías.

En combinación con menores recursos y habilidades financieras, las diferencias en la producción de desperdicio sólido significan que se requieren prácticas de manejo de desperdicios sólidos únicas en las locaciones con economías en desarrollo.

Tabla / 13.3**Composición de desperdicio sólido para cinco ciudades del mundo**

Ubicación	Desperdicio de alimentos	Papel	Metales	Vidrio	Plástico, caucho, piel	Textiles	Cerámica, polvo, cenizas, piedras	Generación (mg/persona-año)
Bangalore, India	75.2	1.5	0.1	0.2	0.9	3.1	19	0.146
Manila, Filipinas	45.5	14.5	4.9	2.7	8.6	1.3	27.5	0.146
Asunción, Paraguay	60.8	12.2	2.3	4.6	4.4	2.5	13.2	0.168
Ciudad de México, México	59.8*	11.9	1.1	3.3	3.5	0.4	20	0.248
Bogotá, Colombia	55.4*	18.3	1.6	4.6	16	3.8	0.3	0.270

* Incluye pequeñas cantidades de madera, heno y paja.

FUENTE: Diaz et al., 2003.

**Caracterización de desperdicio alrededor del mundo**

Típicamente, las **tasas de generación** de desperdicio sólido (en kg de un material específico generado por día o año) se determinan al recolectar datos para el desperdicio total generado y el porcentaje de un material específico en el desperdicio sólido. Puede ser engañoso para comparar los datos de porcentaje de descomposición entre dos diferentes meses o dos diferentes locaciones, debido a que las diferencias son propensas en la tasa total de generación de desperdicios. En su lugar, se deberían comparar las tasas de generación de desperdicio en base a kg *por año* para cada material de interés. Este punto es demostrado en el ejemplo 13.1.

13.2.4 RECOLECCIÓN DE DATOS DE CARACTERIZACIÓN DE DESPERDICIOS SÓLIDOS

La caracterización del MSW es una tarea compleja. Debido a que el desperdicio sólido varía enormemente en la composición y la cantidad dentro de una región y a través del tiempo, siempre habrá grandes incertidumbres en los estimados

ejemplo/13.1 Cálculo de tasas de generación de desperdicios sólidos

La composición de desperdicio sólido y la cantidad de desperdicio sólido generada de dos ciudades ubicadas en el mundo en desarrollo son las siguientes:

Componente	Ciudad 1	Ciudad 2
Desperdicio de alimentos (%)	47.0	65.5
Papel y cartón (%)	6.3	6.5
Ceniza (%)	36.0	10.2
Otros (%)	10.7	17.8
Tasa de generación de desperdicios (kg/persona-día)	0.38	0.28

¿Cuál ciudad genera más ceniza en una base per cápita? ¿Cuál ciudad genera más desperdicio de no ceniza en una base per cápita?

solución

Para determinar cuál ciudad produce más ceniza en una base per cápita, multiplique la tasa de generación de desperdicio global por el porcentaje del componente de interés (en este caso ceniza) en la corriente de desperdicio global:

$$\begin{aligned} \text{Ciudad 1: } & 0.38 \text{ kg/persona-día} \times \frac{36.0}{100} \\ & = 0.14 \text{ kg de desperdicio de ceniza/persona-día} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ciudad 2: } & 0.28 \text{ kg/persona-día} \times \frac{10.2}{100} \\ & = 0.03 \text{ kg de desperdicio de ceniza/persona-día} \end{aligned}$$

La ciudad 1 produce significativamente más ceniza en una base por persona.

Para encontrar la tasa de generación de desperdicio de no ceniza, primero determine el porcentaje de generación de no ceniza mediante la resta, y luego multiplique este valor por la tasa total de generación de desperdicios:

$$\begin{aligned} \text{Ciudad 1: } & 0.38 \text{ kg/persona-día} \times \frac{(100 - 36.0)}{100} \\ & = 0.24 \text{ kg de desperdicio de no ceniza/persona-día} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ciudad 2: } & 0.28 \text{ kg/persona-día} \times \frac{(100 - 10.2)}{100} \\ & = 0.25 \text{ kg de desperdicio de no ceniza/persona-día} \end{aligned}$$

Las tasas de generación de desperdicio de no ceniza son aproximadamente iguales.

ejemplo/13.1 Continuación

La mayor diferencia es que una ciudad genera mucha más ceniza que la otra. Una explicación posible es que es más común para la gente en la ciudad 1 quemar combustibles sólidos como la madera o el carbón para cocinar o calentar. Otra explicación posible es que la ciudad 2 recolecta desperdicio de cenizas junto con otros desperdicios sólidos, mientras que la ciudad 1 recolecta solo algo del desperdicio de ceniza producido. Otras razones climáticas y socioeconómicas son plausibles.

En cualquier caso, el ejemplo muestra cómo la caracterización del desperdicio es un aspecto importante de un programa de manejo de desperdicio sólido debido a que la generación y la composición de desperdicios pueden diferir dentro de un país y alrededor del mundo.

de la composición del desperdicio sólido. La generación de buenos datos ayuda con hacer decisiones de manejo apropiadas, pero la reducción de la incertidumbre en la composición estimada puede ser muy cara.

Comúnmente se utilizan tres métodos para caracterizar el desperdicio sólido:

1. *Revisión de literatura.* Este método se basa en el uso de datos pasados para caracterizar la composición de desperdicio sólido. Tiene algunas limitaciones: Las definiciones utilizadas para recolectar los datos pueden ser poco claras. Los patrones de generación de desperdicio sólido varían con el tiempo y el espacio. La mayoría de los datos históricos carecen de un análisis sobre la incertidumbre de los datos. Y la mayoría de los datos históricos carecen de un estimado conjunto de desperdicio total y porcentaje de composición.
2. *Análisis de entrada-salida.* Este método se basa en el uso de los datos sobre el consumo de materiales para calcular la generación de desperdicio. Los datos de EPA utilizados para las figuras 13.2 y 13.3 son ejemplos de este método de análisis. Este enfoque también tiene debilidades: requiere aclarar fronteras para que las importaciones y exportaciones fuera de la frontera (por ejemplo, fuera de Estados Unidos) puedan contarse. Requiere suposiciones sobre el almacenamiento y el uso consuntivo (por ejemplo, comer) de bienes comprados. Requiere suposiciones sobre desperdicios generados sin un registro económico (por ejemplo, desperdicios de poda).
3. *Encuestas por muestreo.* Este método se basa en la recolección de datos reales y métodos estadísticos para calcular promedios e incertidumbres. Muchas locaciones requieren de encuestas periódicas y un número de métodos están disponibles para ayudar en las encuestas por muestreo (ASTM, 1992; Ministerio para el Medioambiente de Nueva Zelanda, 2002). Este enfoque tiene tres debilidades: una gran variabilidad significa que un gran número de muestras son necesarias, lo cual eleva los costos. La alta variabilidad de una temporada a otra puede significar que las encuestas periódicas deben llevarse a cabo durante un año o dos antes de que se puedan obtener datos útiles. Finalmente, debido a que la incertidumbre aumenta a medida que el porcentaje se reduce, el método no es efectivo para componentes relativamente poco comunes.

13.2.5 CARACTERIZACIÓN FÍSICA/QUÍMICA DEL DESPERDICIO

La selección de una opción de manejo particular para los desperdicios sólidos depende de características físicas y químicas específicas del desperdicio. Los datos sobre las tasas de generación de desperdicio se proporcionan en términos de unidades de masa (masa/tiempo cápita) y no en unidades de volumen, debido a que la densidad de desperdicio puede variar enormemente entre los desperdicios o con el tiempo. Los estimados de **densidad de desperdicios** son importantes para que se puedan estimar los requerimientos de espacio para el desperdicio en varias etapas (por ejemplo, recolección, transportación, desecho) dentro del sistema de manejo de desperdicios.

La tabla 13.4 proporciona densidades típicas para diferentes tipos de desperdicio sólido durante las diferentes etapas de manejo de desperdicio sólido. Los grandes incrementos en la densidad que vienen con la compactación de desperdicio en un camión o relleno sanitario, y del rescate de materiales recuperados, son importantes para evaluar la economía de opciones relacionadas de manejo de desperdicios sólidos.



Recolección de desperdicio de combustible para su incineración en Japón (foto cortesía de James Mihelcic).

Tabla / 13.4

Densidades de varios desperdicios sólidos municipales y materiales recuperados

	Rango de densidad (kg/m ³)		Rango de densidad (kg/m ³)
<i>MSW mezclado</i>		Contenedores de plástico	32–48
Sueltos	90–180	Papel misceláneo	48–64
Sueltos (países en desarrollo)	250–600	Periódico	80–110
En camión compactador	300–420	Desperdicio de jardín	64–80
Después de verterlo del camión compactador	210–240	Caucho	210–260
En relleno sanitario (inicial)	480–770	Botellas de vidrio	190–300
En relleno sanitario (con sobrecarga)	700–1 100	Desperdicio de alimentos	350–400
Triturado	120–240	Latas de estaño	64–80
Embalado	480–710	<i>Materiales recuperados (densificados)</i>	
<i>Materiales recuperados (sueltos)</i>		Latas de aluminio embaladas	190–290
Combustible en polvo rechazado-derivado	420–440	Latas ferrosas en cubo	1 040–1 500
Combustible densificado rechazado-derivado	480–640	Cartón embalado	350–510
Chatarra de aluminio	220–260	Periódico embalado	370–530
Chatarra ferrosa	370–420	Papel de alto grado embalado	320–460
Cartón	16–32	Plástico PET embalado	210–300
Latas de aluminio	32–48	Plástico HDPE embalado	270–380

FUENTE: Diaz et al., 2003.

El **contenido de humedad** del desperdicio sólido se determina como sigue:

$$\text{contenido de humedad} = \frac{\text{masa de humedad}}{\text{total de masa de desperdicio}} \quad (13.1)$$

Esta definición es diferente de la base de peso seco, definición utilizada comúnmente en las aplicaciones de ingeniería geotécnica. Sin embargo, es la misma que la base de peso húmedo, definición comúnmente utilizada en las ciencias del suelo. El peso seco se puede encontrar como sigue:

$$\text{masa seca} = \text{total de masa de desperdicio} \times \frac{100 - \text{contenido de humedad (en \%)}}{100} \quad (13.2)$$

Diferentes cantidades de humedad se asocian con diferentes desperdicios sólidos y los datos son típicamente recolectados en el desperdicio sólido húmedo como *recibidos*. Este valor es entonces convertido a masa de desperdicio seco antes de que se hagan más cálculos. La tabla 13.5 proporciona valores típicos para el contenido de humedad de diferentes componentes de desperdicio sólido, junto con la información sobre el contenido de energía y la composición química elemental.

Tabla / 13.5

Características físicas/químicas comunes de los componentes de desperdicio sólido

	Humedad (% por masa húmeda)	Valor de energía recibido (MJ/kg)	Valor de energía después del secado (MJ/kg)	Carbón (% por masa seca)	Hidrógeno (% por masa seca)	Oxígeno (% por masa seca)	Nitrógeno (% por masa seca)	Azufre (% por masa seca)	Ceniza (% por masa seca)
Desperdicios de alimentos	70	4.2	13.9	48	6.4	37.6	2.6	0.4	5
Revistas	4.1	12.2	12.7	32.9	5	38.6	0.1	0.1	23.3
Papel (mezclado)	10	15.8	17.6	43.4	5.8	44.3	0.3	0.2	6
Plásticos (mezclados)	0.2	32.7	33.4	60	7.2	22.8	<0.1	<0.1	10
Textiles	10	18.5	20.5	48	6.4	40	2.2	0.2	3.2
Caucho	1.2	25.3	25.6	69.7	8.7	<0.1	<0.1	1.6	20
Piel	10	17.4	18.7	60	8	11.6	10	0.4	10
Desperdicios de poda	60	6.0	15.1	46	6	38	3.4	0.3	6.3
Madera (mezclada)	20	15.4	19.3	49.6	6	42.7	0.2	<0.1	1.5
Vidrio	2	0.2	0.2	0.5	0.1	0.4	<0.1	<0.1	99
Metales	4	0.6	0.7	4.5	0.6	4.3	<0.1	<0.1	90.6

FUENTE: Algunos datos de Tchobanoglous et al., 1993.

El diseño de sistemas para la **recuperación de energía** requiere de datos sobre el contenido del desperdicio. Similarmente, la evaluación de muchos sistemas de tratamiento de desperdicios sólidos requerirá de información sobre la composición elemental de desperdicios. Los componentes de alta energía de MSW son plástico y papel. El desperdicio de alimentos y el desperdicio de poda tienen alto contenido de humedad, lo cual limita la energía que liberan al ser quemados.

Los contenidos de humedad proporcionados en la tabla 13.5 son valores típicos. Estos valores pueden variar enormemente dependiendo de la composición específica del componente de desperdicio o los factores locales como el clima. Por ejemplo, el desperdicio de poda que se genera durante el verano podría ser predominantemente pasto, y después de la recolección en clima húmedo, el desperdicio de poda podría tener un contenido de humedad de 80%. A finales de otoño, el desperdicio de poda podría ser predominantemente hojas, y después de su recolección en clima seco, podría tener un contenido de humedad tan bajo como 20%. El contenido de humedad variable de un material de desperdicio puede afectar la evaluación de la composición global de una corriente de desperdicio (como se muestra en el ejemplo 13.2) y el cálculo del desperdicio total. Por lo tanto es preferible trabajar con la masa seca del desperdicio durante los cálculos intermedios.

ejemplo/13.2 Ajustándose para el contenido de humedad variable del desperdicio

Los desperdicios de alimentos pueden conformar una fracción importante de una corriente de sólido residual municipal. Para diseñar un sistema de recolección de desperdicio alimenticio, una municipalidad está interesada en determinar la cantidad de desperdicio alimenticio generado. El desperdicio sólido fue analizado en un día en particular cuando se encontró que la generación total de desperdicio anual era de 700 kg/ persona-año. El estudio también mostró que el desperdicio alimenticio era 20% de la masa (húmeda) total del desperdicio generado (vea la siguiente tabla). Por lo tanto, la tasa de generación de desperdicio de alimentos es de 140 kg/persona-año.

El estudio, sin embargo, no midió el contenido de humedad del desperdicio. Suponga que los datos de porcentaje de desperdicio fueron recolectados en un día seco de verano con bajo contenido de humedad. Suponga un contenido de humedad típico, calcule la tasa de generación de desperdicio de alimentos y la tasa total de generación de desperdicios.

	Porcentaje de masa total	Bajo contenido de humedad (%)	Contenido típico de humedad (%)
Desperdicio de alimentos	20	50	70
Desperdicio de papel	30	3	10
Desperdicio de poda	30	20	60
Otro desperdicio	20	2	5

solución

Primero determine la tasa de generación seca de las varias corrientes de desperdicio en un día cuando el desperdicio tiene un bajo contenido

ejemplo/13.2 Continuación

de humedad. Este valor puede ser convertido a la tasa de generación típica seca (la cual es probablemente más aplicable durante todo el año). La tasa total de generación de cada componente de la corriente de desperdicio sólido se puede calcular y tabular como se muestra en la tabla 13.6. Para calcular las condiciones en un día con un contenido de humedad típico, determine la tasa de generación seca con un contenido de humedad asumido bajo (proporcionado en la tabla que precede). Después añada la humedad típica de vuelta a la tasa de generación seca.

Las ecuaciones 13.1 y 13.2 pueden combinarse para encontrar la masa total como una función de masa seca y contenido de humedad:

$$\text{masa total} = \frac{\text{masa seca}}{100 - \text{contenido de humedad (en \%)}} \times 100$$

Los resultados del análisis se muestran en la tabla 13.6.

