

# 7

CAPÍTULO

## TECNOLOGÍAS PARA RESIDUOS SÓLIDOS



Fotografía cortesía de Guillermo Hegel



**EN ESTE CAPÍTULO**<sup>57</sup> se describe cómo preparar el compost en forma casera y a nivel comunitario. Luego, se explica en detalle como diseñar, operar y mantener un relleno sanitario manual.

## 7.1 COMPOST CASERO

El cómpost es un producto que se obtiene de la descomposición de la basura orgánica, el cual puede ser muy útil para abonar nuestras tierras, jardines y plantas. Puede prepararse en forma confinada, al aire libre o con el uso de lombrices para obtener un abono de mejor calidad. Este producto no es un fertilizante sino un abono muy similar en contenido de nutrientes al estiércol.

Las bacterias que ya vienen en la basura (*y las lombrices en el caso de la lombricultura*) son las encargadas de transformar la materia orgánica en composta. Para desarrollar su labor las bacterias requieren de alimento (*la basura orgánica*), de humedad (*la cual ya existe en la basura orgánica*) y de oxígeno (*el cual está en el aire atrapado entre las partículas de la basura*). Hay dos etapas en el proceso, la de producción de compost fresco y la de maduración. En la primera, que dura unos tres meses, se produce el compost fresco y la actividad de las bacterias al degradar la materia orgánica produce calor, lo que eleva la temperatura del material a más de 60 grados, temperatura a la cual mueren la mayoría de las bacterias patógenas. Posteriormente viene la etapa

de maduración mediante reposo con o sin lombrices, la cual dura otros tres meses.

### 7.1.1 Preparación en forma confinada

Para preparar el cómpost en forma confinada se recomienda considerar los siguientes pasos:

- Separar con cuidado la basura orgánica de la inorgánica
- Excavar un hueco de 80cm x 80 cm x 60 cm de profundidad o usar uno o dos barriles o tambores de 200 litros, de acero o plástico
- Partir las partes gruesas de la basura con machete o con azadón
- Colocar la basura orgánica en los barriles agregándole si se tiene, un poco de estiércol y desechos de jardinería.
- Una vez por semana remover la basura con una barreta o varilla de acero para permitir que entre aire a la mezcla para que las bacterias puedan trabajar. Se puede mejorar la inclusión de aire haciendo perforaciones en las paredes

<sup>57</sup> Autor: Francisco Zepeda

del barril para poder encajar la varilla y permitir la entrada de aire horizontalmente. Incluso se puede trasvasar el material de un barril a otro.

- Si la mezcla está muy seca, rociar con agua
- Después de tres meses ya está listo el cómpost fresco, dejarlo reposar unos dos o tres meses más para madurarlo. Si se quiere usar el barril para preparar más cómpost, se puede voltear y dejar madurar el cómpost en forma de montoncito triangular.
- El cómpost maduro se tamiza en una malla antes de usarlo en jardinería o agricultura fina.

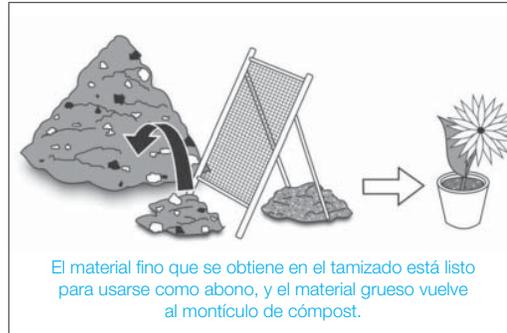
### 7.1.2 Preparación al aire libre

Los pasos para obtener cómpost al aire libre son los siguientes:

- Separar con cuidado la basura orgánica de la inorgánica
- En un rincón lejano del jardín se acondiciona el área física para la preparación del cómpost
- Se parten las partes gruesas de la basura con machete o con azadón
- Se colocan los desechos de cocina, los de jardinería y estiércoles si los hay en forma de montículo triangular sobre un lecho de ladrillo, madera o concreto.
- Una vez por semana durante el primer mes y una vez cada dos semanas en los dos meses siguientes, se traspalea la mezcla a un lado de modo que el centro del montón quede adentro y las partes interiores queden ahora en la superficie. De esta manera se incluye aire a la mezcla para que puedan seguir trabajando las bacterias. Si está muy seco el material se rocía con agua
- Después de 3 meses el cómpost fresco ya está listo y se deja madurar

durante unos dos o tres meses más.

- El cómpost maduro se tamiza en una malla antes de usarlo en jardinería o agricultura fina.



### 7.1.3 Preparación de cómpost mediante lombricultura

Los primeros pasos son casi los mismos a cualquiera de los procesos anteriores hasta obtener un cómpost fresco, es decir:

- Separar las basuras orgánicas de las inorgánicas
- Partir las partes gruesas de la basura
- Colocar la mezcla en el barril o en el montoncito triangular según el método que se quiera usar.
- Cada semana durante el primer mes y cada dos semanas durante el segundo mes se incluye aire ya sea removiendo con varilla o volteando con pala según el proceso que se use. La única diferencia es que solo se deja dos meses en vez de tres
- Preparar dos lechos de madera, ladrillo o concreto de 1 metro x 1 metro con 30 cm de profundidad uno junto al otro. Se pueden usar bandejas que se encuentren en el mercado, por ejemplo de 40cm x 40 cm x 30 cm. de profundidad.
- Colocar el cómpost fresco de dos meses en uno de los lechos (o en varias bandejas) agregar las lombrices (roja californiana o *eisenia foétida*) y dejar un tiempo hasta que las lombrices transformen la materia orgánica restante.
- El excremento de las lombrices

será el contenido principal del lombricómpost.

- Cuando ya está listo el cómpost se coloca compost fresco en el lecho contiguo y se espera a que las lombrices emigren solas a la nueva fuente de alimento.
- En el caso de las bandejas, junto a cada bandeja se coloca otra con cómpost fresco para que las lombrices emigren. En algunos casos se pueden usar bandejas perforadas en el fondo, colocándose la nueva bandeja debajo de la ya terminada para que las lombrices emigren a través de las perforaciones hacia la nueva fuente de alimento.
- Esto dura unos tres meses más y cuando empiezan a emigrar las lombrices por falta de alimento, el proceso se considera terminado. El lombricómpost, que es de una excelente calidad, se tamiza y se usa en jardinería o en cultivos finos.

