



**ESCUELA POLITÉCNICA  
SUPERIOR  
DE SEVILLA**



**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**TÍTULO DEL PROYECTO**

**DESARROLLO DE UN MANUAL DE CONSTRUCCIÓN DE UN  
RELLENO SANITARIO PILOTO DE RESIDUOS SÓLIDOS  
URBANOS CON SISTEMA NATURAL DE ALTA VELOCIDAD**



Relleño sanitario



**ALUMNO: Dolores Carmona Merat**  
**ESPECIALIDAD: I.T.I. Química**  
**DIRECTOR: Julián Lebrato, Laura Pozo**  
**CONVOCATORIA: Junio 2015**

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>4</b>
<b>1. RELLENO SANITARIO</b>	<b>5</b>
1.1. DEFINICIÓN DE RELLENO SANITARIO O VERTEDERO CONTROLADO	5
1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS RELLENOS SANITARIOS	5
1.2.1. Relleno Sanitario Manual	5
1.2.2. Relleno Sanitario Semi-Mecanizado	6
1.2.3. Relleno Sanitario Mecanizado	6
<b>2. GESTIÓN Y TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS</b>	<b>6</b>
2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS	7
2.2. DEFINICIÓN DE RESIDUO SÓLIDO URBANO (RSU)	8
2.3. COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)	8
2.4. TRATAMIENTO BIOLÓGICO	9
<b>3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO</b>	<b>10</b>
3.1. EMPLAZAMIENTO	10
3.2. CLIMA	11
3.3. HIDROGRAFÍA	12
3.4. VEGETACIÓN	13
3.4.1. Especies herbáceas	13
3.4.2. Especies leñosas	13
<b>4. DISEÑO DE INFRAESTRUCTURA</b>	<b>14</b>
4.1. RESIDUOS ACEPTABLES E INACEPTABLES	14
4.2. SELECCIÓN DEL MÉTODO	14
4.3. CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE RESIDUO A DISPONER	17
4.4. CÁLCULO DEL VOLUMEN NECESARIO	19
4.4.1. Volumen de Residuo Sólido	19
4.4.2. Volumen del Relleno Sanitario	20
4.4.3. Área requerida	21
4.5. CÁLCULO DEL VOLUMEN DE LA ZANJA	23
4.6. DIMENSIONES DE LA ZANJA	23

<b>4.7. CÁLCULO DE LA VIDA ÚTIL</b>	<b>24</b>
<b>4.8. CÁLCULO DE LA GENERACIÓN DE LIXIVIADO</b>	<b>25</b>
<b>4.9. CÁLCULO DE LA GENERACIÓN DE GASES</b>	<b>27</b>
4.9.1. Drenaje del gas de Relleno	28
<b>4.10. CÁLCULO DEL CAUDAL DE ESCORRENTIA SUPERFICIAL</b>	<b>40</b>
<b>4.11. DISTRIBUCIÓN GENERAL DE LA INFRAESTRUCTURA</b>	<b>40</b>
<b>5. CONSTRUCCIÓN</b>	<b>41</b>
<b>5.1. PREPARACIÓN DEL SITIO</b>	<b>41</b>
5.1.1. Limpieza y desmonte	41
5.1.2. Tratamiento del suelo	42
<b>5.2. PROCESO CONSTRUCCTIVO</b>	<b>45</b>
5.2.1. Herramientas	45
5.2.2. Construcción de trincheras	48
5.2.3. Construcción de drenes de lixiviados en trincheras	48
5.2.4. Construcción de drenes de lixiviados en plataformas	49
5.2.5. Construcción de celdas	50
5.2.5.1 Material de cobertura	52
5.2.5.2 Compactación	55
5.2.6. Construcción de chimeneas	56
<b>6. OPERACIÓN DE RELLENO SANITARIO</b>	<b>57</b>
<b>6.1. DEL PERSONAL</b>	<b>57</b>
<b>6.2. OPERACIONES DE DISPOSICIÓN FINAL</b>	<b>59</b>
<b>6.3. OPERACIONES DE MANTENIMIENTO</b>	<b>66</b>
<b>6.4. CIERRE Y POST-CIERRE</b>	<b>67</b>
<b>6.5. USO FUTURO DEL ÁREA DESPUÉS DEL CIERRE</b>	<b>68</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>70</b>

## **INTRODUCCIÓN**

Los problemas ocasionados por un inadecuado manejo de los residuos están afectando, tanto a las grandes ciudades y sus zonas marginales, así como a las poblaciones rurales. En muchos municipios, el manejo del servicio de recogida de basura, se realiza con una evidente falta de criterios técnicos, económicos y sociales, ocasionando que este servicio carezca de una adecuada planificación y organización, traduciéndose en altos costos de funcionamiento, que las mismas municipalidades han tenido que subsidiar consumiendo buena parte de su presupuesto.