La tasa de generación total típica esperada de desperdicio sólido con humedad típica añadida es de 1024.1 kg/persona-año y la tasa de generación de masa húmeda de desperdicios de alimentos es de 233.3 kg/persona-año. Estos valores son significativamente más altos que los valores muestreados (proporcionados en la primera columna de la tabla 13.6) debido a que los valores muestreados fueron determinados en un día de verano relativamente seco.

Tabla / 13.6

Resultados para el ejemplo 13.2

	Tasa de generación total muestreada (kg/persona-año)	Contenido de humedad asumido (%)	Tasa de generación seca (kg/persona-año)	Contenido típico de humedad (%)	Tasa de generación total típica (kg/persona-año)
Desperdicio de alimentos	140	50	70	70	233.3
Desperdicio de papel	210	3	203.7	10	226.3
Desperdicio de poda	210	20	168	60	420.0
Otro desperdicio	140	2	137.2	5	144.4
Total	700		578.9		1024.1

13.2.6 CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS

Los desperdicios son considerados como **residuos peligrosos** cuando poseen una amenaza directa a la salud humana o al medio ambiente. Los desperdicios pueden clasificarse como peligrosos por una de seis características: inflamable, corrosivo, reactivo, tóxico, radiactivo o infeccioso. La tabla 13.7 proporciona mayor detalle sobre cada característica.

La mayoría de los países tienen leyes y reglamentos relacionados con los desperdicios peligrosos y proporcionan una definición que clasifica los

Tabla / 13.7

Métodos para clasificar un desperdicio sólido como peligroso	
Características del desperdicio	Pregunta relacionada a la característica
Inflamable	¿El desperdicio sólido puede crear un incendio (por ejemplo, desperdicios de solventes)?
Corrosivo	¿El desperdicio es muy ácido o básico y tan capaz de corroer contenedores de almacenamiento (por ejemplo, ácido de baterías)?
Reactivo	¿El desperdicio puede participar en reacciones químicas rápidas llevando a explosiones, humos tóxicos o calor excesivo (por ejemplo, litio que puede reaccionar con la explosividad del agua, explosivos, lodo con cianuro, agentes oxidantes fuertes)?
Tóxico	¿El desperdicio puede causar daño interno a una persona u organismo (por ejemplo, venenos que provocan muerte o ceguera, carcinógenos)?
Radiactivo	¿El desperdicio puede liberar partículas subatómicas que pueden provocar efectos tóxicos (por ejemplo, algunos desperdicios médicos y de laboratorios, desperdicios asociados con la producción de energía nuclear)?
Infeccioso	¿El desperdicio puede llevar a la transmisión de enfermedades (por ejemplo, jeringas utilizadas, desperdicios médicos de hospitales)?

FUENTE: Agencia de Protección Ambiental, www.epa.gov/osw/haswaste.htm.

desperdicios particulares como legalmente peligrosos o no. En Estados Unidos, los reglamentos relevantes son promulgados bajo la RCRA y se enfocan en principio en los grandes generadores de desperdicios relativamente homogéneos. El manejo de desperdicios peligrosos es un tema especializado que está más allá del alcance de este libro. En el capítulo 7 se describió cómo la química y la ingeniería verdes pueden desplegarse para reducir o eliminar la producción de químicos peligrosos (y sus riesgos y desperdicios asociados).

Las pequeñas cantidades de desperdicios que exhiben las características de un residuo peligroso frecuentemente no son consideradas como residuo peligroso y son manejadas (y por lo tanto desechadas) junto con el desperdicio municipal. La tabla 13.8 enlista los productos peligrosos de uso casero comunes. El almacenamiento y uso de estos productos en el hogar es una preocupación (especialmente debido a los malos ambientes del aire interno). Muchas municipalidades proporcionan programas de desperdicios caseros peligrosos que educan a los consumidores en el uso de alternativas verdes (visite la página www.care2.com/greenliving/) mientras que también recolectan los desperdicios caseros peligrosos.

Los lectores deben considerar el impacto de sus compras al medio ambiente. Para los grados variantes, los desperdicios de productos caseros peligrosos incrementarán los impactos ambientales en ecosistemas y en las plantas de tratamiento de aguas residuales, las instalaciones de recuperación de materiales, las instalaciones de compostaje, los rellenos sanitarios y las instalaciones de desperdicio a energía. En adición, el uso de estos artículos en el hogar o lugar de trabajo presenta un riesgo ambiental para los seres humanos que ocupan los edificios. Como se explorará en el capítulo 14, el especificar y utilizar los productos y equipos de limpieza degradables y no tóxicos reduce las emisiones y los costos de operación y mantenimiento, y mejora la calidad del aire interior y la productividad del ocupante.

¿Es un desperdicio no peligroso o peligroso?

<http://www.epa.gov/osw/>



Discusión en clase

¿Qué alternativas verdes podría utilizar en su casa o departamento para eliminar el uso de desperdicios caseros peligrosos enlistados en la tabla 13.8? ¿Cómo podría comunicar efectivamente esta información al público como un ingeniero empleado por la municipalidad local?

Ley de prevención de contaminación

<http://www.epa.gov/oppt/p2home/pubs/laws.htm>

Tabla / 13.8

Productos peligrosos comunes encontrados en el hogar

Producto	Preocupación
<i>Productos de limpieza para el hogar</i>	
Limpiadores de hornos	Corrosivo
Limpiadores de drenaje	Corrosivo
Cloro, ácidos de albercas	Corrosivo
Blanqueador de cloro	Corrosivo
<i>Productos automotores</i>	
Aceite de motor	Inflamable
Anticongelante	Tóxico
Baterías de autos	Corrosivo
Líquidos de transmisión y frenos	Inflamable
<i>Productos para césped y jardín</i>	
Herbicidas, insecticidas	Tóxico
Preservativos de madera	Tóxico
<i>Pesticidas de interiores</i>	
Repelentes de mosquitos y champúes	Tóxico
Repelentes de polilla	Tóxico
Venenos para ratones y ratas	Tóxico
<i>Mantenimiento del hogar/pasatiempos</i>	
Pinturas de aceite o con base de esmalte	Inflamable
Solventes de pintura y disolvente (tiner)	Inflamable

FUENTE: Adaptado de la Agencia de Protección Ambiental (www.epa.gov/msw/hhw-list.htm) y Tchobanoglous et al., *Integrated Solid Waste Management*, 1993, derechos reservados McGraw-Hill.

Recuadro / 13.2 Manejo de desperdicios sólidos en el mundo en desarrollo: estudio del caso de Mali, África del Oeste

El manejo apropiado de desperdicios sólidos es importante en todas partes del mundo.* Los componentes del manejo de desperdicio sólido pueden verse un poco diferentes. Aquí se explora el manejo de desperdicios sólidos en un vecindario de la ciudad de Sikasso (Mali) que tiene una población de aproximadamente 150 000. La figura 13.4 proporciona una mirada global de los componentes.

Almacenamiento en sitio

Las mujeres barren sus pequeñas tiendas y casas cada mañana y tarde y ponen el desperdicio en un bote de basura o esquina. Los residentes pueden comprar un bote de basura hecho de tambos de metal a la mitad, el cual tiene orificios en las paredes. El desperdicio sólido habitacional consiste principalmente de papel, orgánicos (polvo, hojas) y algo de plástico. También hay desperdicio sólido significativo generado en los mercados, especialmente orgánicos y cartón.

Recolección

Típicamente, la recolección de desperdicio sólido comienza con organizaciones privadas que recolectan el desperdicio sólido.

Transporte y transferencia

Si su hogar tiene una cuenta con la organización de recolección, un hombre con un carro tirado por burros vendrá a su concesión/casa cada día, vaciará su bote de basura y llevará el desperdicio a un área de recolección en la periferia de la ciudad. No vaciarán su basura sin un bote de basura. Aquellos sin botes de basura y acuerdos les pedirán a los niños que se lleven la basura a las áreas de recolección. En algunos casos, la organización de recolección principal o privada tiene un gran camión y tractor y puede transferir grandes pilas de basura de las áreas centrales a un área de recolección. En Sikasso existen diez áreas de recolección en la periferia.

Recuadro / 13.2 Continuación

Procesamiento

Las personas que hurgan en la basura especialmente los niños, que viven cerca de las áreas de recolección pueden recoger de entre el desperdicio sólido antes de que el equipo de recolección llegue para llevarse la basura fuera de la ciudad. Algunos residentes pueden quemar la basura ocasionalmente si la pila se vuelve demasiado grande.

Desecho

Después, el desperdicio sólido es quemado o llevado de la periferia a áreas rurales. Puede ser esparcida sobre los campos en barbecho como composta. Actualmente, no existen rellenos sanitarios oficiales para desecho, pero están pendientes los planes de construcción.

Reducción de fuente, reciclaje, compostaje

Gran parte de la basura es orgánica. La gente reutiliza las latas, bolsas y otros plásticos y metales siempre que puede. Éstos

pueden utilizarse para contenedores en la reventa de productos (por ejemplo, jugo, especias) o reciclados en juguetes y artes (por ejemplo, latas metálicas de leche hechas camiones de juguete).

Vectores de enfermedad

Las ratas, los ratones, los gusanos, las cucarachas y los mosquitos pueden encontrarse en las áreas de recolección. Aquellos que viven en la proximidad de esas zonas pueden experimentar riesgos elevados a la salud. Mucha gente alrededor del mundo aun no entiende la conexión entre estos vectores y las enfermedades diarreicas o la malaria.

Consideraciones culturales

Los hombres y las mujeres consideran la transportación y la quema de desperdicios sólidos como trabajo de niños, a menos que tengan una cuenta con la organización de recolección.

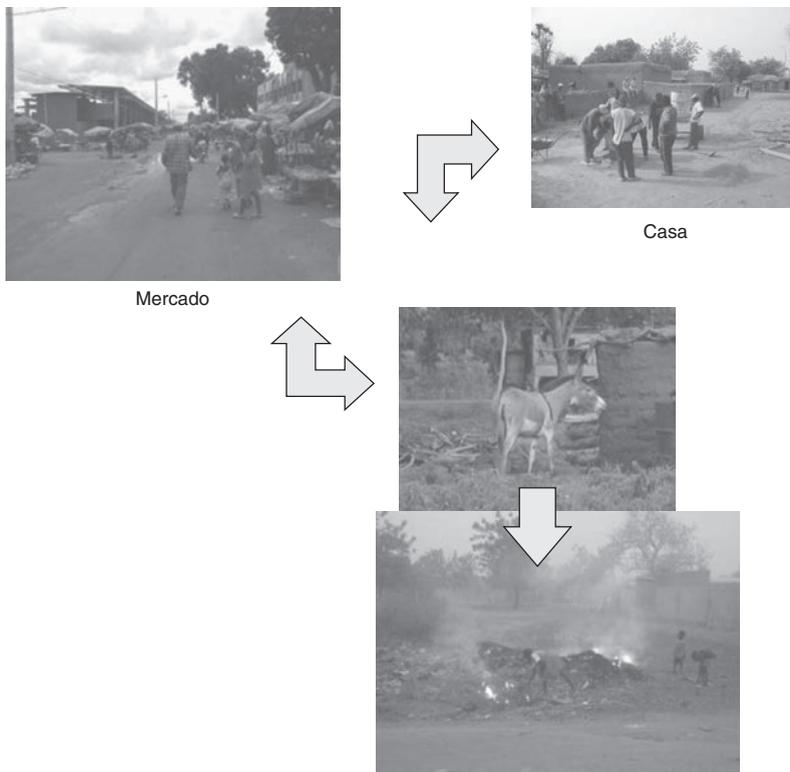


Figura 13.4 Manejo de desperdicio sólido en la ciudad de Sikasso, Mali (población aproximada de 150 000)

*Este estudio de caso es cortesía de Brooke Ahrens. Fotos cortesía de Brooke Ahrens y Jennifer McConville.

13.3 Componentes de los sistemas de desperdicios sólidos

Recuerde de la figura 13.1 que un sistema de desperdicios sólidos comprende la generación de desperdicio, el almacenamiento, la recolección y la transportación, y el procesamiento y desecho. En esta sección cada responsabilidad se considera en mayor detalle comenzando con el almacenamiento, la recolección y la transportación.

13.3.1 ALMACENAMIENTO, RECOLECCIÓN Y TRANSPORTACIÓN

El almacenamiento, la recolección y la transportación de desperdicio sólido municipal típicamente abarcan 40 a 80% del costo total de manejo de desperdicio sólido. Necesitan ser consideradas tres preguntas al diseñar un sistema de almacenamiento, recolección y transportación:

1. ¿Qué desperdicios se deben recolectar del generador y cuáles debe el generador transportar hacia una instalación de procesamiento?
2. ¿Hasta qué extensión debería pedírsele a los generadores separar el desperdicio recolectados en diferentes fracciones?
3. ¿El desperdicio debería ser transportado directamente a una instalación de tratamiento/desecho, o los vehículos de recolección deberían transferir desperdicios primero hacia un vehículo más eficiente?

Estas preguntas no se pueden considerar independientemente. Por ejemplo, una comunidad podría estar considerando si tener una recolección de periódicos de casa en casa contra un sistema en el que el periódico es tirado en centros de reciclaje. Si el periódico se recolecta de casa en casa, se requerirá un sistema apropiado para que los hogares recolecten y entreguen los periódicos en la orilla de la acera para su recolección. Es necesaria una evaluación sobre si se debería utilizar un vehículo por separado para recolectar los periódicos o si se podría utilizar la recolección existente para los productos reciclados o el desperdicio general. Si se utiliza un vehículo separado para la recolección del periódico, podría ser más eficiente que aquellos camiones conduzcan directamente hacia un área de almacenamiento de descarga para el embarque del desperdicio de papel. Sin embargo, si se utiliza el mismo camión para la recolección de periódicos y de desperdicio general, puede ser más eficiente que el camión viaje hacia una estación de transferencia en donde se separa el periódico y se envía en un vehículo especial al muelle, mientras que el desperdicio general es llevado a un relleno sanitario.

Las opciones comunes disponibles para los problemas de almacenamiento, recolección y transportación relacionados pueden utilizarse para divisar soluciones creativas y sustentables. La figura 13.5 proporciona ejemplos de vehículos y contenedores utilizados para la recolección, el almacenamiento y el transporte de componentes específicos de desperdicio sólido municipal.

Para el MSW habitacional, el método de recolección más común es el de la acera. Se les pide a los residentes que separen los desperdicios en varios tipos (por ejemplo, reciclables, desperdicio orgánico y desperdicio general) utilizando diferentes contenedores o bolsas, los cuales se colocan en la acera para su recolección. La recolección la realizan uno o más camiones. El número de trabajadores por camión varía entre las comunidades, con algunos camiones operados por una sola persona y los residentes utilizando grandes botes con ruedas para el almacenamiento de desperdicios. Algunas comunidades utilizan sistemas de recolección que pesan los botes (o carga por bolsa) y por lo tanto cargan el generador de conformidad. Para la recolección de desperdicio habitacional, el costo aumenta más rápidamente con el número de paradas, el número de trabajadores



a) Este vehículo de carga frontal es comúnmente utilizado para la recolección comercial.

(Foto cortesía de Heil Environmental)



b) Este vehículo de carga lateral es comúnmente utilizado para la recolección habitacional.

(Foto cortesía de Heil Environmental)



c) El vehículo de carga trasera se utiliza para la recolección habitacional.

(Foto cortesía de Heil Environmental)



d) Esta es una barredora de calles y senderos.

(Foto cortesía de Hako-Werke GmbH)



e) Este depósito ofrece los medios para reciclables en una distrito de compras.

(Foto cortesía de Glasdon UK Ltd.)