## 7.2 COMPOST COMUNITARIO EN EL MEDIO RURAL

En el caso de querer producir compost a nivel comunitario rural se aplican los mismos principios que en el compost casero, es decir que las bacterias tienen que tener las mejores condiciones en cuanto al alimento o sustrato, a la humedad y a una fuente de oxígeno que es el aire.

A nivel rural se usan los métodos de montículos y el de lombricultura. Para esto se supone que en la comunidad existe un sistema de recolección de basura ya sea domiciliario o mediante la colocación de contenedores en puntos estratégicos de la localidad.

Las experiencias de Latinoamérica en la producción de compost han sido exitosas técnicamente, pero en lo económico han

tenido problemas graves para encontrar un mercado para el producto. Por lo anterior se recomienda producir primero una cantidad no muy grande de compost para tantee el posible mercado.

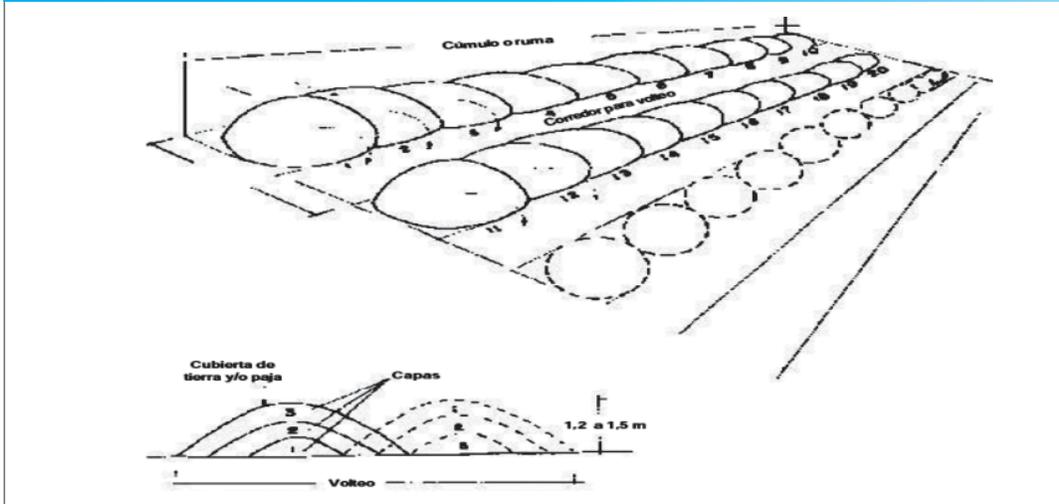
### 7.2.1 Método de montículos o pilas

Los pasos para producir compost a nivel comunitario son:

- Realizar una campaña educativa para que la gente separe su basura en orgánica (aproximadamente el 50%) e inorgánica. Se ha comprobado que se requieren campañas periódicas porque la gente después de la campaña empieza a disminuir su compromiso.
- Llevar la basura inorgánica (siempre mezclada con un poco de orgánica) a un relleno sanitario, donde si hay mercado cercano se pueden separar los reciclables (entre 2 y 10%) y enterrar sanitariamente el resto.
- Preparar un terreno municipal o comunitario para la plantita de producción de compost. Debe estar cercado para impedir la entrada de animales, tener una caseta para un guardia y almacén para herramientas y para reciclables si los hay. También debe contarse con un almacén para el compost terminado.
- Para el proceso de composteo deben prepararse plataformas de concreto de 4m x10 m para formar sobre ellas los montículos o pilas. Las plataformas deben tener una pendiente y canaletas para el posible escurrimiento de líquidos. Las canaletas deben desembocar en una fosa que pueda ser vaciada periódicamente.
- La basura orgánica recibida se va colocando en montículos sobre la plataforma o en forma de montículos alargados de tres o cuatro metros de largo en el caso de que se tenga mucha basura.

- De forma similar al composteo casero los montículos o pilas se voltean mediante traspaleo semanalmente durante el primer mes y cada dos semanas durante los dos meses restantes.
- A los tres meses el compost fresco ya está listo y se debe madurar otros dos o tres meses más ya sin voltear.
- El cómpost se tamiza y se almacena, o se usa para cultivos finos o jardinería, o se embolsa para su venta si hay mercado.

### PROCESAMIENTO MANUAL DE LA MATERIA ORGANICA EN PILAS PARA LA PRODUCCION DE COMPOST



#### 7.2.2 Producción de lombricómpost en planta

Al igual que en el caso anterior el proceso de producción de compost tiene los mismos principios teóricos que el compost casero, es decir debe existir el sustrato o alimento, la humedad, y el oxígeno para la transformación de la materia orgánica en abono.

Los pasos necesarios para su producción son:

- Al igual que en la producción de lombricómpost casero se prepara compost fresco de dos meses.
- A la planta descrita en el ítem 7.2.1 se le agregan dos lechos contiguos de concreto o ladrillo de 1 metro de ancho x 30 cm de profundidad y varios metros de largo según la cantidad de basura. Pueden ser de 5 a 10 metros de largo.

- El compost fresco se coloca en el primer lecho, y se agregan las lombrices. El proceso de transformación de la materia orgánica se inicia y después de unos tres meses más, cuando el compost está listo, se coloca compost fresco en el lecho contiguo y se espera a que las lombrices emigren a la nueva fuente de alimento. El proceso se repite indefinidamente pasando de un lecho a otro.
- El compost ya listo dejado por las lombrices se tamiza y se usa en jardinería o cultivos finos, o se embolsa para su venta si se logra abrir un mercado..