Un Relleno Sanitario constituye una solución a esta problemática, pues es una técnica de eliminación final de los desechos sólidos en el suelo, que no causa molestia ni peligro para la salud y seguridad pública; tampoco perjudica el ambiente durante su operación ni después de terminado, confina la basura en un área lo más pequeña posible, cubriéndola con capas de tierra diariamente y compactándola para reducir su volumen.

En este manual se trata de desarrollar criterios estándar para el diseño y el manejo de Rellenos Sanitarios. Se considera el caso de municipios que deben operar su relleno casi completamente a mano.

El documento no incluye la construcción y el manejo de rellenos especiales para desechos peligrosos (industriales u hospitalarios). Se trata únicamente de la disposición final de los desechos domiciliarios.

El Relleno Sanitario Manual es una tecnología que se aplica cuando la mano de obra está disponible más fácilmente que la maquinaria que haría el mismo trabajo. Los obreros del Relleno Sanitario Manual realizan todas actividades a mano: descarga, colocación, compactación y cubierta de los desechos, así como el mantenimiento de cunetas, construcción de chimeneas y drenajes, excavación de nuevos módulos etc.

La tecnología del relleno manual tiene sus límites. La compactación del material es menos eficiente, y por consecuencia, la estabilidad del cuerpo de basura no permite alturas elevadas. Esta situación provoca la necesidad de un mayor espacio para su construcción con el consecuente aumento en la producción de aguas lixiviadas. No obstante estas desventajas, suele ser la solución más conveniente para municipios y comunidades pequeñas, municipios ubicados en sitios aislados y municipios con fondos escasos.

Este manual incluye la recopilación necesaria para una propuesta del diseño y factibilidad para la construcción y operación de un Relleno Sanitario Manual para el municipio de Kimpese, ubicado en La República Democrática del Congo. Este Relleno Sanitario es un proyecto destinado a la disposición de los residuos sólidos que se generan en dicho municipio, ayudando a resolver en gran parte, los problemas que se generan por una mala disposición de los residuos sólidos.

## **1. RELLENO SANITARIO**

### **1.1. DEFINICIÓN DE RELLENO SANITARIO O VERTEDERO CONTROLADO**

Un Relleno Sanitario o vertedero controlado es un agujero en el que se compacta e impermeabiliza tanto el fondo como los laterales. En estos rellenos la basura se coloca en capas y se recubre todos los días con una delgada capa de tierra para dificultar la proliferación de ratas y malos olores y disminuir el riesgo de incendios.

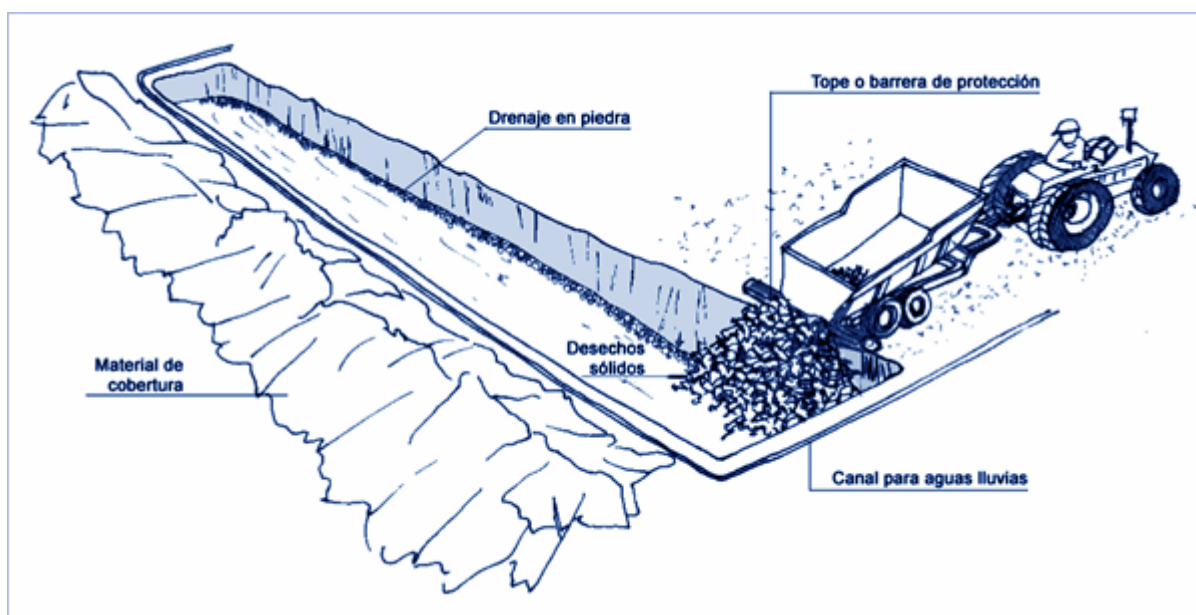


Figura 1 Relleno Sanitario

### **1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS RELLENOS SANITARIOS**

Los Rellenos Sanitarios pueden ser manuales, semi-mecanizados y mecanizados.