Figura 13.5 Dispositivos para ayudar a la recolección, almacenamiento y transportación de desperdicios sólidos



Almacenamiento de desperdicio sólido en Fiji

(Foto cortesía de James Mihelcic)



Recicle su teléfono celular

© Bakaleev Aleksey/iStockphoto

y el número total de camiones en servicio. Estos factores han influenciado los sistemas de recolección para que ahora típicamente utilicen grandes contenedores de desperdicios para los residentes, más camiones multusos, mayor densidad de desperdicio por camión y menos trabajadores por camión.

Los generadores de desperdicios comerciales e institucionales típicamente utilizan contenedores de almacenamiento más grandes y tienen un sistema separado para la recolección de desperdicios. El sistema utiliza vehículos específicamente diseñados para la recolección de grandes cantidades de desperdicio por parada. Los edificios comerciales o habitacionales de gran altura son un caso especial. Muchos tienen sistemas especializados para transportar el desperdicio hacia el fondo del edificio para su almacenamiento y compactación previo a la recolección.

Las estaciones de depósito para los reciclables son otra parte valiosa de un sistema de recolección de MSW. Éstas se pueden diseñar para que las utilicen personas que están caminando o andan en bicicleta, así como manejando sus vehículos personales o que utilizan el transporte público compartido. Los sistemas de depósito también pueden ser utilizados para el desperdicio general en las áreas rurales sin recolección de puerta en puerta. En donde el acceso vehicular sería inapropiado o difícil (digamos, en una ciudad muy vieja o una zona turística), los sistemas neumáticos pueden utilizarse para transmitir desperdicios mediante vacío hacia afuera del núcleo urbano.

Las **estaciones de transferencia** se utilizan en ciudades y pueblos más grandes para reducir los costos asociados con la transportación. También se han vuelto comunes debido al movimiento hacia los sitios de desecho regional (contra los muchos sitios de desecho locales que existieron hace varias décadas). Los camiones de recolección son vehículos especializados y se utilizan con más eficiencia para recolectar, en vez de transportar, el desperdicio. Mientras que un camión de recolección típico puede cargar de 4 a 7 Mg de MSW, un camión más grande que utiliza compactación más eficiente puede cargar de 10 a 20 Mg de MSW. Las estaciones se pueden utilizar también para transferir contenedores de desperdicio que son enviados por tierra o mar. Con los aumentos en la distancia a los sitios de tratamiento de desperdicios y desecho y la cantidad de desperdicio generada, las estaciones de transferencia urbana generalmente se vuelven más económicas.

13.3.2 RECICLAJE Y RECUPERACIÓN DE MATERIALES

El reciclaje requiere de la separación de materiales y la eliminación de desperdicios de baja calidad. Los sistemas exitosos de reciclaje utilizan una mezcla de separación en la fuente por el generador de desperdicios, por la maquinaria en una locación central y por gente entrenada en una locación central. Los sistemas exitosos de reciclaje requieren una consideración cuidadosa de costos involucrados y de los mercados para los productos reciclados. Diversos tipos de **instalaciones de recuperación de materiales (MRF)** se pueden utilizar con alguna especialización en el procesamiento de desperdicios recolectados por separado (vea la figura 13.6).

La expansión en el reciclaje requiere del desarrollo de nuevos mercados. De otra manera, el exceso de provisión sobre la demanda llevará a la reducción en el valor de los materiales recuperados, hasta el punto que más recursos se utilizan para recuperar los materiales que los que se salvan por la recuperación. En algunos casos, puede darse el reciclaje adicional al distribuir la información entre los tenedores de desperdicios y los usuarios potenciales. Los sistemas de intercambio de desperdicio pueden ser operados para ayudar a un pequeño negocio (o dueño de casa) a resolver un problema de desperdicios mientras que otro encuentra un ingreso valioso.

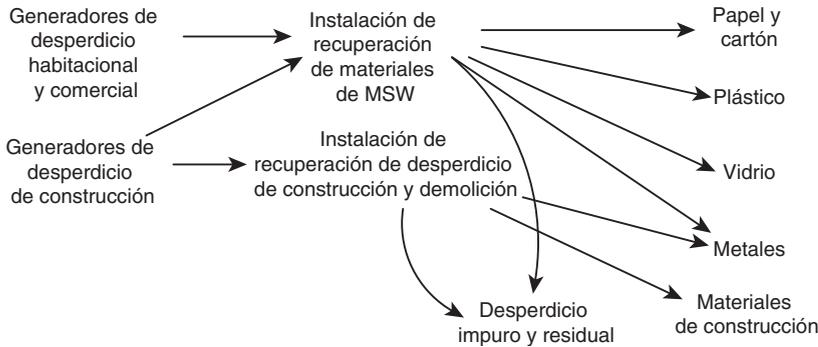


Figura 13.6 Sistemas de reciclaje: generadores de desperdicio, instalaciones de recuperación de materiales y mercados para los materiales recuperados

Advierta que en los programas de reciclaje, el control de impurezas puede ser crítico. Por ejemplo, una pequeña cantidad de cerámica en el vidrio puede hacer al vidrio impráctico para su reciclaje. El limitar el número de impurezas requiere una comunicación extensiva y en marcha con los generadores de desperdicio, ya sean niños, adultos, dueños de negocios o líderes comunitarios.

TIPOS DE MATERIALES RECUPERADOS O RECICLADOS El reciclaje de plásticos es un reto en parte porque la industria de plásticos ha desarrollado y puesto en los mercados muchos tipos únicos de plásticos que no son necesariamente compatibles cuando son reciclados. Para ayudar con el reciclaje de plásticos, un código de resinas internacionales está marcado en la mayoría de los productos consumidores de plástico (vea la tabla 13.9). Los plásticos más comúnmente recuperados son el tereftalato de polietileno (PET) (tipo 1) y el polietileno de alta densidad (HDPE) (tipo 2). A medida que la sociedad se aparta del uso de recursos no renovables

Tabla / 13.9

Tipos de plásticos encontrados en los productos comerciales con códigos de resina utilizados para ayudar en la recuperación		
Código de resina	Material	Aplicaciones de muestra
1	Tereftalato de polietileno (PET)	Botellas de plástico para refrescos; envases de alimentos
2	Polietileno de alta densidad (HDPE)	Botellas para leche; bolsas para comestibles
3	Cloruro de polivinilo	Envases tipo blister; bolsas para la ropa de cama, tuberías
4	Polietileno de baja densidad	Bolsas para lavado en seco y alimentos congelados
5	Polipropileno	Contenedores de yogurt, comidas para llevar
6	Poliestireno	Platos y vasos; empaque de muebles y electrónicos
7	Otros plásticos	Empaques personalizados

como los plásticos de petróleo, habrá mayor uso de biomateriales para los productos de empaque.

El papel recuperado es típicamente transformado de vuelta a nuevos productos de papel. El papel de desperdicio es de mayor valor cuando las fibras de papel son más largas y hay menos impurezas. Las revistas lustrosas actualmente tienen un valor menor que el papel de oficina debido a que usan minerales que proporcionan el lustre al papel. El papel previamente reciclado pierde su valor debido a que el proceso de reciclaje acorta las fibras.

Debido al gran requerimiento de energía para procesar el mineral de aluminio, el aluminio es típicamente de gran valor por peso de unidad de material recuperado. Los materiales ferrosos (hierro, acero) han sido recuperados por procesadores de chatarra de metal durante muchas décadas. Con un mercado desarrollado para el metal ferroso de desperdicio, ahora es común la recuperación de los metales ferrosos de aplicaciones, vehículos, equipo, latas y escombros de demolición.

El sistema para convertir el vidrio de desperdicio, llamado cullet, en vidrio nuevo está bien desarrollado. Sin embargo, el gran costo de transportación hacia un fundidor de vidrio puede hacer impráctico el convertir de vuelta el vidrio de desperdicio a vidrio nuevo. Como resultado, nuevos mercados están en desarrollo para este material.

Los **escombros de construcción y demolición** incluyen metal, madera, piedra y concreto. Algunos materiales de construcción (por ejemplo, tejas y accesorios) se pueden reutilizar, mientras que otros se procesan para usos nuevos. La piedra triturada y el concreto pueden convertirse en agregados para concreto nuevo o para otros propósitos de complemento de construcción (vea el capítulo 14).

SEPARACIÓN DE MATERIALES Una amplia variedad de equipo mecánico está disponible para la separación de materiales de desperdicio. Los magnetos pueden separar los metales ferrosos, pero sólo después de que cualquier bolsa ha sido abierta y el desperdicio ha sido colocado en transportadores. Para separar los papeles y el plástico, la maquinaria puede explotar la menor densidad y mayor tamaño de estos materiales. Los métodos pueden involucrar filtros, mesas sacudidoras inclinadas tipo tamiz, ráfagas de aire y tamices de rotación llamados cribas. En algunos casos, los desperdicios de papel y plástico son separados de otros materiales de baja energía y luego puestos en un estado mezclado para ser utilizados como una fuente de combustible. La mezcla de papel/plástico se denomina **combustible derivado de residuos (RDF)** y puede ser triturado y luego comprimido para reducir los costos de transportación. Las técnicas mecanizadas también están disponibles para separar el aluminio de otros materiales y para distinguir varios colores de vidrio.

En muchas situaciones, las personas son empleadas para ayudar en la separación de materiales de desperdicio. En algunos casos, la gente asegura que se

E-cycle sus desperdicios electrónicos

<http://www.epa.gov/epawaste/conservation/materials/ecycling/index.htm>

Recuadro / 13.3 El papel de la basura en el mundo en desarrollo

En los países en desarrollo es común para los *basureros*, el sector *informal*, participar en actividades de manejo de desperdicios sólidos. Esto es debido principalmente a servicios municipales inadecuados, los cuales crean una gran necesidad para la recolección informal de desperdicio y una oportunidad de ingresos entre los pobres. Medina (2002), escribe:

Cuando la basura es soportada –finalizando la explotación y la discriminación– ésta representa una ilustración perfecta del desarrollo sustentable que puede ser logrado en el Tercer Mundo: se crean empleos, se reduce la pobreza, se disminuyen los costos de materias primas para la industria (al mismo tiempo que aumenta la competitividad), se conservan los recursos, se reduce la contaminación y se protege al medio ambiente.

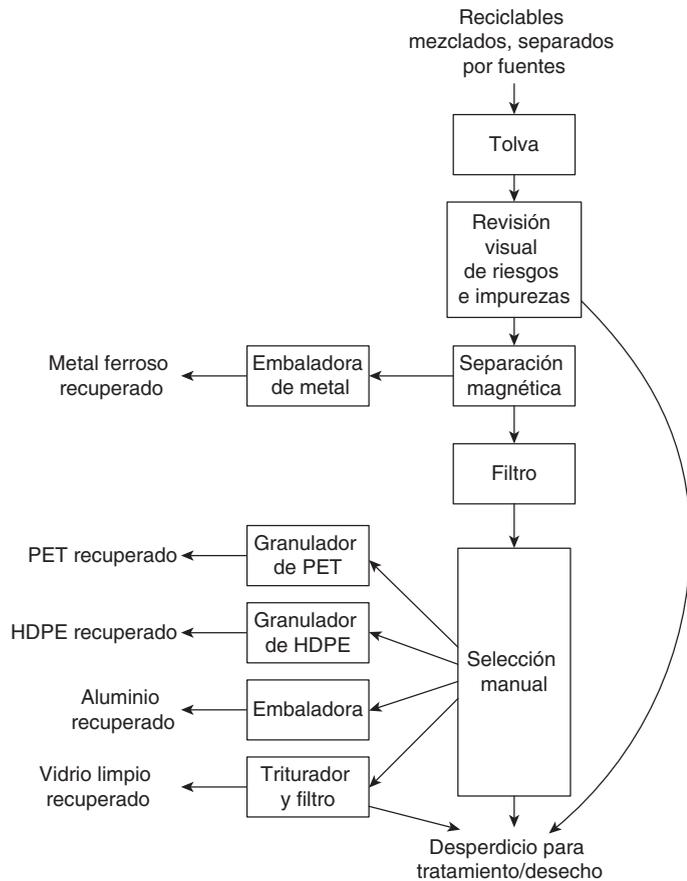


Figura 13.7 Diagrama de flujo de proceso para una instalación de recuperación de materiales Esta instalación está diseñada para procesar plásticos PET y HDPE, metal y latas de aluminio y vidrios limpios separados por fuente.

producen materiales de recuperación de alta calidad. En otros casos, el personal recoge desperdicios específicos de un transportador y los coloca en contenedores separados. La salud y la seguridad de los trabajadores es obviamente una preocupación primaria en los MRF.

El diseño de una MRF es difícil y se valoran los enfoques creativos. Los materiales separados necesitan ser comprimidos para su transportación y almacenados con seguridad. Un diagrama de flujo de proceso típico para un MRF se muestra en la figura 13.7. El diseño de MRF necesita manejar materiales de desperdicio que llegan en cantidades variables, así como adaptarse a mercados que varían en el precio pagado por materiales procesados.

13.3.3 COMPOSTAJE

El **compostaje** es un proceso microbiano que trata los desperdicios biodegradables. Las reacciones son similares a aquellas empleadas en el tratamiento aeróbico de aguas residuales (comentado en el capítulo 11). Los desperdicios son procesados a un tamaño adecuado, se añade agua, se permite que entre el aire para transferir oxígeno hacia la pila de desperdicio y el desperdicio es mezclado para asegurar una degradación equitativa. Los microorganismos alimentados hacia la materia orgánica en el desperdicio producen dióxido de carbono y dejan atrás un sólido (llamado *composta*) que puede aplicarse al

Tabla / 13.10

Tipos más comunes de sistema de compostaje

Tipo de sistema	Tamaño de partículas	Tipos de desperdicio	Frecuencia de mezclado	Tiempo para obtener la composta
Hileras	5–20 mm	Poda mixta	Una vez por semana	2–4 meses
En depósito	5–20 mm	Poda y comida	Por hora	1–2 meses

suelo. Las dos aplicaciones más comunes de la composta son para: 1) desperdicios industriales/agrícolas como el desperdicio de madera, el desperdicio de procesamiento de peces y los sólidos generados en una planta municipal de tratamiento de aguas residuales y, 2) MSW separado por fuentes como los desperdicios de poda recolectados separadamente o una mezcla de desperdicios de poda y alimentos recolectados por separado.

El compostaje tiene diversos objetivos: 1) reducir la masa del desperdicio a manejarse, 2) reducir el potencial de contaminación, 3) destruir cualquier patógeno y, 4) producir un producto que pueda ser puesto en el mercado o usado por la comunidad local.

La tabla 13.10 proporciona algún detalle de los dos tipos más comunes de sistemas de compostaje en uso: hileras y en depósito. La figura 13.8 ilustra cada uno de ellos. Una **hilera** es una pila trapezoidal de materia orgánica procesada dejada al aire libre. Debe ser volteada ocasionalmente para asegurar que toda la materia orgánica pase tiempo dentro de la pila, en donde la temperatura y el contenido de humedad son ideales para la descomposición. Un sistema **en depósito** mantiene la materia orgánica procesada en un gran contenedor. Aunque la construcción de este proceso es más cara, permite un control más preciso, maneja más fácilmente las emisiones de aire y produce la composta más rápido.

La producción de composta requiere mantenimiento de temperaturas por arriba de los 40° C durante varios días o más. El proporcionar las condiciones apropiadas para el crecimiento aeróbico lleva a la rápida liberación de energía en forma de calor, y los sistemas de composta comúnmente



a) Hileras

(Foto proporcionada por el doctor Ian Mason, Universidad de Canterbury)



b) Sistema en depósito

(Foto proporcionada por Robert Rynk)

Figura 13.8 Dos sistemas de compostaje

Tabla / 13.11

Contenido de nutrientes de varios materiales utilizados en el compostaje Composting systems perform best when the carbon-to-nitrogen ratio is optimized in the range of 20–40 (C:N of 20:1 to 40:1).