En las siguientes fotografías se puede ver el proceso de reciclaje de estiércol bovino en la producción de lombriz Coqueta Roja. Lugar: Finca Pradera Roja, Estado Ciudad de Cuba, cortesía Sr. Oscar Rolando Marroquín de AURSA



A continuación se muestra como el lombricompost se incorpora en los cultivos organopónicos (suelos transportados,

protegidos y nutridos con lombricompost) donde se producen hortalizas, frutales y pastos para alimentación animal



### 7.3 RELLENO SANITARIO MANUAL<sup>58</sup>

Es una adaptación del relleno sanitario convencional, la cual se usa en pequeñas poblaciones que por la cantidad y el tipo de residuos que producen –menos de 15 toneladas/día-, además de sus condiciones

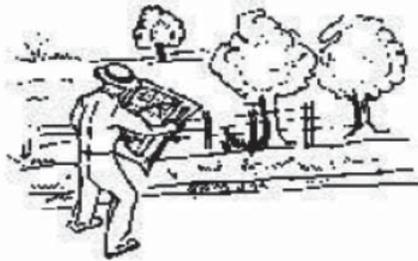
económicas, no están en la capacidad de adquirir el equipo pesado que se usa en un relleno sanitario convencional debido a sus altos costos de operación y mantenimiento. El término manual se refiere a que la operación de compactación y confinamiento de los residuos puede realizarse con el apoyo de una cuadrilla de hombres y el empleo de algunas herramientas.

<sup>58</sup> Fuente: Jaramillo, Jorge, Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales, CEPIS, OPS/PMS, Universidad de Antioquia, Colombia, 2007. 287 páginas

Al igual que en el relleno sanitario convencional, el diseño, operación y mantenimiento de un relleno sanitario manual es generalmente responsabilidad municipal.

### 7.3.1 Estudios de campo y diseño

Para rellenos sanitarios manuales es necesario hacer el mismo tipo de estudios que para los rellenos convencionales. En el siguiente gráfico se ilustran los pasos a seguir.



1. Identificación del sitio por rellenar y sus alrededores

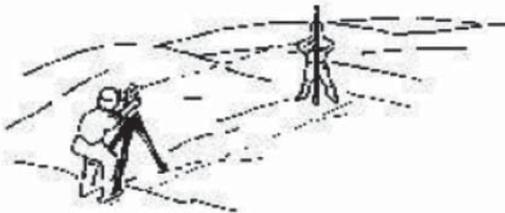


Análisis del suelo



Verificación del nivel freático

2. Análisis de las condiciones hidrológicas



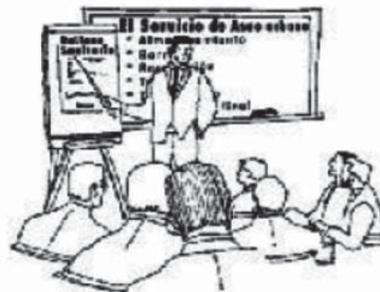
3. Levantamiento topográfico



4. Elaboración del diseño



5. Análisis de costos



6. Presentación del proyecto a las autoridades

### 7.3.2 Preparación del terreno y construcción de obras

Al igual que en el punto anterior, en la siguiente figura se ilustran gráficamente los pasos a seguir para las obras de construcción del relleno.

1. Limpieza y desmonte

2. Construcción de la vía de acceso directa

3. Encerramiento del terreno

4. Siembra de árboles en el perímetro

5. Construcción del drenaje perimétrico

6. Preparación del suelo de soporte

7. Construcción de drenajes internos

8. Preparación del drenaje de gases

9. Construcción de la caseta de control e instalaciones

10. Excavación de pozos de monitoreo

11. Diseño y ubicación del cartel de identificación

12. Visitas con los líderes de la comunidad vecina

### 7.3.3 Operación y mantenimiento de los rellenos sanitarios manuales

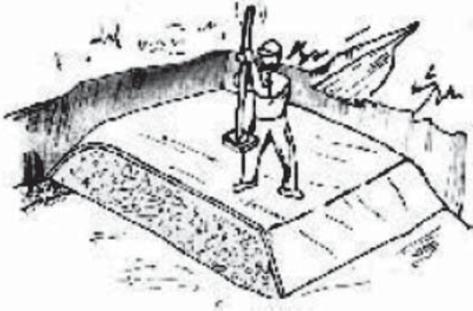
De forma similar, a continuación se muestran los pasos necesarios para una correcta operación del relleno.



1. Adquisición de herramientas



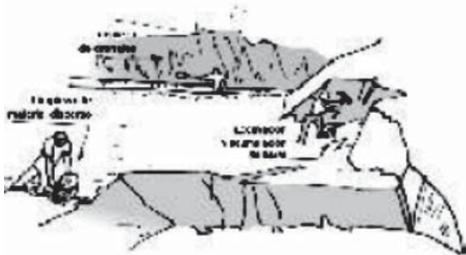
2. Compra de los elementos de protección de los trabajadores



3. Inicio de la operación del relleno



4. Clausura del (de los) botadero (s)



5. Mantenimiento permanente



6. Preparación del presupuesto anual

### 7.3.4 Diseño a detalle de un Relleno Sanitario Manual

Una vez legalizada la propiedad del terreno, se puede proceder a contratar los estudios y diseño del relleno sanitario y su infraestructura. Para estos estudios, el proyectista o contratista deberá recopilar la información básica que se describe mas adelante y realizar necesariamente una o varias visitas de campo a fin de reconocer el terreno.

Para evaluar el sitio, el técnico llevará consigo el plano topográfico, el cual debe contener la descripción original del terreno (alturas y depresiones), un gráfico o cuadro que indique las cantidades de residuos que se estima se acumularán entre los próximos 5 a 10 años, y la tierra necesaria como cobertura.

La visita es importante para identificar la zona de llenado y sus alrededores, así como para ubicar el lugar en que se construirán las obras de infraestructura y construcciones auxiliares que serán necesarias, tales como el trazo de la vía de acceso, los drenajes, el patio de maniobras, la caseta de vigilancia.

En esta etapa, además, se evalúa el método de relleno, la fuente del material de cobertura, la distribución y el diseño de terraplenes de residuos para finalmente, empezar a definir la secuencia de construcción.

#### INFORMACIÓN BÁSICA

##### Aspectos demográficos

- **Población:** Es necesario conocer el número de habitantes meta para definir las cantidades de residuos sólidos municipales (RSM) que se han de disponer. Hay que anotar que al estimar la producción de estos residuos se debe discriminar entre la producción rural y urbana.

La primera presentará menos exigencias por ser reducida, si bien la recolección resulta más difícil. En cambio, la producción urbana es mayor por razones de concentración, aumento de población y desarrollo tecnológico y urbanístico.

- **Proyección de la población:** Para poder calcular la cantidad de residuos sólidos municipales (RSM) que se deberá disponer diaria y anualmente a lo largo de la vida útil del relleno sanitario, es muy importante estimar la población futura que tendrá la comunidad por lo menos en los próximos 5 a 10 años. El crecimiento de la población se estima por métodos matemáticos, o bien vaciando los datos censales en una gráfica y haciendo una “proyección” de la curva dibujada.

A continuación, un ejemplo matemático referido al crecimiento geométrico; es decir, al de las poblaciones biológicas en expansión, para lo cual se asume una tasa de crecimiento constante.

La siguiente expresión nos muestra su cálculo:

$$P_f = P_o (1 + r)^n$$

Donde:

$P_f$  = Población futura.

$P_o$  = población actual.

$r$  = tasa de crecimiento de la población

$n = (t_{\text{final}} - t_{\text{inicial}})$  intervalo en años.

$t$  = variable tiempo (en años).

Sin embargo, se recomienda comparar los resultados que se obtengan aplicando esta fórmula, con otros métodos de proyección de población.

VOLUMEN Y ÁREA REQUERIDA PARA EL RELLENO SANITARIO														
Año	Población (hab)	ppc kg/hab/día	Cantidad de residuos sólidos				Volumen (m3)						Área requerida (m2)	
			Diaría (kg/día)	Anual / año	Acumulado (t)	Residuos sólidos compactados		Material de cobertura m3		Residuos Sólidos estabilizados (m3/año)	Relleno sanitario		Relleno AR	Total AI
						Diaría (m3)	Anual (m3)	Diaría (m3)	Anual (m3)		(m3)	Acumulado		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	
0														
1														
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														
9														
10														

(3) = (1)x(2)	Población x ppc
(6) = [(3)x7/6]/Dc	Los residuos sólidos producidos en una semana son llevados al relleno durante los días de recolección. Normalmente entre el lunes y sábado (7 días de producción/ 6 días de recolección).
(8) = (6) x 0.2	Material de cobertura = entre 20 y 25% del volumen de residuos compactados.
(11) = (9)/(10)	El volumen del relleno sanitario VRS = material de cobertura / volumen de residuos estabilizados.
(13) = (12)/H	Área por rellenar AR = Volumen Del relleno/ H H = altura del relleno estimada
(14) = (13) x F	Área total AT = área por rellenar x F F = Factor para estimar el área adicional (entre 20 y 30%)

RELLENO SANITARIO MANUAL	
DENSIDAD DE LA BASURA (KG/M3)	
Ds: Suelta	200 a 300
Dc: Compactada	400 a 500
De: Estabilizada	500 a 600

### Generación de Residuos sólidos municipales (RSM) en las pequeñas poblaciones

Con respecto a la generación y composición de los desechos que se manejan en las pequeñas comunidades, podemos decir que cuando se calcula la cantidad de residuos que se producen predomina el aporte del sector residencial, siendo las otras actividades tan incipientes que su generación de residuos no alcanza a afectar de manera apreciable la cantidad total de RSM, salvo los provenientes de los mercados y de los visitantes, cuando existen atractivos turísticos.

Cuando se desea implementar un sistema de recolección, tratamiento y disposición final, es necesario estimar las cantidades de residuos que la población genera. Con el objetivo de facilitar esto y ahorrar recursos, se sugiere utilizar para estos análisis métodos indirectos como los que se presentan a continuación.

La cantidad de residuos que genera cada persona (producción per cápita), se puede estimar globalmente aplicando la siguiente fórmula:

$$Ppc = DSr \text{ en una semana} / (\text{pob} \times 7 \times Cob)$$

Donde:

Ppc = producción por habitante por día (kg/hab/día)

DSr = Cantidad de RSM recolectados en una semana (kg/sem)

Pob = población total (hab)

7 = días de la semana

Cob = cobertura del servicio de aseo (%)

La cobertura del servicio se obtiene al dividir la población atendida (# de personas a las cuales se les recolectan los residuos) entre la población total:

$$\text{Cobertura del servicio (\%)} = \frac{\text{Población atendida (hab)}}{\text{población total (hab)}}$$

Hay que señalar que también es posible relacionar la cantidad de RSM generados con

el número de viviendas, o sea, kg/vivienda/día, dado que la basura es producida por vivienda. Esto además, tiene la ventaja de facilitar el conteo de las casas.

Con base en muestreos de RSM realizados en algunas poblaciones pequeñas, rurales y áreas marginales de América latina, se ha encontrado que la ppc presenta rangos de entre 0.2 y 0.6 kg/hab/día.

- **Producción Total:** Conocer la producción total de RSM permite decidir sobre cuál es el equipo de recolección más adecuado, la cantidad de personal necesario, las rutas, la frecuencia de recolección, la necesidad de área para el tratamiento y la disposición final, los costos y el establecimiento de la tarifa de aseo.

La producción de RSM está dada por la relación:

$$DS_d = \text{Pob} \times \text{pcc}$$

Donde:

$DS_d$  = cantidad de RSM producidos por día (kg/día)

Pob = población total (habitantes)

pcc = producción per cápita (kg/hab-día)

- **Proyección de la producción total:** La producción anual de RSM debe estimarse con base en las proyecciones de la población y la producción per cápita.
- Se puede calcular el crecimiento de la población mediante métodos matemáticos, pero en lo que se refiere al crecimiento de la ppc difícilmente se encuentran cifras que den idea de cómo puede variar anualmente. No obstante, para obviar este punto y sabiendo que con el desarrollo y el crecimiento urbano y comercial de la población los índices de producción aumen-

### PROYECCIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y PROCEDENCIA DE LOS DESECHOS SÓLIDOS MUNICIPALES (T/AÑO)

Año	Población habitantes	ppc Promedio total kg/hab/día	Residencial	Comercial	Mercado	Industrial	Barrido	Otros	Total
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
Total									

tan, se recomienda calcular la producción per capita total para cada año, con un incremento entre 0.5 y 1% anual. Los resultados podrían presentarse en un cuadro como el anterior.