Material	Nitrógeno (% de masa seca)	Proporción C:N (base de masa seca)
Orina	15–18	0.8
Heces humanas	5.5–6.5	6–10
Estiércol de vaca	1.7–2	18
Pollinaza	5–6.3	15
Estiércol de caballo	1.2–2.3	25
Lodo activado	5	6
Desperdicios de vegetales no legumbres	2.5–4.0	11–12
Hojas y tallos de papas	1.5	25
Paja de trigo	0.3–0.5	130–150
Paja de avena	1.1	48
Recortes de césped	2.4–6.0	12–15
Hojas frescas	0.5–1.0	41
Aserrín	0.1	200–500
Desperdicios de alimentos	3.2	16
Papel mezclado	0.19	230
Desperdicios de poda	2.0	23

FUENTE: Haug, 1993.

pueden alcanzar temperaturas de 70° C durante cortos periodos. La alta temperatura asegura la destrucción de patógenos y semillas indeseadas y lleva a una producción más rápida del producto final. El proceso se controla por contenido de nutrientes (especialmente nitrógeno), pH, contenido de humedad y contenido del aire.

El contenido de nutrientes es comúnmente expresado como **proporción de carbono a nitrógeno** en una base de peso seco (proporción C:N). Esta proporción debe estar en un rango de 20 a 40 (20:1 a 40:1) para los materiales que entran a un proceso de compostaje. La tabla 13.11 enlista el contenido de nitrógeno y la proporción C:N para una variedad de materiales comúnmente hechos composta.

Cuando un desperdicio no es composteable per se, puede ser mezclado con otros materiales para asegurar el contenido de nutrientes apropiado, pH, contenido de humedad y porosidad del aire. El ejemplo 13.3 demuestra un cálculo típico utilizado para determinar la correcta composición del desperdicio añadido a un sistema de compostaje.



**Diseño mixto de
compostaje**

ejemplo/13.3 Determinación de los ingredientes apropiados para el compostaje exitoso

Una pollinaza tiene un contenido de humedad de 70% y tiene 6.3% de N (en una base de masa seca). El estiércol será compostado con paja de avena con un contenido de humedad de 20%. El C:N deseado para la mezcla es de 30. Con los valores de la tabla 13.11 para la composición del nitrógeno y la proporción C:N para estos dos materiales, determine el kg de paja de avena requerida por kg de estiércol para lograr la proporción de C:N deseada.

solución

Suponga 1 kg de masa seca de pollinaza húmeda. Sea X = kg de paja de avena húmeda en una base de masa seca. La masa de carbono y nitrógeno obtenida de cada material en la mezcla es:

$$\text{Masa seca de nitrógeno de la pollinaza} = 1 \times (1 - 0.7) \times 0.063 \\ = 0.0189 \text{ kg}$$

$$\text{Masa seca de carbono de la pollinaza} = 1 \times (1 - 0.7) \times 0.063 \times 15 \\ = 0.2835 \text{ kg}$$

$$\text{Masa seca de nitrógeno de la paja de avena} = X \times (1 - 0.2) \times 0.011 \text{ kg} \\ = 0.0088 \times X \text{ kg}$$

$$\text{Masa seca de carbono de la paja de avena} = X \times (1 - 0.2) \times 0.011 \times 48 \text{ kg} \\ = 0.4224 \times X \text{ kg}$$

La proporción de C:N global es

$$30 = \frac{(\text{masa de carbono de la pollinaza} + \text{masa de carbono de la paja de avena})}{(\text{masa de nitrógeno de la pollinaza} + \text{masa de carbono de la paja de avena})} \\ 30 = \frac{(0.2835 + 0.4224 \times X)}{(0.0189 + 0.0088 \times X)}$$

Al encontrar X se observa que $X = 1.8$ kg. Por lo tanto, por cada 1 kg de pollinaza, 1.8 kg de paja de avena se deben añadir para obtener una proporción de C:N óptima de 30. La razón para esto es que la pollinaza es una mejor fuente de nitrógeno y la paja de avena proporciona una mejor fuente de carbono.

El compostaje puede llevarse a cabo por particulares, por negocios particulares o por las municipalidades con grandes cantidades de desperdicio orgánico. En todos los casos, los principios son los mismos. El compostaje de jardines puede reducir los costos (y los impactos ambientales asociados) de la recolección, transportación y procesamiento y desecho de desperdicios orgánicos. Muchas municipalidades ahora proporcionan unidades de compostaje caseras gratis o subsidiadas (o granjas de gusanos) para animar a la práctica. Para ser efectivo, el compostaje casero debe tener la mezcla apropiada de materiales ricos en nitrógeno y carbono y tener el flujo de aire y humedad adecuados. Las malas prácticas de compostaje casero no lograrán las temperaturas requeridas para el tratamiento efectivo, pueden crear problemas de olor y pueden atraer animales. Las municipalidades necesitan

encontrar el balance apropiado de educación, subsidios y ejecución para lograr sistemas efectivos de compostaje de jardines.

A una mayor escala, los sistemas de compostaje deben coincidir con el producto para los mercados apropiados. Las municipalidades pueden regresar (o vender) la composta de vuelta a los residentes locales que generaron el desperdicio. Los mercados más grandes de composta incluyen parques municipales, campos de golf, viveros, paisajes, rellenos sanitarios (como material de cubierta diaria y final) y cultivadores de césped. Muchos usuarios insistirán en la falta de impurezas en la composta, y el estricto control de los desperdicios puestos en un sistema de compostaje asegurará un producto de calidad en demanda.

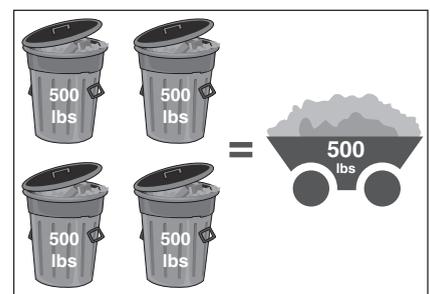
13.3.4 INCINERACIÓN

La **incineración** (también llamada **desperdicio a energía**) es un proceso de combustión en el que el oxígeno es utilizado a altas temperaturas para liberar la energía en desperdicio. En 2004 en Estados Unidos, las instalaciones de desperdicio a energía quemaron 29 millones de toneladas de MSW. En adición, 380 rellenos sanitarios de Estados Unidos ahora recuperan el metano. La incineración puede reducir la cantidad de desperdicio que se necesita desechar, generar energía para una comunidad y también reduce los costos de transportación de MSW. La incineración se hace más favorable para los desperdicios que tienen alto contenido de energía, bajo contenido de humedad y bajo contenido de cenizas. Estos desperdicios incluyen el papel, los plásticos, los textiles, el caucho, la piel y la madera (valores de energía previamente enlistados en la tabla 13.5).

La tabla 13.12 describe seis sistemas de incineración. El método más comúnmente utilizado es el de *quemada masiva de incineración*. En este proceso, el DSM no

Construya su propia cubeta de composta

<http://www.edf.org/article.cfm?ContentID=2030>



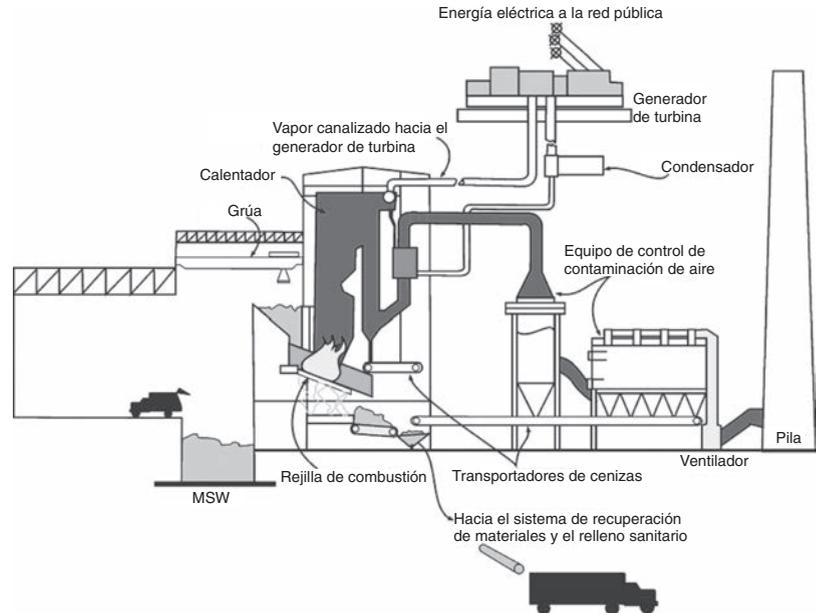
Se requieren 2 000 libras de MSW para igualar la energía de calor en 500 libras de carbón.

Tabla / 13.12

Sistemas comunes de incineración

Tipo de sistema de incineración	Explicación
Quema masiva	El desperdicio sólido municipal no segregado es puesto en combustión.
Modular	Los incineradores pequeños se enfocan en el tratamiento de corrientes específicas de desperdicios (por ejemplo, Desperdicio médico).
Combustible derivado de residuos (RDF)	Las corrientes de desperdicios ricos en energía pueden ser separadas de otros desperdicios y quemados, típicamente como un sustituto para los combustibles sólidos como el carbón, en las plantas generadoras. Los biosólidos del tratamiento de aguas residuales son este tipo de corrientes de desperdicios.
Co-incineración	Los desperdicios comerciales/industriales específicos de la postproducción como los desperdicios de madera de la construcción pueden ser puestos en combustión con los desperdicios de producción como el lodo de fábricas de papel o los biosólidos secos de las plantas de tratamiento de aguas residuales para producir energía.
Residuo peligroso	Los desperdicios orgánicos peligrosos (por ejemplo, solventes, pesticidas) pueden ser puestos en combustión para destruir los desperdicios, aunque esto requiere una atención muy fija en las emisiones de aire.
Hornos de cemento	Las fábricas de cemento pueden proporcionar condiciones apropiadas para la combustión de muchos desperdicios, incluyendo las llantas y los aceites de desperdicio, durante la producción de cemento.

Figura 13.9 Sistema de incineración de quema masiva para el tratamiento de desperdicio municipal sólido Los programas para la reducción y el reciclaje de desperdicios y la eliminación de desperdicios caseros peligrosos y metales pesados (por ejemplo, baterías) de una corriente de desperdicio pueden ser coordinados con los sistemas de incineración para minimizar el riesgo potencial asociado con los contaminantes encontrados en el gas liberado y la ceniza.



segregado es en combustión. La figura 13.9 proporciona una esquemática de un incinerador de quema masiva típico. La incineración crea dos subproductos sólidos. La *ceniza de fondo* es la fracción no quemada del desperdicio. La *ceniza volante* es la materia de partículas suspendidas en el aire en combustión y removidas por el equipo de control de contaminación del aire. Ambas cenizas tienen un número de componentes peligrosos y necesitan ser manejados con cuidado; por lo tanto, una mezcla de procesos de recuperación y rellenos sanitarios se utiliza para las cenizas.

El control de contaminación del aire es requerido para que los incineradores limiten las emisiones de partículas, metales volátiles (como el mercurio), óxidos nitrosos y productos de combustión incompleta (como las dioxinas). A finales de los años ochenta, los incineradores fueron el principal contribuyente de emisiones de dioxina en Estados Unidos, pero desde 2000, la contribución de emisiones de dioxina de los incineradores ha sido de menos de 6% del total. La quema informal en los patios de desperdicio sólido (por ejemplo, barriles de quema) es ahora la principal fuente de emisiones de dioxina en Estados Unidos (EPA, 2006b).

Suficiente oxígeno se debe proporcionar en los procesos de incineración para asegurar la combustión total. El carbono, el hidrógeno y el azufre en la corriente residual son oxidados a CO_2 , H_2O y SO_2 durante la combustión. Aunque hay algo de oxígeno presente en los desperdicios inicialmente, la mayoría de este oxígeno viene del aire. El ejemplo 13.4 muestra cómo calcular el aire requerido en la combustión.

Los sistemas de incineración frecuentemente tienen altos costos de construcción y operación. Sin embargo, los costos se pueden compensar mediante ahorros en la transportación de desperdicios hacia un sitio de desecho, requerimientos de tierra para desecho y energía recuperable. Los sistemas exitosos de incineración son aquellos en los que el desperdicio es apropiado para la incineración y se pueden encontrar las compensaciones de costos. En adición, los sistemas de incineración son complejos y requieren habilidades



Discusión en clase

¿Cómo podría guiar una junta pública en la que deben discutir sobre los cambios de comportamiento que reducirían el uso de barriles de quema en una comunidad rural? ¿Qué interesados necesitan estar presentes en dicha junta? ¿Qué acciones específicas emplearía para lograr un consenso?

Ejemplo/13.4 Requerimientos de aire para la combustión de desperdicio sólido municipal

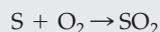
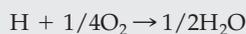
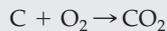
Un combustible derivado de residuos (RDF) comprende 60% de papel mezclado, 30% de plástico mezclado y 10% de textiles. Suponga que se seca antes de la combustión. Determine el volumen del aire (en L) a 20° C, 1 presión atmosférica se requiere para la combustión de 1 kg de RDF.

solución

Use valores de porcentaje de composición de desperdicio sólido de la tabla 13.5 para determinar los moles de C, H, S y O en el desperdicio. (Los pesos moleculares son 12, 1, 32 y 16 g/mol, respectivamente.) Complete una tabla para cada uno de los componentes de RDF:

	Masa seca (g)	Moles de C	Moles de H	Moles de S	Moles de O
Papel (mezclado)	600	21.7	34.8	0.038	16.6
Plástico (mezclado)	300	15.0	21.6	<0.01	4.3
Textiles	100	4.0	6.4	0.006	2.5
Total	1000	40.7	62.8	0.05	23.4

Los moles de O₂ requeridos para la combustión son determinados para cada especie molecular. Las reacciones de oxidación balanceadas son las siguientes:



De las reacciones balanceadas, 1, 1/4, y 1 mol de O₂ son requeridos por mol de carbono, hidrógeno y azufre, respectivamente. En adición, cada mol de oxígeno (O) en el desperdicio puede compensar el requerimiento a 0.5 mol de gas de O₂. Los moles globales de O₂ requeridos para incinerar el desperdicio son entonces

$$\begin{aligned} & \left[\left(40.7 \text{ moles C} \times \frac{1 \text{ mol O}_2}{\text{mol C}} \right) + \left(62.8 \text{ moles H} \times \frac{1/4 \text{ mol O}_2}{\text{mol H}} \right) \right. \\ & \left. + \left(0.05 \text{ mol S} \times \frac{1 \text{ mol O}_2}{\text{mol S}} \right) \right] - \left(23.4 \text{ moles O} \times \frac{0.5 \text{ mol O}_2}{\text{mol O}} \right) \\ & = 44.8 \text{ moles O}_2 \end{aligned}$$

Este valor de O₂ puede convertirse a litros de oxígeno, con el uso de la ley de gas ideal, después de lo cual se puede determinar el volumen del aire. Reformular la ley de gas ideal ($PV = nRT$) para encontrar V . Utilice un valor

ejemplo/13.4 Continuación

de $R = 0.082 \text{ L-atm/mol-K}$, junto con los valores de 20°C y 1 presión atmosférica:

$$V = 44.8 \text{ moles O}_2 \times 0.082 \text{ L-atm/mol-}^\circ\text{K} \times \frac{(273 + 20)^\circ\text{K}}{1 \text{ atm}}$$

$$= 1\,080 \text{ L O}_2/\text{kg}$$

Debido a que el aire es aproximadamente de 20.9% de O_2 , los litros de O_2 pueden ser convertidos a litros de aire:

$$1\,080 \text{ L O}_2/\text{kg} \times \frac{1 \text{ L de aire}}{0.209 \text{ L O}_2} = 5\,200 \text{ L de aire/kg de desperdicio}$$

avanzadas en construcción y operación. Estos dos factores provocan que los sistemas de incineración sean preferidos en regiones más económicamente avanzadas del mundo en donde los valores del suelo, los costos de energía y los costos de transportación asociados con otras alternativas son altos.