#### CARACTERÍSTICAS DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS EN PEQUEÑAS POBLACIONES

Los parámetros más importantes que debemos conocer para el manejo adecuado de los residuos sólidos municipales (RSM) que se producen en una población son, la producción (cantidad de residuos generados por la población) y sus características específicas (origen, composición física y densidad).

#### Origen o procedencia

Los RSM de las áreas urbanas de las pequeñas poblaciones se pueden clasificar según su procedencia en: residencial, comercial, industrial, barrido de vías y áreas públicas, mercado e institucional.

Los valores obtenidos pueden presentarse utilizando un cuadro como el mostrado anteriormente.

**i) sector residencial:** La basura residencial (o desechos sólidos domésticos) está compuesta principalmente de papel, cartón, latas, plásticos, vidrios, trapos y materia orgánica.

**ii) Sector Comercial:** Con algunas excepciones (poblaciones en las zonas fronterizas y sitios turísticos), el comercio no representa altos índices en la producción de RSM, dado que en estas localidades no está muy desarrollado y la actividad comercial suele combinarse con la vivienda. La composición de los desechos de la actividad comercial en estas comunidades es similar a la del tipo residencial, sin bien predominan los materiales de empaque (papel, cartón, vidrio, plástico, textil y madera).

**iii) Sector Industrial:** Suele ser baja y de tipo artesanal, compatible con el uso residencial, de manera que es de esperar que sus desechos sólidos no presenten características especiales. Por ende, salvo pocas excepciones, la cantidad de estos residuos (producción) no es significativa para el análisis de las pequeñas poblaciones.

**iv) Plaza de mercado:** Presenta un carácter más definido, dado que allí se concentran los expendios de carne, pescado, vegetales, frutas, abarrotes y otros, lo que indica que gran parte de los residuos es de materia orgánica y solo una muy pequeña es material de empaque; para estos desechos puede ser recomendable la producción de compostaje con métodos manuales.

**v) Barrido de vías y áreas públicas:** El servicio de barrido de vías y limpieza de áreas públicas –tales como el parque principal, los alrededores de la plaza de mercado, ferias y playas- contribuyen a la producción de desechos. Estos están compuestos básicamente de hojas, hierba, cáscaras de frutas, además de papeles, plásticos, latas vidrios, palos y un alto contenido de tierra.

**vi) Sector Institucional:** Para el caso de establecimientos especiales como escuelas y colegios, se puede considerar, sin gran margen de error, que la generación de desechos sólidos no es muy significativa con respecto al resto; y que su composición es similar a las anteriores.

Los hospitales o centros de salud en estas poblaciones suelen ser instituciones clasificadas como del primer nivel de atención, poco especializadas y con un mínimo número de camas, aunque en algunos casos son de mediana magnitud. De ahí que no incidan de manera significativa en la generación total de residuos sólidos que

producen. Sin embargo, es necesario distinguir entre los residuos clasificados como de origen residencial (limpieza, cocina, basura común) y los originados por las actividades específicas del centro de salud y que son potencialmente infecciosos: materiales punzocortantes y de curación, vísceras provenientes del quirófano, etc., todos estos residuos llamados biológicos-infecciosos, requieren un manejo, un tratamiento y una disposición final especiales.

En el centro de salud, estos residuos deben ser separados y presentados en bolsas cerradas de polietileno de color rojo; también se debe evitar el derrame de su contenido y su contacto con el personal de recolección, aún cuando esté provisto de guantes y ropa adecuada. Su tratamiento y disposición final pueden realizarse mediante la incineración o el enterramiento en una fosa especial que esté dentro del establecimiento. En este último caso, dicha fosa debe ser de suelo arcilloso, cuyo fondo se encuentre por lo menos a un metro del manto freático para evitar el contacto con el agua.

De ser recogidos por la municipalidad, deben tomarse las debidas medidas de protección del personal que los recolecta y su disposición final podrá realizarse en el relleno sanitario manual, de preferencia colocándolo apenas lleguen en una celda especial, en su defecto, al pie del talud en la parte inferior de la celda, para de inmediato cubrirlos con tierra y el resto de los residuos sólidos.

### Composición Física y Química

La composición física de los residuos sólidos municipales (RSM) está caracterizada por su alto porcentaje de materia orgánica (entre 50 y 70% del total de residuos), lo que se traduce en un mayor contenido de humedad con valores que fluctúan entre 35 y 55%; el resto es papel, cartón, vidrio, metales, plásticos y material

inerte, entre otros. Conocer la composición física de los RSM de estas pequeñas poblaciones tiene importancia para evaluar la factibilidad de establecer programas de reciclaje y tratamiento, dado que la composición química no reviste mayor atención y que el método de disposición final se realiza a través de la técnica del relleno sanitario, con el que se procurará minimizar la generación de lixiviado.

### Densidad

El peso volumétrico de los RSM es otro parámetro importante para el diseño del sistema de disposición final de residuos. En los países de América latina se tienen valores de entre 200 y 300 kilogramos por metro cúbico para la basura suelta (no compactada), es decir en el recipiente en que se coloca la basura ; tales valores son mayores que los que se presentan en los países industrializados. Para calcular las dimensiones de la celda diaria y el volumen del relleno se pueden usar las densidades que figuran en el siguiente cuadro. Estas densidades se alcanzan con la compactación homogénea y, a medida que se estabiliza el relleno, con todo lo que incide en la estabilidad y vida útil del sitio.

DENSIDAD DE DISEÑO DE LA CELDA DIARIA Y DEL RELLENO SANITARIO MANUAL	
DISEÑO	DENSIDAD kg/m <sup>3</sup>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Celda diaria (basura recién compactada manualmente)</li> </ul>	400- 500
<ul style="list-style-type: none"> <li>Volumen del relleno (basura estabilizada en el relleno manual)</li> </ul>	500-600

El aumento de la densidad del relleno sanitario manual se logra especialmente mediante:

- El apisonado manual, con el uso diario de rodillo o los pisonos de mano.
- El tránsito del vehículo recolector por encima de las celdas ya conformadas.
- La separación y recuperación de papel, cartón, plástico, vidrio, chatarra, madera y otros materiales voluminosos. Con la práctica del reciclaje se disponen menos RSM en el relleno y, en consecuencia, se aumenta su vida útil.
- Otros mecanismos que aumentan la densidad de los desechos sólidos son: el proceso de descomposición de la materia orgánica y el peso propio de las capas o celdas superiores que producen mayor carga y, obviamente, disminuyen su volumen.

### CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO

La geología y características específicas del terreno son algunos de los factores más importantes que hay que tener en cuenta a la hora de seleccionar el sitio. Gracias a estos se puede obtener información acerca del posible desplazamiento de las infiltraciones de agua y de una eventual contaminación de las aguas superficiales y subterráneas. Al mismo tiempo, el estudio del suelo permite evaluar la estabilidad del terreno, la localización, y calidad del banco de material de cobertura.

Sin lugar a dudas, en los proyectos de relleno sanitario para grandes ciudades estos análisis tienen una importancia capital y deben ser una exigencia básica en cualquier estudio; pero para el caso de comunidades muy pequeñas, no es necesario ser demasiado rigurosos si, como ya se dijo, se considera la reducida magnitud de las obras y el tipo de residuos que generan. En

lo posible, se debe recurrir a los servicios de un geólogo o de otro profesional con conocimientos en estos temas.

Los estudios de campo para poblaciones con menos de 5,000 habitantes pueden consistir solo en posibles pruebas de percolación y análisis del suelo.

### CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS

La precipitación pluvial, la evaporación, la temperatura y la dirección del viento son los principales datos climatológicos que se deben recopilar para establecer especificaciones de diseño de la infraestructura del relleno sanitario.

### IDENTIFICACIÓN DE NORMAS VIGENTES

Otro aspecto que quien va a diseñar un relleno sanitario no debe pasar por alto es la consulta de las normas vigentes, tanto para el diseño, la construcción del relleno y de las obras de infraestructura, como para tener en cuenta las obligaciones con la autoridad ambiental en relación con las condiciones y restricciones que debe tener el proyecto, a fin de evitar o mitigar posibles efectos negativos debidos a la construcción y operación de la obra. Hay que advertir, no obstante, que en estos casos las autoridades locales, ambientales y de salud deben tener presente que se trata de un pequeño proyecto de saneamiento y no de una obra de gran envergadura destinada a una ciudad.

### CÁLCULO DEL VOLÚMEN NECESARIO PARA EL RELLENO SANITARIO

Los requerimientos de espacio del relleno sanitario están en función de:

- La producción total de RSM
- La cobertura de recolección (la condición crítica de diseño es recibir el 100% de los residuos generados).
- La densidad de los RSM estabilizados en el relleno sanitario manual.

- La cantidad del material de cobertura (20-25%) del volumen compactado de RSM.

### Volumen de residuos sólidos

Con los dos primeros parámetros mencionados en el párrafo anterior, es posible estimar el volumen diario y anual de RSM compactados y estabilizados que se requiere disponer (ver cuadro “Volumen y área requerida para el relleno sanitario” columnas 6, 8 y 10), es decir:

$$\begin{aligned} V_{\text{diario}} &= DC_p \cdot D_{\text{rsm}} \\ V_{\text{anual compactado}} &= V_{\text{diario}} \times 365 \end{aligned}$$

Donde:

$V_{\text{diario}}$  = volumen RSM por disponer en un día ( $\text{m}^3/\text{día}$ )

$V_{\text{anual}}$  = volumen de RSM en un año ( $\text{m}^3/\text{año}$ )

$DS_p$  = Cantidad de RSM producidos ( $\text{kg}/\text{día}$ )

365 = equivalente a un año (días)

$D_{\text{rsm}}$  = Densidad de los RSM recién compactados ( $400\text{-}500 \text{ kg}/\text{m}^3$ ) y del relleno estabilizado ( $500\text{-}600 \text{ kg}/\text{m}^3$ ).

### Volumen del material de cobertura

$$m. c. = V_{\text{anual compactado}} \times (0.20 \text{ ó } 0.25)$$

Donde:

m. c. = material de cobertura, el cual se estima considerando que es del 20 al 25% del volumen de los desechos recién compactados.

### Volumen del relleno sanitario

Con las fórmulas anteriores se puede calcular el volumen del relleno sanitario para el primer año, así:

$$V_{\text{RS}} = V_{\text{anual estabilizado}} + m. c.$$

Donde:

$V_{\text{RS}}$  = volumen del relleno sanitario ( $\text{m}^3/\text{año}$ )

m. c. = material de cobertura (20 a 25% del volumen recién compactado de RSM).

Los datos obtenidos se vacían en el cuadro “*volumen y área requerida para el relleno sanitario*”, columna 11.

Para conocer el volumen total que ocupará el relleno durante su vida útil, se aplica la siguiente fórmula:

$$V_{RSvu} = \sum_{i=1}^n V_{RS}$$

Donde:

$V_{RSvu}$  = volumen relleno sanitario durante la vida útil ( $m^3$ )  
 $n$  = número de años.

Que serían los datos que aparecen en la columna 12 del cuadro “*volumen y área requerida para el relleno sanitario*” es decir, los valores acumulados anualmente.

### CÁLCULO DEL ÁREA REQUERIDA

Con el volumen se puede estimar el área requerida para construir el relleno sanitario, con la profundidad o altura que tendría el relleno. Sin embargo, esta altura solo se conocerá si se tiene una idea general de la topografía del terreno donde se construirá el relleno.