13.3.5 RELLENO SANITARIO

Los **rellenos sanitarios** son instalaciones de ingeniería diseñadas y operadas para la contención a largo plazo de desperdicios sólidos. El diseño del relleno sanitario variará según el desperdicio y la ubicación de la instalación. Con base en el tipo de desperdicio, los cuatro principales tipos de rellenos sanitarios se enlistan en la tabla 13.13 junto con los reglamentos federales relevantes según la RCRA. En los rellenos sanitarios, los desperdicios son colocados y compactados en formas sólidas, luego son cubiertos para limitar la exposición al agua y al aire. El **lixiviado** es agua que contacta los desperdicios y se vuelve un agua residual contaminada. A medida que los materiales biológicos se descomponen en los rellenos sanitarios, el oxígeno se consume, y el dióxido de carbono se produce. A través del tiempo evoluciona un medio ambiente anaeróbico que lleva a la producción de gas metano.

Tabla / 13.13

Principales tipos de rellenos sanitarios La vigilancia regulatoria depende del tipo de desperdicio.

Tipo de desperdicio	Reglamentos aplicables en Estados Unidos
Escombros de construcción y demolición	Los reglamentos de los rellenos sanitarios de escombros de construcción y de demolición se manejan a nivel estatal en Estados Unidos.
Desperdicio sólido municipal	40 C.F.R. Parte 258
Desperdicio industrial (por ejemplo, para cenizas y desperdicio de minas)	40 C.F.R. Parte 257
Residuos peligrosos	40 C.F.R. Partes 264 y 265

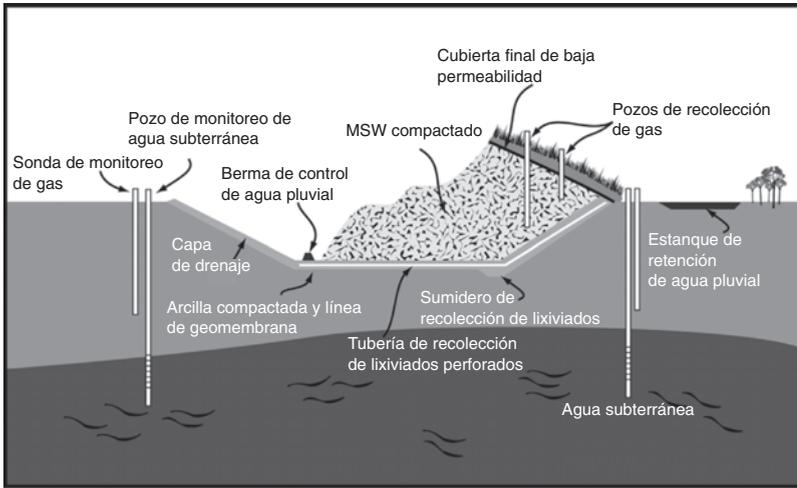


Figura 13.10 Sección transversal de un relleno sanitario moderno que muestra las barreras incorporadas en el diseño de ingeniería. Las muchas barreras ayudan a proteger al medio ambiente.

(Redibujado con permiso de la National Solid Wastes Management Association (NSWMA))

Como se muestra en la figura 13.10, los rellenos sanitarios son instalaciones técnicamente avanzadas con sistemas de protección ambiental sofisticados. Los rellenos sanitarios de protección ambiental ocurren a través de una combinación de cuatro barreras: 1) emplazamiento apropiado, 2) diseño de ingeniería que es cuidadosamente implementado durante la construcción y la operación, 3) exclusión de desperdicios inapropiados y, 4) monitoreo a corto y largo plazos.

EMPLAZAMIENTO DE RELLENOS SANITARIOS Los rellenos sanitarios necesitan estar ubicados en donde los riesgos al medio ambiente y la sociedad son bajos, por lo que aun en el caso de un mal diseño, construcción u operación, el riesgo resultante es minimizado. El negar las cuestiones asociadas con justicia social y ambiental también es crítico. La tabla 13.14 resume las locaciones que se deben evitar al considerar el emplazamiento de un relleno sanitario y otras cuestiones que necesitan ser consideradas. El emplazamiento de un relleno sanitario es una cuestión social altamente contenciosa, y el papel del ingeniero es el de proporcionar entradas y análisis de una manera equitativa.

Table / 13.14

Cuestiones a considerar al emplazar un relleno sanitario

Locación – Cuestiones específicas a evitar

- Llanuras de inundación
- Fallas geológicas activas
- Carriles propensos a deslizamientos o erosión
- Humedales y zonas intermareales
- Áreas con ecosistemas significativos y biodiversidad importante
- Áreas de relevancia cultural o arqueológica
- Cuencas de agua potable

Tabla / 13.14

(Continuación)

Otras cuestiones a considerar

- Minimice los costos de transportación de desperdicios al colocar el relleno sanitario cerca de centros de generación de desperdicios.
- Minimice los costos requeridos para la construcción de infraestructura de transportación requeridos para acceder el sitio.
- Identifique sitios menos propensos a extremos de lluvia o aire.
- Identifique sitios con tierras que puedan utilizarse durante la construcción.
- Haga coincidir el sitio potencial con un uso final del relleno sanitario que beneficiará a la comunidad local.
- Elimine las cuestiones de justicia ambiental y otras objeciones sociales para el desarrollo de un relleno sanitario.
- Busque la colocación de usuarios que pueden hacer un uso benéfico de materiales de desperdicio o energía derivada.

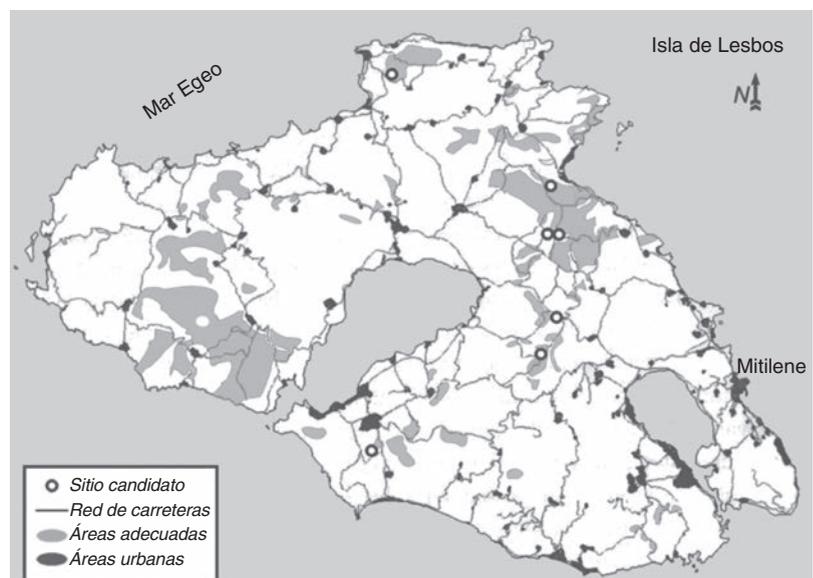
**Discusión en clase**

Comente las cuestiones de emplazamiento ambiental en términos de la distribución de igualdad de riesgo. ¿Entiende por qué muchas personas no quieren un relleno sanitario emplazado en el patio trasero? ¿Quiénes son los interesados importantes y cómo direccionaría sus preocupaciones para llegar a algún consenso?

Una herramienta común para evaluar los sitios potenciales de rellenos sanitarios es un *sistema de información geográfica (GIS)*. El GIS es un medio valioso para el procesamiento de grandes cantidades de datos y para asegurar una evaluación de todas las opciones. La figura 13.11 muestra el resultado de una evaluación de GIS de sitios potenciales de rellenos sanitarios. En este caso, la locación de infraestructura de transportación existente puede ser integrada con la ubicación de generadores de desperdicios urbanos de alto volumen y otras cuestiones de ubicación enlistadas en la tabla 13.14. El GIS también permite al ingeniero el añadir información demográfica que está relacionada con otras preocupaciones como la distribución equitativa del riesgo.

Figura 13.11 Evaluación del sistema de información gráfica de sitios potenciales de rellenos sanitarios Las áreas adecuadas están remarcadas en las áreas sombreadas en gris, las cuales pueden ser comparadas con las redes existentes de transportación y las áreas de producción de desperdicios están remarcadas en las áreas sombreadas de negro. La locación es la isla de Lesbos, en el Mar Egeo, al este de Grecia.

(Reproducido con el permiso de T. D. Kontos et. al., *Waste Management and Research*, 2003, con el permiso de Sage Publications, Ltd.)



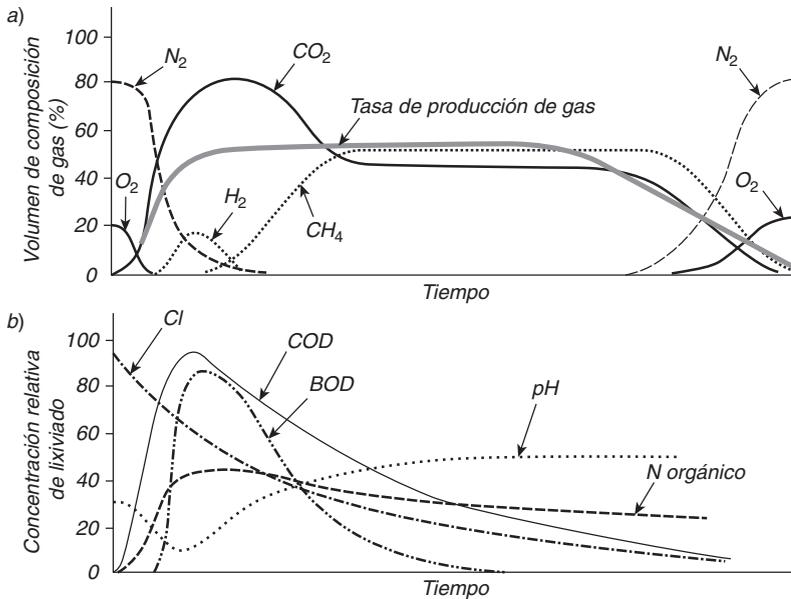


Figura 13.12 Vías típicas de descomposición de relleno sanitario

La figura *a*) muestra la composición del gas (y la producción) a través del tiempo. La figura *b*) muestra la concentración relativa de lixiviado de varios constituyentes. A medida que la tasa de producción de gas aumenta, el lixiviado se hace menos fuerte en términos de la concentración de constituyentes de lixiviados.

Adaptado de Farquhar y Rovers (1973).

DESCOMPOSICIÓN DE RELLENOS SANITARIOS Los desperdicios que son desechados en un relleno sanitario se someten a una serie de reacciones químicas y biológicas interrelacionadas. Estas reacciones determinan la cantidad y composición del gas y el lixiviado producido por el relleno sanitario, y por lo tanto determinan el manejo requerido. En términos de las reacciones biológicas que tienen lugar, un relleno sanitario es mejor visto como un proceso de descomposición de bioquímicos por lote.

La figura 13.12 ilustra la composición de gas y lixiviados a través del tiempo a medida que el desperdicio de origen biológico (por ejemplo, desperdicio de comida, desperdicio de poda, papel) se descompone. En las etapas tempranas de la descomposición (mostradas en la figura 13.12) se consume el oxígeno y se produce dióxido de carbono y ácidos orgánicos. Ambos productos reducen el pH del lixiviado. Un incremento en la demanda de oxígeno del lixiviado (medido como COD y BOD) también se observa en las etapas tempranas de la descomposición a medida que los orgánicos se convierten de una fase de partículas a una fase disuelta. En las etapas tardías, después de que todo el oxígeno es consumido y se establece un medio ambiente anaeróbico, los microorganismos convierten los ácidos orgánicos de alto BOD a gas metano. Aquí el lixiviado se vuelve menos concentrado a medida que los constituyentes disueltos se convierten a la fase gaseosa y los componentes fácilmente lixiviables del material de desperdicio se vuelven menos frecuentes. En las etapas tardías de la descomposición, el lixiviado es aun alto en resistencia y aun requerirá recolección y tratamiento.

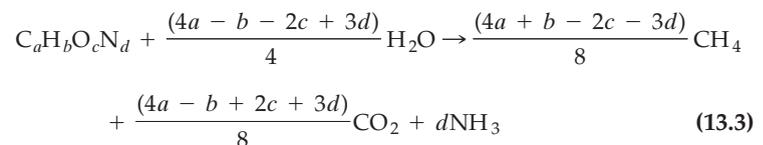
El tiempo requerido para alcanzar un estado estacionario para la producción de metano puede variar de 1 a 2 años a tanto como 2 a 20 años. La producción de metano puede no suceder nunca si las condiciones biológicas no son favorables. Las razones para esto podrían ser la presencia de químicos inhibidores de metano en la corriente de desperdicio o la infiltración del oxígeno desde una cubierta con mal diseño. Durante la producción de metano en estado estacionario, el gas es de aproximadamente 50% de metano y 50% de dióxido de carbono. Recuerde que el metano tiene 25 veces el potencial de calentamiento global de dióxido de carbono.

El lixiviado resultante típicamente tiene un BOD más alto que el agua residual doméstica y puede ser tan peligroso como muchos desperdicios industriales. Las concentraciones de constituyentes en el lixiviado dependen enormemente del tipo de desperdicio situado en el relleno sanitario. La exclusión de desperdicios peligrosos de los rellenos sanitarios mejora la probabilidad de producción biológica apropiada de metano al mismo tiempo que limita el peligro asociado con el lixiviado de relleno sanitario. La producción estacionaria de metano es importante en términos de calidad de lixiviado, ya que la producción de metano reduce el riesgo de lixiviado debido a que los componentes orgánicos disueltos del lixiviado (medidos como COD o BOD) se convierten en metano gaseoso.

GAS DE RELLENO SANITARIO La producción de gas de relleno sanitario es mejor vista como un problema y como una oportunidad. Primero, considere las razones por las que es un problema: 1) puede ser explosivo al mezclarse con el oxígeno. 2) Puede ser una preocupación de salud humana para los trabajadores del sitio. 3) Puede crear olores. 4) Puede desplazar el oxígeno en tierras, lo cual puede sofocar las plantas cercanas. 5) Puede emitir metano hacia la atmósfera lo cual contribuye a **emisiones de gas de invernadero**.

La principal razón por la que el gas de relleno sanitario es una oportunidad es que tiene el potencial de producir una forma económica no derivada de combustible fósil de electricidad. En el capítulo 2, la tabla 2.4 mostró que tan sólo en Estados Unidos las emisiones de CH_4 de los rellenos sanitarios eran de 140.9 Tg equivalentes de CO_2 en el año 2004. En el capítulo 11 (recuadro 11.4) se comentó cómo el Distrito de Saneamiento del Condado de Los Ángeles actualmente obtiene 63 MW de electricidad del gas de relleno sanitario.

La cantidad total de **metano** que se puede producir variará dependiendo de la cantidad de material biodegradable y la idoneidad de las condiciones del relleno sanitario para la producción de metano biológico. Los valores típicos son de 100 L de CH_4 producidos por kg de MSW en el relleno sanitario. La cantidad máxima de metano producido puede ser calculada a partir de la estequiometría de la descomposición del desperdicio:



en donde a , b , c y d son coeficientes estequiométricos para un químico orgánico específico. La cantidad actual de metano producido puede ser de sólo 10 a 50% de la cantidad máxima calculada de la ecuación 13.3. Esto es debido a que algún desperdicio orgánico no es degradable bajo condiciones anaeróbicas y porque, en algunas secciones de un relleno sanitario, la biodegradación efectiva puede ser obstaculizada por la baja humedad, la presencia de toxinas, pH adverso o la falta de nutrientes.

La figura 13.12 mostró que la tasa a la que se produce el metano (en unidades de L de metano/kg desperdicio-año) comúnmente se describe con una fase de retraso de cero producciones de metano, seguida por una decadencia exponencial como sigue (para $t > t_{\text{lag}}$):

$$\text{tasa de producción de } \text{CH}_4 = V_{\text{gas}} \times k \times e^{[-k \times (t - t_{\text{lag}})]} \quad (13.4)$$

en donde V_{gas} es el volumen total de gas (L) que puede producirse por kilogramo de desperdicio, k es una tasa de decaimiento de primer orden (tiempo⁻¹), t es el tiempo medido desde el punto en el que el desperdicio es desechado y t_{lag} es el tiempo de retraso requerido antes de que el desperdicio comience a producir metano.

Para determinar el metano producido entre el tiempo t_1 y t_2 , se puede integrar esta función para proporcionar la siguiente ecuación (con $t_1, t_2 > t_{\text{lag}}$):

$$\text{CH}_4 \text{ acumulado} = V_{\text{gas}} \times [1 - e^{[-k(t_2 - t_{\text{lag}})]}] - V_{\text{gas}} \times [1 - e^{[-k(t_1 - t_{\text{lag}})]}] \quad (13.5)$$

Para la situación en donde $t_1 \ll t_{\text{lag}}$, la ecuación 13.5 se reduce a (con $t_2 > t_{\text{lag}}$)

$$\text{CH}_4 \text{ acumulado} = V_{\text{gas}} \times [1 - e^{[-k(t_2 - t_{\text{lag}})]}] \quad (13.6)$$

La tasa de decaimiento de primer orden está relacionada con la media vida, $t_{1/2}$ (como se comentó en el capítulo 3):

$$k = \frac{0.693}{t_{1/2}} \quad (13.7)$$

Las medias vidas para la producción de metano en un relleno sanitario dependen de la degradabilidad del desperdicio y pueden variar de 1 a 35 años (McBean et al., 1995; Pierce et al., 2005). También varían con el contenido de humedad del desperdicio. El desperdicio seco tendrá una media vida más larga que el desperdicio húmedo. De conformidad, algunos rellenos sanitarios reciclan el lixiviado a la pila del desperdicio o añaden agua dulce al desperdicio para incrementar la tasa de descomposición.

ejemplo/13.5 Estimación de la producción de metano

Calcule la producción de metano (en m³/persona a 0° C) del envío a relleno sanitario del desperdicio de un año para cada persona. Utilice la tasa de envío a relleno sanitario para 2005 proporcionado en la tabla 13.2. Suponga que los tres componentes que producen metano son desperdicios alimenticios (15% del total), papel mezclado (30% del total) y restos de poda (25% del total). Suponga que 60% de los desperdicios alimenticios y desperdicio de papel y 40% de los restos de poda se descomponen y 90% del metano es capturado para recuperación de energía.

solución

Este problema requiere que se determine el metano producido por 1 kg de desperdicio enviado al relleno sanitario y multiplicar este valor por la masa del desperdicio enviado al relleno sanitario por persona por año.

Para cada kg de desperdicio determine los moles de carbono, hidrógeno y oxígeno que se degradarán a metano, y luego utilice la estequiometría molar de la ecuación 13.3 para determinar los moles de metano producido. Como muestra la tabla 13.15, la solución no sólo utiliza información de la tabla 13.5, sino que también valores proporcionados en el planteamiento del problema y pesos moleculares para encontrar las proporciones molares requeridas.

ejemplo/13.5 Continuación

Tabla / 13.15

Resultados para el ejemplo 13.5

	Peso molecular (g)	Contenido de humedad (%)	Peso seco (g)	Carbono total (g)	Hidrógeno total (g)	Oxígeno total (g)	Nitrógeno total (g)
Desperdicios alimenticios	150	70	45	21.6	2.9	16.9	1.2
Papel (mezclado)	300	10	270	117.2	15.7	119.6	0.8
Restos de poda	250	60	100	46.0	6.0	38.0	3.4
Otros	300	—	—	—	—	—	—
Total	1000						

	Carbono degradado (g)	Hidrógeno degradado (g)	Oxígeno degradado (g)	Nitrógeno degradado (g)	Carbono degradado (moles)	Hidrógeno degradado (moles)	Oxígeno degradado (moles)	Nitrógeno degradado (moles)
Desperdicios de alimentos	13.0	1.7	10.2	0.7	1.08	1.71	0.63	0.05
Papel (mezclado)	70.3	9.4	71.8	0.5	5.85	9.32	4.49	0.03
Restos de poda	18.4	2.4	15.2	1.4	1.53	2.38	0.95	0.10
Otros	—	—	—	—	—	—	—	—
Total					8.46	13.41	6.07	0.18

De la ecuación 13.3, los moles de metano producido son determinados como $(4a + b - 2c - 3d)/8$. De la tabla 13.15, $a = 8.46$, $b = 13.41$, $c = 6.07$ y $d = 0.18$. Con esta expresión, el metano producido por kilo de desperdicio es de 4.32 moles.

Al usar la ley de gas ideal, a 0°C (273°K), existen 22.4 L de gas por mol o 0.0224m^3 de gas por mol de gas. El volumen del metano producido es entonces

$$4.32 \text{ moles } \text{CH}_4 \times 0.0224 \text{ m}^3/\text{mole} = 0.0967 \text{ m}^3 \text{ por kg}$$

El problema plantea que 90% del metano fue recuperado; por lo tanto, 0.087 m^3 de metano es producido por kg de desperdicio.

De la tabla 13.2, la tasa de envío a rellenos sanitarios de Estados Unidos fue de 0.41 Mg (o 410 kg) por persona por año. Por lo tanto, la tasa de producción de gas es

$$\begin{aligned} 0.087 \text{ m}^3/\text{kg} \times 410 \text{ kg/persona-año} \\ = 35.7 \text{ m}^3 \text{ metano/persona-año a } 0^\circ\text{C} \end{aligned}$$

La producción de gas de relleno sanitario lleva a la presión en los rellenos sanitarios. Esto resulta en movimiento de gas. El flujo de gas en el desperdicio de relleno sanitario (y tierra) tiene muchas similitudes con el flujo de agua subterránea. Para controlar el movimiento del gas, las barreras impermeables al gas son incorporadas en el diseño, y se colocan afuera de las tierras altamente permeables del relleno sanitario, lo cual dirige el flujo de gas hacia trincheras. Aun en circunstancias pasadas cuando el gas de rellenos sanitarios no era recolectado para la energía, era común recolectar o poner en combustión el gas para minimizar los impactos negativos asociados con el gas de relleno sanitario.

La captura total del gas de relleno sanitario requiere de la instalación dentro del desperdicio del relleno sanitario, pozos de gas y capas permeables al gas, junto con sistemas de bombeo y tuberías (refiérase a la figura 13.10). Los nuevos rellenos sanitarios pueden típicamente capturar más de 90% del metano producido. El gas de relleno sanitario puede entonces proporcionar calor, vapor o electricidad. El método más común para convertir el gas en electricidad es con motores grandes modulares de 1 MW. Debido a que el gas de relleno sanitario es una fuente de energía renovable, se están llevando a cabo muchos esfuerzos alrededor del mundo para expandir su uso. Como un ejemplo, el Programa de Extensión de Metano de Relleno Sanitario es un programa de asistencia voluntaria y de sociedad llevado a cabo por la EPA. Los lectores son animados a visitar este sitio o similares en su país.

LIXIVIADO DE RELLENO SANITARIO No importa qué controles se implementen para minimizar el movimiento del agua hacia un relleno sanitario, algo de agua entrará y producirá el **lixiviado**. El control del lixiviado necesita considerar la cantidad y calidad del lixiviado, así como sus efectos adversos potenciales. Las concentraciones de lixiviados variarán dramáticamente según la ubicación y la vida del relleno sanitario (refiérase a la figura 13.12). La tabla 13.16 proporciona concentraciones típicas para los lixiviados jóvenes y viejos. Las concentraciones de constituyentes de lixiviados son mucho más altas que los constituyentes similares encontrados en aguas residuales municipales no tratadas. La información proporcionada en la figura 13.12 y la tabla 13.16 también muestra cómo la concentración de los constituyentes se reduce a medida que el relleno sanitario envejece y los componentes fácilmente lixiviables son eliminados.

¿EPA debería actualizar los estándares de emisiones para el gas de relleno sanitario?

<http://www.edf.org/pressrelease.cfm?contentID=8714>

Programa de extensión de metano de relleno sanitario

<http://www.epa.gov/lmop>

Table / 13.16

Composición de lixiviados jóvenes y viejos de relleno sanitario

Constituyente	Unidades	Lixiviado joven	Lixiviado viejo
BOD ₅	mg/L	10 000	100
COD	mg/L	18 000	300
Nitrógeno orgánico	mg/L como N	200	100
Alcalinidad	mg/L como CaCO ₃	3 000	500
pH	—	6	7
Dureza	mg/L como CaCO ₃	3 500	300
Cloruro	mg/L	500	200

FUENTE: Datos adaptados de Tchobanoglous et al., 1993.

Tres diferentes estrategias se utilizan para controlar el volumen y la resistencia del lixiviado. Un relleno sanitario utilizará típicamente una combinación de estas tres estrategias para limitar los impactos del lixiviado.

1. *Aislamiento*. El desperdicio es aislado al limitar la entrada de agua y por lo tanto la producción de lixiviados. El desperdicio puede ser unido a alguna matriz física o química para reducir su potencial de lixiviación. Esta última opción es más apropiada para los desperdicios altamente peligrosos (por ejemplo, el desperdicio que es radiactivo) pero siempre es parte de alguna estrategia global para limitar el impacto del lixiviado.
2. *Atenuación natural*. Las propiedades naturales físicas, químicas y microbiológicas del suelo tratan al lixiviado. El método también se basa en la dilución del lixiviado. Esta opción es muy apropiada para las comunidades de escasos recursos con pequeñas cantidades de desperdicios no peligrosos.
3. *Degradación biológica controlada*. Las condiciones del relleno sanitario son modificadas para optimizar la degradación. Esta opción típicamente involucra la adición de humedad y asegura la mezcla apropiada, asegura que los químicos tóxicos son mantenidos fuera del desperdicio y mantienen un pH apropiado, nutrientes y monitoreo. Ha sido determinada como una estrategia de biorreactor de relleno sanitario y es más apropiada para los rellenos sanitarios en donde están disponibles las habilidades técnicas avanzadas y se desecha de los desperdicios no peligrosos. Esta estrategia acelera la estabilización del material de desperdicio y por lo tanto reduce el riesgo a largo plazo del lixiviado.

El **manejo del lixiviado** requiere de una serie de subsistemas: 1) barreras hidráulicas para limitar la capacidad de un lixiviado para dejar un relleno sanitario y para que la lluvia entre al relleno sanitario; 2) sistemas de recolección para transportar el lixiviado de la base del relleno sanitario hacia una ubicación externa y, 3) un sistema de tratamiento de lixiviados. La figura 13.10 ilustra estos subsistemas.

Las barreras hidráulicas se construyen de arcilla compactada, geomembranas manufacturadas o productos de arcilla geosintética. Una combinación de éstos se puede utilizar para proporcionar un sistema con múltiples beneficios. La barrera superior es referida como una **cubierta** o **cubierta final**, y la barrera del fondo es llamada revestimiento. Las barreras hidráulicas pueden reducir la cantidad de lixiviados que dejan un sitio por un factor de 1000 o más sobre las tierras existentes. El control de calidad de la instalación de las barreras es crítico para asegurar el buen desempeño.

Los sistemas de recolección se basan en la gravedad para transportar el lixiviado hacia un punto bajo, un sumidero dentro del relleno sanitario. Tuberías altamente permeables, de canto rodado y perforadas, se colocan sobre el revestimiento para asegurar el rápido movimiento del lixiviado y por lo tanto reducir la propensión a que las presiones de poro aumenten hasta el punto en que el lixiviado pueda filtrarse del relleno sanitario o provocar problemas de estabilidad geotécnica. Desde un punto bajo, el lixiviado es típicamente bombeado hacia afuera a una locación de almacenamiento.

Debido a que el lixiviado de relleno sanitario es similar en muchas formas a una corriente residual industrial de alta resistencia, se consideran opciones similares para el tratamiento. El lixiviado podría ser transportado (mediante pipa o camión) hacia una planta municipal de tratamiento de aguas residuales, en donde podría ser cuidadosamente medido hacia el flujo de la planta. Otras opciones son el tratarlo en sitio y luego descargarlo hacia el suelo o el agua, o de otra manera, tratarlo parcialmente en sitio antes de la transportación hacia una instalación central. La opción depende de la naturaleza del lixiviado, los

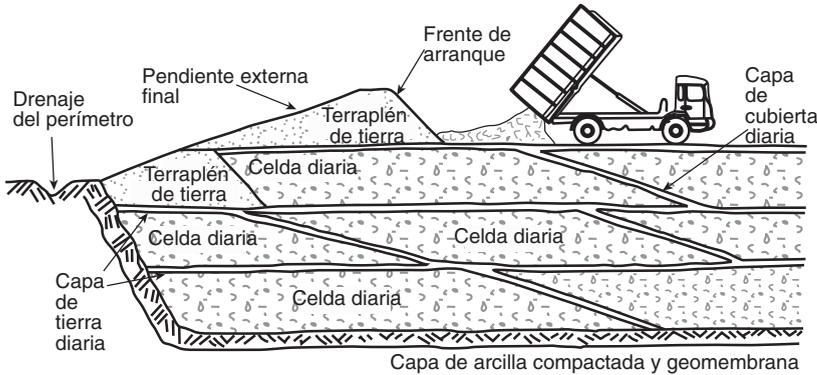


Figura 13.13 Construcción de relleno sanitario a partir de celdas diarias y levantamientos Una celda diaria de desperdicio sólido es cubierta con tierra diaria; se añaden verticalmente celdas adicionales al vertedor, lo cual finalmente hace un levantamiento.

efectos ambientales de descarga del lixiviado tratado en el relleno sanitario y los costos por transportar el lixiviado hacia una instalación de tratamiento más grande.

DISEÑO DEL RELLENO SANITARIO Como se muestra en la figura 13.13, un relleno sanitario se construye como una serie de **celdas diarias**, en donde el desperdicio de un día es compactado y cubierto. El desperdicio es entregado en el *frente de arranque* y luego compactado contra la orilla del vertedero o la celda diaria previa. Una capa horizontal de celdas diarias se llama **levantamiento**. El número de levantamientos dependerá de la topografía del sitio y la vida de trabajo deseada del relleno sanitario.

Los dos tipos principales de diseño son de área y de valle. Un **relleno sanitario de área** requiere un área relativamente plana y pretender soportar tanto desperdicio en su espacio como sea posible (moviéndose verticalmente hacia arriba). Esto necesita ser cumplido sin provocar problemas geotécnicos de estabilidad o sin exceder cualquier limitación de altura (*h* en la figura 13.14) establecida por los estándares de la zona. Para un área de tierra rectangular, el suelo correspondiente es una pirámide truncada, con base rectangular como se ilustra en la figura 13.14.