El relleno sanitario manual debe proyectarse para un mínimo de cinco años y un máximo de diez. Sin embargo, algunas veces es necesario diseñarlo para menos de cinco años si se considera la dificultad de encontrar terrenos disponibles. Este tiempo se llama vida útil o período de diseño.

El área requerida para construir un relleno sanitario manual depende principalmente de los siguientes factores:

- Cantidad de RSM que se deberá disponer;
- Cantidad de material de cobertura;
- Densidad de compactación de los RSM;
- Profundidad o altura del relleno sanitario;
- Áreas adicionales para obras complementarias.

A partir de la ecuación que calcula  $V_{RS}$  podremos estimar las necesidades de área (ver cuadro “*volumen y área requerida para el relleno sanitario*”, columna 13):

$$A_{RS} = V_{RS} / h_{rs}$$

Donde:

$V_{RS}$  = Volumen de relleno sanitario ( $m^3/año$ )  
 $A_{RS}$  = área por rellenar sucesivamente ( $m^2$ )  
 $h_{rs}$  = altura o profundidad media del relleno sanitario (m)

El área total requerida (ver cuadro “*volumen y área requerido para el relleno sanitario*”, columna 14) será:

$$A_t = F \times A_{RS}$$

Donde:

$A_t$  = área total requerida ( $m^2$ )  
 $F$  = Factor de aumento del área adicional requerida para las vías de penetración, áreas de retiro de linderos, caseta para portería e instalaciones sanitarias, patio de maniobras, etc. Esto es entre 20-40% del área que se deberá rellenar.

En el cuadro “*volumen y área requerida para el relleno sanitario*” se incorporan los parámetros mencionados para el cálculo del volumen del relleno sanitario. Se podrá estimar el área para cada sitio alternativo solo recién cuando se conozca la profundidad promedio del relleno.

### CÁLCULO DE LA CELDA DIARIA

Como se sabe, la celda diaria está conformada básicamente por los RSM y el material de cobertura y se requiere dimensionarla con el objeto de economizar tierra, sin perjuicio del recubrimiento y con el fin de que proporcione un frente de trabajo suficiente para la descarga y maniobra de los vehículos recolectores.

Las dimensiones y el volumen de la celda diaria dependen de factores tales como:

- La cantidad diaria de RSM que se debe disponer.
- El grado de compactación.
- La altura de celda más cómoda para el trabajo manual.
- El frente de trabajo necesario que permita la descarga de los vehículos de recolección.

Para la celda diaria se recomienda una altura que fluctúe entre 1 y 1.5 metros, esto debido a la baja compactación que se alcanza con la operación manual, y también con el fin de brindar una mayor estabilidad mecánica a la construcción de los terraplenes del relleno sanitario.

A partir del volumen diario de desechos compactados y teniendo en cuenta las limitaciones de altura, se calcula el avance y el ancho de la celda, procurando mantener un frente de trabajo lo más estrecho posible.

### Cantidad de RSM que se debe disponer

La cantidad de basura para diseñar la celda diaria se puede obtener a partir de la cantidad de basura producida diariamente, es decir:

$$DS_{rs} = DS_p \times (7/d_{hab})$$

Donde:

$DS_{rs}$  = Cantidad media diaria de RSM en el relleno sanitario (kg/día)

$DS_p$  = Cantidad de RSM producidos por día (kg/día)<sup>59</sup>

$d_{hab}$  = días hábiles o laborables en una semana (normalmente de 5 a 6 días, aún menos en los municipios más pequeños).

### Volumen de la celda diaria

$$V_c = (DS_{rs}/D_{rsm}) \times m. c.$$

<sup>59</sup> Debe considerarse que el volumen diario de RSM, se incrementará cada año y en consecuencia también lo hará el tamaño de la celda, lo que indica que debe ser necesario reevaluar anualmente la mano de obra requerida.

Donde:

$V_c$  = volumen de la celda diaria (m<sup>3</sup>)

$D_{rsm}$  = densidad de los RSM recién compactados en el relleno sanitario manual, 400-500 kg/m<sup>3</sup>

m. c. = material de cobertura (20-25%)

Debe notarse que la densidad usada para la basura recién compactada es menor que la de la basura estabilizada que se emplea para el cálculo del volumen.

### Dimensiones de la celda diaria

$$\text{Área de la celda: } A_c = V_c/h_c$$

Donde:

$A_c$  = Área de la celda (m<sup>2</sup>/día)

$h_c$  = Altura de la celda (m) –límite 1.0 a 1.5m. Flintoff reporta alturas entre 1.5 y 2.0 metros para rellenos sanitarios con operación manual, con lo que disminuye el material de cobertura.

$$\text{Largo o avance de la celda (m) : } L = A_c/a$$

Donde:

$a$  = ancho que se fija de acuerdo con el frente de trabajo necesario para descargar la basura por los vehículos recolectores (m). Debe tenerse en cuenta que en pequeñas comunidades serán uno o dos vehículos como máximo los que descarguen a la vez, lo que determina el ancho entre 3 y 6m.

Como los taludes (perímetro) también deben ser cubiertos de tierra, la relación del ancho con el largo de la celda que menos material de cobertura requerirá sería la de un cuadrado. Se trata entonces, de la raíz cuadrada del área de la celda:

$$a = L = \sqrt{A_c}$$

Cuando esto no se cumple por el ancho resultante demasiado estrecho para la descarga de los vehículos, entonces se fija primero el ancho y luego se calcula el avance, como se explico en la fórmula de  $A_c$ .

## CÁLCULO DE LA MANO DE OBRA

La mano de obra necesaria para conformar la celda diaria depende de:

- La cantidad de RSM que se debe disponer.
- La disponibilidad y el tipo de material de cobertura.
- Los días laborables en el relleno.
- La duración de la jornada diaria.
- Las condiciones del clima.

- La descarga de los residuos en el frente de trabajo según la distancia.
- El rendimiento de los trabajadores.

El siguiente cuadro es una guía para calcular el número de trabajadores necesarios en el relleno sanitario manual. En ella se considera una jornada de ocho horas diarias, con un tiempo efectivo de trabajo de seis horas. Estos rendimientos son bajo condiciones normales de trabajo y pueden variar en cada lugar según los factores descritos anteriormente.