Al usar las dimensiones proporcionadas en la figura 13.14 y sea la pendiente, *G*, la longitud dividida entre la altura ($0.5 \times [L_1 - L_2]/h$), el volumen de esta pirámide se da como sigue:

$$V = \frac{h}{3} \times \left\{ L_1 \times W_1 + [(L_1 - 2Gh)(W_1 - 2Gh)] + \sqrt{L_1 \times W_1 \times (L_1 - 2Gh)(W_1 - 2Gh)} \right\} \quad (13.8)$$

Advierta que el volumen determinado en la ecuación 13.8 es la máxima cantidad de desperdicio de tierra compactada que podría ser contenida en el relleno sanitario, suponiendo que no se eleva ningún volumen mediante cubierta de suelo diaria o final.

El suelo ubicado bajo este tipo de relleno sanitario se puede utilizar para cubrir el rechazo compactado o para otros propósitos. Por lo tanto, es común excavar el suelo bajo un relleno sanitario de área antes de la construcción. La ecuación 13.8 también se puede adaptar para calcular el volumen de desperdicio compactado ubicado debajo del grado.

Para determinar el volumen disponible de un diseño de **relleno sanitario de valle**, compare los contornos topográficos de un sitio antes del llenado y estime los contornos topográficos después del llenado (figura 13.15). Para

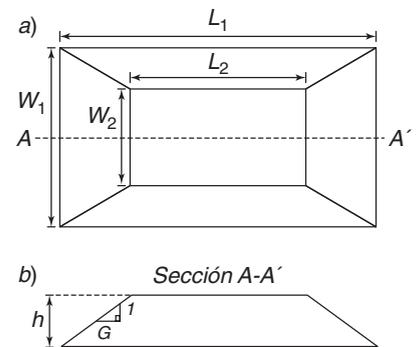


Figura 13.14 Diseño geométrico del área del relleno sanitario La figura a) es una vista en plano y la figura b) es una sección transversal de la figura de arriba.

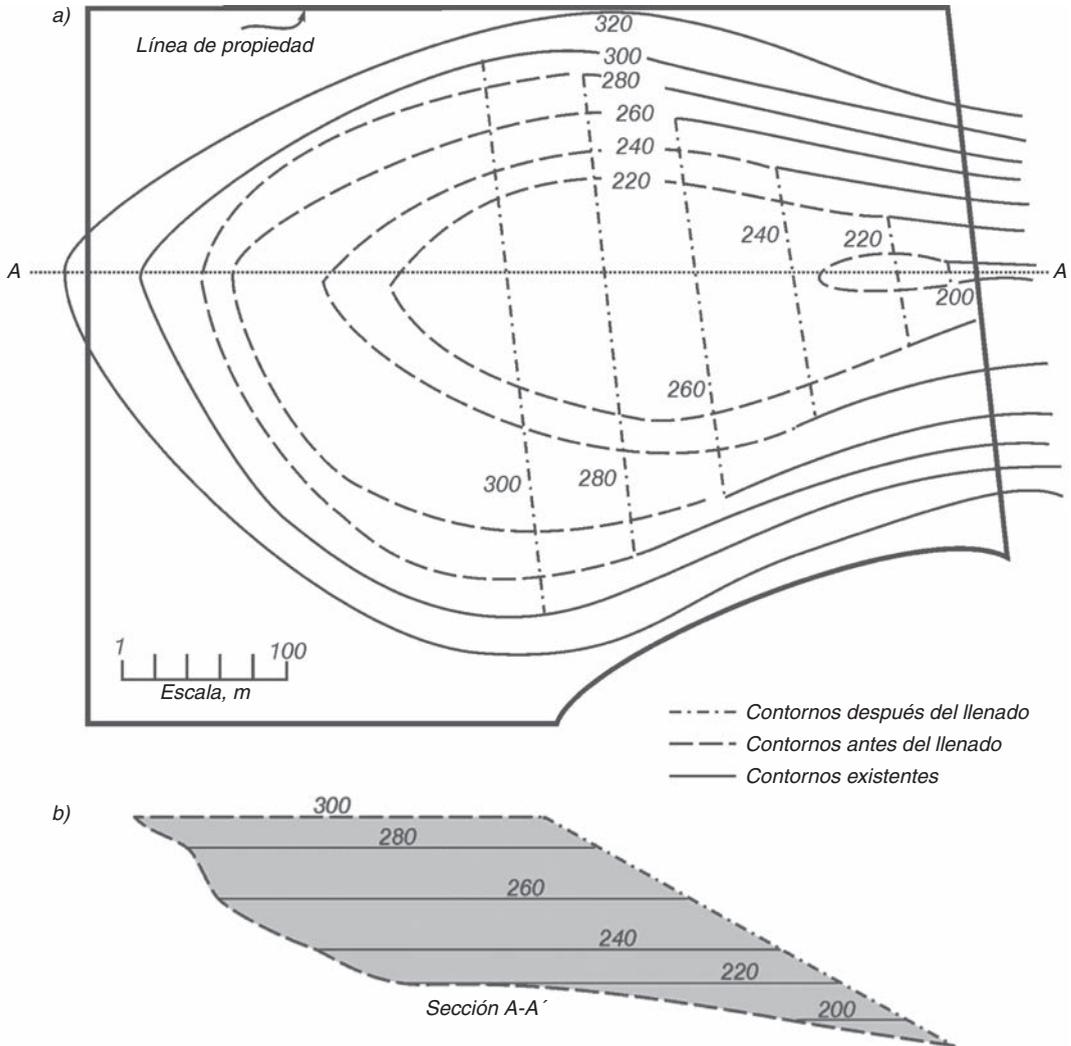


Figura 13.15 Contornos topográficos utilizados para determinar el volumen disponible para el material de desperdicio en un diseño de relleno sanitario de valle La figura a) muestra los contornos topográficos. La figura b) muestra una sección transversal de la figura superior.

Redibujado con permiso de Tchobanoglous et al., *Integrated Solid Waste Management*, 1993, derechos reservados McGraw-Hill.

maximizar el desperdicio ubicado por área de superficie de unidad, el relleno necesita incrementarse a la máxima pendiente desde el punto bajo del valle hasta que alcance su altura final. El software de diseño computarizado moderno puede evaluar rápidamente los volúmenes de rellenos de valle.

Las densidades típicas para el desperdicio de tierra compactado varían de 700 a 1000 kg/m³. Previamente, la tabla 13.4 mostró cómo la densidad del desperdicio sólido aumenta a medida que el desperdicio es recolectado, transportado y luego enviado al relleno sanitario. La densidad es de 90-178 kg/m³ para el rechazo suelto y aumenta a 475-772 kg/m³ cuando se coloca primero en el relleno sanitario. Esta densidad aumenta más con la presión de levantamientos o desperdicios. La densidad asumida en el diseño variará según la composición del desperdicio (por ejemplo, el desperdicio de construcción y demolición es más denso) y la profundidad del desperdicio (mayores profundidades llevan a mayores presiones y por lo tanto mayor densidad).

En adición al desperdicio compactado, el **volumen de relleno sanitario** frecuentemente incluirá cantidades sustanciales de **cubierta de suelo diaria**. Esta tierra es usualmente obtenida del sitio del relleno sanitario. Un grosor típico, T , de cubierta de suelo diaria es de 200 mm. La celda diaria está diseñada con base en el volumen de rechazo compactado diario (V_r), la pendiente de la celda (G), la altura del rechazo diario (H), la longitud del rechazo (L), y el ancho del frente de arranque (W) (diferente a L_1 y W_1 en la ecuación 13.8). El volumen de la cubierta de suelo diario (V_s) requerido en una celda diaria idealizada puede relacionarse con el volumen del rechazo compactado (V_r) como sigue (Milke, 1997):

$$\frac{V_s}{V_r} = \left[\left(1 + \frac{T}{H} \right) \times \left(1 + \frac{G \times T}{L} \right) \times \left(1 + \frac{G \times T}{W} \right) \right] - 1 \quad (13.9)$$

La altura de una celda diaria (H) usualmente depende de factores del manejo en sitio y pueden variar de 2 a 5 m. G es la proporción de grado de la longitud a la altura y carece de unidad. El volumen diario de rechazo compactado, V_r , está dado por $H \times L \times W$.

El ancho del frente de arranque dependerá del número de vehículos que el sitio pueda acomodar en cualquier momento bajo condiciones seguras. El ancho del frente de arranque puede calcularse mediante análisis dimensional. Por ejemplo, el ancho del frente de arranque puede determinarse, si se asume una tasa de descarte diario de 1000 mg/día (igual a 1000 toneladas/día) (y al advertir las suposiciones relacionadas con el tamaño del camión y la operación del relleno sanitario incorporadas en la ecuación 13.10) como sigue:

$$\begin{aligned} & \frac{1000 \text{ toneladas}}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ camión}}{8 \text{ toneladas}} \times \frac{1 \text{ día}}{6 \text{ h de operación}} \times \frac{6 \text{ m}}{\text{camión}} \\ & \times \frac{0.167 \text{ h de descarga}}{\text{camión}} = 21 \text{ m} \end{aligned} \quad (13.10)$$

Este valor de 21 m implica que 3.5 camiones pueden descargar a la vez, lo cual no es práctico. La longitud del frente de arranque debe ser redondeada al múltiplo más cercano del ancho del camión. En este caso, se asume que una distancia de 6 m se requiere por camión para asegurar la operación segura, y el frente de arranque debe tener espacio para cuatro camiones, lo cual resultaría en $W = 24$ m.

ejemplo/13.6 Dar tamaño a un relleno sanitario

Un relleno sanitario y sus estructuras asociadas serán construidas en suelo plano. Las dimensiones para la porción del relleno sanitario son 1000 m por 1000 m. La máxima altura permitida (h) es de 9 m por arriba del suelo (excluyendo la cubierta final). El relleno sanitario abrirá seis días a la semana y aceptará 1000 Mg (igual a 1000 toneladas/día) de desperdicio por día de operación. ¿Cuántos años puede operar la instalación?

Otras suposiciones son las siguientes: grosor de la cubierta de suelo diaria (T) = 0.2 m; altura de rechazo en la celda diaria (H) = 3 m; densidad compactada = 1000 kg/m³; ancho del frente de arranque (W) = 24 m y pendiente (G) = 3.

ejemplo/13.6 Continuación

solución

El volumen total de relleno sanitario se obtiene de la ecuación 13.8:

$$V = \frac{9\text{ m}}{3} \times \left\{ \begin{aligned} &[1\,000\text{ m} \times 1\,000\text{ m} \\ &+ (1\,000\text{ m} - 2(3)(9\text{ m}))(1\,000\text{ m} - 2(3)(9\text{ m})) \\ &+ \sqrt{1\,000\text{ m} \times 1\,000\text{ m} \times (1\,000\text{ m} - 2(3)(9\text{ m}))(1\,000\text{ m} - 2(3)(9\text{ m}))} \end{aligned} \right\}$$

$$V = 3\text{ m} \times \left\{ [10^6\text{ m}^2 + 894\,916\text{ m}^2] + 946\,000\text{ m}^2 \right\}$$

$$= 8.5227 \times 10^6\text{ m}^3$$

El volumen total de una celda diaria consiste del volumen ocupado por el rechazo compactado (V_r) y el suelo de cubierta diaria (V_s). Al usar este conocimiento y la ecuación 13.9, el volumen de la celda diaria puede determinarse como sigue:

$$V_{\text{celda diaria}} = V_s + V_r$$

Resuelva la ecuación 13.9 para V_s , y sustitúyalo en la ecuación previa:

$$V_{\text{celda diaria}} = V_r \left\{ \left(1 + \frac{T}{H} \right) \times \left(1 + \frac{G \times T}{L} \right) \times \left(1 + \frac{G \times T}{W} \right) \right\}$$

En la ecuación anterior, L se determina con base en la definición previa de V_r ,

$$L = \frac{V_r}{H \times W} = \frac{1\,000\text{ Mg} \times \frac{1\,000\text{ kg}}{\text{Mg}}}{1\,000\text{ kg/m}^3 \times 3\text{ m} \times 24\text{ m}} = 13.9\text{ m}$$

Al resolver $V_{\text{celda diaria}}$

$$V_{\text{celda diaria}} = \frac{1\,000\text{ Mg/día}}{1\,000\text{ kg/m}^3} \times \frac{1\,000\text{ kg}}{\text{Mg}} \times \left\{ \left(1 + \frac{0.2\text{ m}}{3\text{ m}} \right) \times \left(1 + \frac{3 \times 0.2\text{ m}}{13.9\text{ m}} \right) \times \left(1 + \frac{3 \times 0.2\text{ m}}{24\text{ m}} \right) \right\}$$

$$= 1\,140\text{ m}^3/\text{día}$$

ejemplo/13.6 Continuación

Encuentre el volumen de todas las celdas diarias por año, asuma una operación de 6 días por 7 días a la semana:

$$V_{\text{celdas diarias}} = 1\,140 \text{ m}^3/\text{día} \times \frac{365 \text{ días}}{\text{año}} \times \frac{6 \text{ días}}{7 \text{ días semana}}$$

$$= 356\,700 \text{ m}^3/\text{h}$$

Finalmente, determine el número de años de capacidad en el volumen total del relleno sanitario:

$$\text{años} = \frac{8.5227 \times 10^6 \text{ m}^3}{356\,700 \text{ m}^3/\text{año}} = 24 \text{ años}$$

Los lectores querrán resolver este problema suponiendo que la tasa de desecho se reduce a través del tiempo, o que la población aumenta y la tasa de descarte de desperdicios permanece igual.

MANEJO DEL RELLENO SANITARIO Un relleno sanitario requiere de manejo cuidadoso durante toda su vida. La descomposición del desperdicio y el incremento en la presión del desperdicio añadida en los levantamientos más altos provocará que se asiente el desperdicio. Esto necesita la reparación de caminos, recolección de gas y sistemas de drenaje de agua. El agua superficial puede ser fácilmente contaminada si contacta el desperdicio; por lo tanto, la separación cuidadosa del agua pluvial y el desperdicio es necesaria. Los rellenos sanitarios requieren de maquinaria pesada asociada con la compactación de terraplén y desperdicio después de que el desperdicio es colocado en el frente de arranque. Los caminos en un relleno sanitario requieren de un manejo cuidadoso, no sólo debido al uso de vehículos pesados, sino también debido al asentamiento del desperdicio. Un sistema detallado y riguroso para la protección de seguridad y salud de los trabajadores es un aspecto clave del buen manejo de rellenos sanitarios. Los rellenos sanitarios también deben ser buenos vecinos para la comunidad que los rodea. Por lo tanto, medidas vigilantes se requieren para reducir los impactos de ruido, olor, pájaros, polvo y basura.

El buen manejo está fuertemente unido al buen monitoreo. La protección ambiental y la seguridad ocupacional requieren el monitoreo del gas, lixiviado, agua subterránea y agua superficial. En adición, los gestores de rellenos sanitarios monitorearán el desperdicio que llegue para asegurarse que los materiales inapropiados no sean depositados y para proporcionar datos sobre la tasa de llegada de desperdicio.

La densidad del desperdicio también es frecuentemente monitoreada para permitir la planificación de la vida del relleno sanitario. Los rellenos sanitarios típicamente se cargarán de desperdicios con base en la masa recibida. La carga debe ser lo suficientemente alta como para pagar por los grandes costos de construcción y también proporcionar un monitoreo y mantenimiento permanentes después de que el relleno sanitario ha completado su vida útil.

13.3.6 TECNOLOGÍAS DE ENERGÍA DE DESPERDICIOS SÓLIDOS

Debido a un interés creciente en la obtención de energía del desperdicio, un número de **tecnologías de energía** alternativas se están sometiendo a desarrollo.