GUÍA DE CÁLCULO PARA ESTIMAR EL NÚMERO DE TRABAJADORES			
Operación	Rendimientos		Hombre/día
Movimiento de desechos	$\frac{\text{Desechos sólidos (t/día)}}{(0,95)^a \text{t/hora-hombre}}$	$\times \frac{1}{6 \text{ horas}}$	
Compactación de desechos	$\frac{\text{Área superficial (m}^2\text{)}}{(20)^a \text{m}^2/\text{hora-hombre}}$	$\times \frac{1}{6 \text{ horas}}$	
Movimiento de tierra	$\frac{\text{Tierra m}^3}{(0,35 \text{ a } 0,70)^a \text{tm}^3/\text{hora-hombre}}$	$\times \frac{1}{6 \text{ horas}}$	
Compactación de la celda	$\frac{\text{Área superficial (m}^2\text{)}}{(20)^a \text{m}^2/\text{hora-hombre}}$	$\times \frac{1}{6 \text{ horas}}$	
<b>(Total hombres)</b>			

Flintoff reporta los siguientes requerimientos de mano de obra de tres sitios en los cuales se operaron rellenos sanitarios manualmente

Las densidades de los desechos distribuidos en estos lugares fluctuaron entre 250 y 400 kilogramos por metro cúbico; así, para un tonelaje dado, el volumen que se debe manejar podría ser similar o mayor que en los países en desarrollo.

El siguiente cuadro indica la escala probable de los requerimientos de mano de obra y material de cobertura con una tasa de generación y densidad típicas en América Latina.

RENDIMIENTOS REPORTADOS DE OTRAS EXPERIENCIAS		
Sitio	t/día	Rendimiento
1	30	2 hombres/ 15 t/hombre-día
2	50	6 hombres/ 8 t/hombre-día
3	100	10 hombres/ 10 t/hombre-día

REQUERIMIENTOS PROBABLES DE MANO DE OBRA					
Población Hab	Volumen (m3/día)				
	t/día (ppc=0,5 kg/hab/día)	Bas. Suelta (330 kg/m3)	Bas. Comp. (500 kg/m3)	Material de cobertura m3	Hombres
20,000	10	30	20	4	4
50,000	25	75	50	10	10
100,000	50	150	100	20	19

Además del número de hombres que ejecutarán las labores propias de la construcción del relleno, es necesaria otra persona que dirija y oriente las operaciones en el relleno sanitario manual en calidad de supervisor. Teniendo en cuenta que contar con un profesional capacitado en el manejo de RSM sería costoso en algunos municipios, se recomienda contratar un individuo que sea:

- Técnico, con secundaria completa y que sepa realizar operaciones matemáticas, o
- Promotor de salud, que sepa realizar operaciones matemáticas y que tenga cierta experiencia en el ramo.

Cabe anotar que la presencia del supervisor en el relleno sanitario es importante durante casi toda la jornada laboral en los primeros meses. Conforme adquiera mayor experiencia, es posible reducir a dos horas diarias su tiempo de permanencia en el lugar; una hora en la mañana y otra en la tarde. El resto del día lo podría dedicar a la supervisión del aseo urbano en general.

En última instancia, esta labor de supervisión puede ser llevada a cabo por el jefe de Obras Públicas del municipio (o de la Oficina Municipal de Planificación –OMP-).

### PROYECTO PAISAJÍSTICO

El relleno sanitario manual también debe tener consideraciones estéticas y paisajísticas, para que una vez concluida

su vida útil, pueda integrarse al ambiente natural y se armonice con el entorno.

La cobertura final de tierra compactada debe tener de 0.4 a 0.6 metros, como mínimo. Los drenajes de aguas de escorrentía y gases son esenciales para la vida vegetal sobre el relleno, la que se restringe a especies de raíces cortas mientras el relleno se estabiliza.

Se recomienda sembrar en toda el área arbustos de raíces cortas que no traspasen la cobertura. Se admite también el plantío en hoyos rellenos con tierra abonada más pasto o grama, a fin de evitar la erosión y el aumento de lixiviado. A medida que se terminen algunas áreas de relleno, conviene sembrar el pasto sin esperar a que se acabe toda la superficie de las plataformas o terraplenes.

### ANÁLISIS DE IMPACTOS SOCIOAMBIENTALES

Los análisis de impactos ambientales buscan identificar anticipadamente los efectos positivos y negativos que tiene todo proyecto de relleno sanitario en sus distintas fases: selección del sitio, construcción, operación y clausura.

La medición de los impactos debe ser interdisciplinaria y realizarse en los componentes naturales tanto del sitio como del entorno (agua, suelo y aire), al igual que en las variables de tipo económico y social. En el siguiente cuadro se presentan los principales aspectos socio ambientales asociados con las etapas del proyecto de un relleno sanitario.

## ASPECTOS SOCIOAMBIENTALES ASOCIADOS A UN PROYECTO DE RELLENO SANITARIO MANUAL

Etapa del Proceso	Fuente/ Actividad										
	Suelo		Agua		Aire			Salud	Social		
	Desvalorización del terreno y los predios vecinos	Contaminación visual	Superficial	Subterránea	Ruido	Olores	Humo	Polvo	Material disperso	Vectores	Vecinos
Selección del sitio											
Usos del suelo											
Opinión pública											
Vía de acceso y tráfico vehicular											
Dirección del viento											
Costos del terreno											
Relleno sanitario manual											
Generación de empleo											
Turismo											
Preparación del terreno											
Camino de acceso											
Desvío de aguas											
Canal perimetral											
Construcción											
Caminos internos											
Adecuación de la plataforma											
Excavación de zanjas											
Caseta (portería e instalaciones sanitarias)											
Operación y manto											
Tipo de residuos											
Recepción de residuos											
Compactación de residuos											
Cobertura diaria											
Drenajes (gases y lixiviado)											
Manejo de lixiviado											
Clausura del relleno											
Cobertura final											
Uso futuro											



Fotografía cortesía de Rosario Castro