Operación de relleno sanitario

La **digestión anaeróbica** es un proceso biológico de la conversión de desperdicios sólidos biodegradables separados en gas metano y un residuo sólido que es apropiado para convertirse en composta. El proceso trabaja muy similarmente a aquellos que producen gas de relleno sanitario. La diferencia es que en el digester anaeróbico, los desperdicios son mezclados en un recipiente grande y se aseguran las condiciones de degradación óptimas, dando mayor producción de energía de los desperdicios. La tecnología es actualmente muy cara, y para que ésta sea exitosa, los desperdicios deben ser fácilmente degradables (como residuos de alimentos) y las otras alternativas disponibles, como el relleno sanitario o la incineración, deben ser caras.

La **gasificación** es un proceso similar a la incineración, en donde cantidades menores a las estequiométricas de oxígeno se aplican al desperdicio en el contenedor del reactor. Las altas temperaturas que resultan de la combustión parcial llevan a la producción de gases de alta energía, lo cual a cambio puede convertirse en polvo, usualmente en formas menos contaminantes. La pirólisis es un proceso similar, en donde aun menos oxígeno o nada de oxígeno se aplica a la reacción, llevando a la producción de gases de alta energía y un residuo sólido (char) que puede ser separado para dar un residuo de alta energía para la posterior combustión. Ambos procesos han sido en su mayoría aplicados con éxito a los desperdicios relativamente homogéneos como los neumáticos o los plásticos (Malkow, 2004).

13.4 Conceptos del manejo

El manejo exitoso de los desperdicios sólidos requiere de un enfoque sistémico. En vez de tratar de analizar si los componentes de un sistema individual son mejores o no, la sociedad necesita evaluar, en una manera holística e integrada, la combinación de componentes que maximizará los beneficios a un costo dado para las generaciones actuales y futuras. La figura 13.16 proporciona un ejemplo de cómo el manejo de desperdicio sólido municipal puede involucrar una apropiada mezcla compleja de tecnologías para los tipos de desperdicio.

Para llegar a un sistema como el mostrado en la figura 13.16 se requiere un enfoque en los objetivos globales; creatividad en el desarrollo de nuevas posibilidades sustentables, las cuales pueden incluir la redefinición del problema original, y el reconocimiento del impacto que las decisiones

El College and University Recycling Council (CURC, Consejo de reciclaje colegial y universitario) organiza y apoya a líderes de programas ambientales en instituciones de educación superior en el manejo de cuestiones de recursos, reciclaje y desperdicios

<http://www.nrc-recycle.org/>

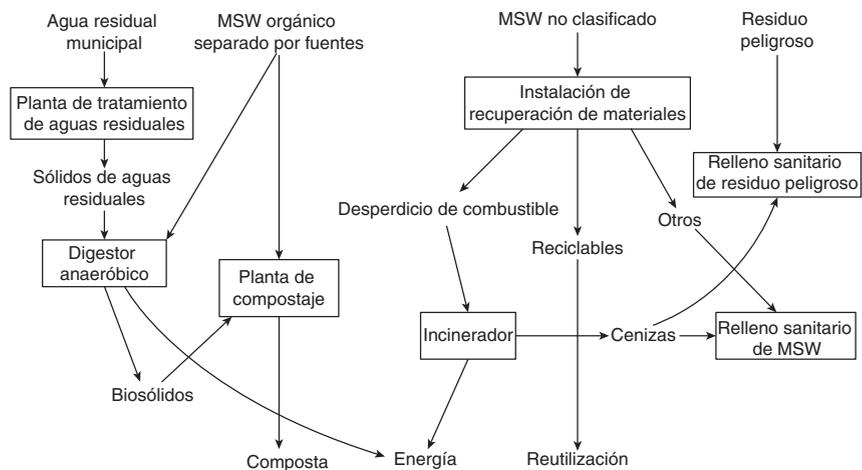


Figura 13.16 Ejemplo de un enfoque sistémico para el manejo de desperdicios sólidos Advierta las muchas tecnologías y corrientes de desperdicios que se integran en este enfoque.

en una parte del sistema pueden tener sobre el funcionamiento de todo el sistema. Por ejemplo, la operación de un incinerador exitoso requiere de una provisión estática de desperdicio de alta energía, tal como el papel. Si una comunidad elige invertir en un incinerador, entonces se hace difícil el considerar otras opciones para el manejo de papel residual, como el reciclaje a través de la recuperación de materiales. Si una comunidad elige separar los residuos alimenticios y lo puede hacer a un bajo nivel de contaminación, entonces la posibilidad de tratar el desperdicio junto con los sólidos derivados de aguas residuales se convierte en una opción que no existía antes.

La separación de tipos de desperdicios mediante generadores de desperdicios, conocida como **separación de fuentes**, es una parte clave de un buen sistema. Si una comunidad es capaz y desea separar los componentes de los desperdicios sólidos, la habilidad de crear valores a partir de los desperdicios aumenta. La evaluación de la economía de la separación de fuentes debe considerar la evasión del costo de desecho de los desperdicios separados.

Recuadro / 13.4 Manejo de hogares y reducción de fuentes

Las técnicas de manejo de desperdicios como el compostaje, el reciclaje y la reducción de fuentes resultan en la reducción de la cantidad de desperdicio juntado para las opciones de reciclaje como el relleno sanitario. Se estudiaron tres estrategias de reducción de desperdicios en la Parroquia de Santa Ana en la nación en la pequeña isla de Jamaica (Post y Mihelcic, 2009). Los factores designados como incentivos para la reducción de desperdicios existieron principalmente a nivel habitacional —específicamente, la segregación de desperdicios, educación casera, preocupación ambiental y conocimiento— en donde las barreras existieron principalmente a niveles nacionales o regionales, a



Cortesía de James R. Mihelcic.

saber las políticas y finanzas gubernamentales. (Más información sobre los incentivos y barreras de los programas de reciclaje pueden encontrarse en Troschinetz y Mihelcic, 2009.)

El mayor potencial para las estrategias iniciales de reducción de desperdicios de un relleno sanitario en este punto eran dentro del hogar, específicamente por las iniciativas de reducción de desperdicios basadas en la comunidad que se constrúan con base en prácticas ya existentes y mejoraban el manejo de desperdicios sólidos locales.

Ejemplo de reducción de fuente en el punto de recolección. Foto tomada en Lavena, isla de Taveuni (Fiji), hogar de la rara paloma anaranjada.

13.4.1 CONSULTA

La preocupación pública en cuanto al desperdicio sólido es alta, como lo es para muchas otras actividades de ingeniería. Como resultado, los ingenieros hoy en día deben comentar con los varios **inversionistas** los proyectos y programas propuestos que hacen al público, un esfuerzo que incluye escuchar las preocupaciones e ideas del público. Un primer paso en un proceso de consulta es la identificación de los inversionistas que tienen un interés directo o indirecto en el proyecto. Los inversionistas pueden ser vecinos, la comunidad local, la comunidad más amplia, los medios de noticias, los funcionarios electos, los grupos de interés ambientales y sociales y los grupos culturales.



Discusión en clase

¿Qué tipo de reducción de fuente correspondiente podría ser implementada en su propia casa? ¿Cómo implementaría el plan con todos los miembros de su hogar o departamento?

Tabla / 13.17

Métodos de consulta y su potencial para lograr resultados específicos Los métodos de consulta que parecen tomar más tiempo (por ejemplo, talleres, comités de asesoramiento, mediación) típicamente arrojan un mejor resultado.

Método de consulta	Resultados							
	Informar a los inversionistas	Identificar valores	Generar opciones	Cambiar opciones	Resolver conflictos	Cambiar propuestas	Consulta costosa	Duración de la consulta
Liberaciones de información	Alta	Baja	Baja	Moderada	Baja	Baja	Moderada	Moderada
Viajes de campo/ visitas en sitio	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Baja
Modulos de información/ visitas al club	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Baja	Baja	Baja	Moderada
Atención personal	Baja	Alta	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Moderada
Juntas públicas	Moderada	Alta	Moderada	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
Talleres	Moderada	Alta	Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada
Comités de asesoramiento	Baja	Moderada	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
Mediación	Baja	Moderada	Moderada	Baja	Alta	Alta	Moderada	Alta

La tabla 13.17 resume las razones para consultar con los inversionistas e identifica métodos que tienen mayor potencial para hacer coincidir el resultado deseado. En general, los métodos de consulta que involucran mayores costos y mayores periodos suelen resultar en mejores resultados.

Para ser efectiva, la consulta debe comenzar temprano, proporcionadas con recursos adecuados, con visión abierta y sincera e involucrar una buena escucha. En general, dejar un grado de poder a los inversionistas y permitir las modificaciones al proyecto resultarán en una mayor oportunidad de aceptación pública. La consulta es entonces una parte crítica del manejo de cualquier proyecto de ingeniería.

13.4.2 OPCIONES DE POLÍTICAS

La tabla 13.18 proporciona una visión general de las opciones de políticas para lograr los objetivos para el manejo de desperdicios sólidos. El buen desarrollo de políticas requiere evaluaciones de costos y beneficios, un enfoque en objetivos y una consideración de riesgos y efectos no pretendidos (Comisión de Productividad Australiana, 2006).

13.4.3 ESTIMACIÓN DE COSTOS

Las instalaciones de manejo de desperdicios socialmente aceptables pueden ser caras, y los compromisos equitativos entre los beneficios de costos y sociales son necesarios. Una causa subyacente de dificultad es la economía



Reciclaje alrededor del mundo

El Modelo de reducción de desperdicios de EPA (WARM) rastrea las reducciones de emisiones de gases de invernadero de diferentes prácticas de manejo de desperdicios

http://www.epa.gov/climatechange/wycd/waste/calculators/Warm_home.html

Tabla / 13.18

Opciones de políticas para lograr los objetivos para el manejo de desperdicios sólidos				
Opción de políticas	Descripción	Ejemplo	Cuándo considerarla	Cuándo evitarla
Campañas de información pública	Informar al público de los comportamientos preferentes	Intercambios de desperdicio comercial	La información está en el mejor interés del individuo así como en la ayuda en el manejo de desperdicios	El cambio de comportamientos creará dificultades en los individuos.
Ecoetiquetado	Informar al público cuáles productos de consumo crean menores problemas de desperdicios.	Bolsas de compras reutilizables; detergentes ecoetiquetados	Los consumidores carecen de información sobre los impactos de los desperdicios de los productos.	Las diferencias entre las opciones son pequeñas o difíciles de evaluar.
Objetivos de los desperdicios	Grupos gubernamentales o industriales establecen metas futuras.	El 50% de aumento en el reciclaje de papel para el año 2020	La sociedad está de acuerdo con la dirección pero carece de enfoque.	El objetivo no considera los costos, efectos aislados o riesgos.
Subsidios gubernamentales	El gobierno apoya el reciclaje o los esfuerzos de minimización de desperdicios.	Premios a los esfuerzos comunitarios de reciclaje	Los efectos ambientales de los desperdicios no se reflejan por los costos.	Premios otorgados por actividades que sucederían en cualquier caso.
Usuario paga	Los productores de desperdicios y no el gobierno pagan el costo total del manejo.	Cargas con base en el peso para los desperdicios sólidos habitacionales	El costo de la carga del sistema es pequeño.	Los usuarios evitan los cargos mediante prácticas ilegales.
Ejecución	Los infractores de las reglas pagan una multa.	Boletos para tirar la basura	El comportamiento es claramente negativo, y existen pocos infractores.	Muchos infractores y cada uno de ellos causan poco impacto
Reembolso de depósito	Los consumidores reciben un reembolso como un incentivo para el manejo apropiado de desperdicios.	Reembolso de depósito para baterías de autos.	Consecuencias altamente negativas del manejo inapropiado de desperdicios.	Grandes costos para operar el sistema y pocos beneficios ambientales.
Impuestos sobre desperdicios	El gobierno impone impuestos sobre los desperdicios.	Impuesto de relleno sanitario	Impuestos vinculados a las consecuencias ambientales de actividades.	Grandes costos para operar el sistema o los efectos aislados indeseables.
Responsabilidad del productor	Los productores responsables de regresar los bienes en la etapa de término de vida de uso.	Sistemas de retorno por computadora	Los productos pueden ser reutilizados fácilmente para la producción de nuevos productos.	Grandes costos de recolección, almacenamiento y transportación.
Prohibición de productos y prácticas	El gobierno prohíbe los productos o las prácticas	Prohibición de pesticidas específicos; prohibición de quema de pasto/césped	Los productos/prácticas tienen un alto potencial de daño, y otras opciones de políticas son muy costosas.	Los impactos son pequeños o pueden manejarse con otras políticas.



Discusión en clase

Algunas industrias involucradas en el manejo de desperdicios sólidos han presionado para que sus emisiones de gases de invernadero sean consideradas energía verde que serían dignas de créditos de impuestos similares a aquellos provistos a los proyectos de viento, solares y de conservación. De hecho, el desperdicio sólido a energía se está clasificando legalmente en muchos estados como una fuente de energía renovable. Algunos creen que esto está en oposición directa al concepto de Cero Desperdicio, el cual intenta eliminar el desperdicio, no clasificarlo como un recurso renovable. ¿Qué piensa usted? ¿El gobierno debería proporcionar créditos de impuestos y subsidios a las industrias de desperdicios sólidos que pudieran competir contra los proyectos de viento, solares y de conservación? Lea más acerca de esta controversia en <http://www.sierraclub.org/committees/zerowaste/garbage/>.

de escala de la mayoría de las instalaciones de manejo, lo que significa que una instalación doblemente grande no cuesta lo doble. Por ejemplo, los costos de un relleno sanitario por tonelada (Mg) durante un año en la Unión Europea (en euros del año 2003) tendrían la siguiente forma (Tsilemou y Panagiotakopoulos, 2006):

$$\text{costo total del relleno sanitario} = 5\,040 \times X^{-0.3} \quad (13.11)$$

para las situaciones en las que X ha estado entre 60 000 y 1 500 000 Mg/año. De la ecuación 13.11, el costo total de relleno sanitario por Mg de desperdicio sólido descartado para 60 000 Mg por año puede estimarse en 186 euros/Mg. Por diez veces la cantidad de desperdicio sólido descartado (600 000 Mg por año), el costo se reduce a 93 euros/Mg.

La economía de escala significa que mayores rellenos sanitarios, incineradores y plantas de compostaje están económicamente favorecidos. Sin embargo, son más propensos a enfrentar oposición pública. Por supuesto, el desarrollo sustentable ha demostrado que las soluciones locales son con frecuencia la alternativa preferida.

Términos clave

- almacenamiento
- celda
- combustible derivado de residuos (RDF)
- compostaje
- contenido de humedad
- contorno
- cubierta
- cubierta de suelo diaria
- cubierta final
- densidad de desperdicio
- desecho
- desperdicio
- desperdicio a energía
- desperdicio sólido
- desperdicio sólido municipal (MSW)
- digestión anaeróbica
- emisiones de gas de invernadero
- en depósito
- escombros de construcción y demolición
- estaciones de transferencia
- gasificación
- generación de desperdicio
- hilera
- incineración
- instalación de recuperación de materiales (MRF)
- inversionistas
- levantamiento
- Ley de conservación y recuperación de recursos (RCRA)
- lixiviado
- manejo de desperdicios sólidos
- manejo de lixiviados
- metano
- prevención de contaminación
- procesamiento
- proporción de carbono a nitrógeno (C:N)
- putrescible
- reciclaje
- recolección
- recuperación de energía
- reducción
- relleno sanitario
- relleno sanitario de área
- relleno sanitario de valle
- residuos peligrosos
- reutilización
- separación de fuentes
- tasa de generación
- tecnología de energía
- transportación
- vertederos
- volumen de relleno sanitario