#### **1.2.1. Relleno Sanitario Manual**

El Relleno Sanitario Manual se presenta como una alternativa técnica y económica, tanto para las poblaciones urbanas y rurales menores de 40,000 habitantes, como para las áreas marginales de algunas ciudades que generan menos de 20 toneladas diarias de basura.

Mediante la técnica de la operación manual, sólo se requiere equipo pesado para la adecuación del sitio y la construcción de vías internas y excavación de zanjas o material de cobertura, de acuerdo con el avance y método de relleno. En cuanto a los demás trabajos, todos pueden realizarse manualmente, lo cual permite a estas poblaciones de bajos recursos, sin posibilidades

de adquirir y mantener equipos pesados permanentes, disponer adecuadamente sus basuras y utilizar la mano de obra que en países en desarrollo es bastante abundante.

### **1.2.2. Relleno Sanitario Semi-Mecanizado**

Tiene todas las características básicas de un relleno, diseñado, construido y operado para poblaciones hasta de 100,000 habitantes, para ciudades que generan entre 20 y 40 toneladas diarias de basura. Se requiere de equipo pesado para la adecuación del sitio y la construcción de vías internas y excavación de zanjas o material de cobertura, de acuerdo con el avance y método de relleno. En cuanto a los demás trabajos de esparcido, compactación y cobertura de los residuos se realizan con el apoyo de equipo mecánico, siendo posible también el empleo de herramientas manuales para complementar los trabajos de confinamiento de residuos.

### **1.2.3. Relleno Sanitario Mecanizado**

Las operaciones en este tipo de relleno se realizan íntegramente a través de equipos pesados, ya sea en forma parcial o permanente, la utilización de estos equipos se realiza cuando la producción diaria de desechos sólidos es de 40 o más toneladas.

## **2. GESTIÓN Y TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS**

La gestión de los Residuos Sólidos Urbanos se puede definir como el conjunto de operaciones necesarias para dar a los residuos el destino más adecuado desde el punto de vista medioambiental y sanitario. Es un problema complejo, ya que depende de diversos factores: científico, técnico, económico y social.

La Unión Europea establece como objetivo prioritario la reducción en la producción y peligrosidad de los residuos (prevención-minimización), en segundo lugar, la recuperación y el reciclaje de los materiales y contenidos energéticos de los residuos (valorización), y por último la eliminación segura de los residuos no valorizables.

- **Prevención-Minimización.** Consiste en disminuir el volumen de residuos generados y la toxicidad y/o peligrosidad de los mismos.
- **Valorización.** Se efectúa consiguiendo que los residuos generados pasen a ser subproductos, reciclando los materiales, o aprovechando los materiales y energía contenidos en ellos.
- **Eliminación.** Las técnicas más utilizadas para la eliminación de los RSU son el vertido y la incineración sin recuperación de energía.

## **2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS**

Los Residuos Sólidos pueden clasificarse, por su fuente o procedencia, en:

### *- Residuos residenciales o domiciliarios*

Producto de actividades domésticas o de viviendas, principalmente se generan residuos orgánicos, papel, plástico, vidrio, cartones, telas.

### *- Residuos de servicios o residuos comerciales*

Referidos principalmente a actividades tales como restaurantes, tiendas, mercados, comercio en general, hoteles, instituciones de servicios y oficinas, entre otros. La producción más común es de materia orgánica, papel, metal, vidrio, plástico y los volúmenes son generalmente grandes y de manejo más complejo.

### *- Residuos de actividades al aire libre*

Se encuentran en esta clasificación los desechos provenientes de actividades humanas realizadas al aire libre, como manifestaciones, conciertos musicales, actividades políticas, circulación, etc. Se encuentran bolsas plásticas, restos de alimentos, papeles, vidrios, envases plásticos, etc.

### *- Residuos industriales*

Se generan por actividades donde se procesan materias primas, tales como madera, papel, cuero, químicos, plásticos, metales, lodos residuales, entre otros tipos de residuos.

### *- Residuos agropecuarios*

Son producidos por actividades relacionadas con la agricultura y la producción pecuaria, encontrándose residuos de semillas, fertilizantes, cuero, ramas, escombros vegetales, restos de animales sacrificados y alimentos de animales, entre otros desperdicios.

Los residuos pueden clasificarse, atendiendo a su origen, en tres grandes grupos:

- Residuos del sector primario:
  - Agrícolas, ganaderos y forestales
  - Mineros
- Residuos del sector secundario:
  - Industriales
- Residuos del sector terciario: (La distribución, los servicios y el consumo)
  - Urbanos

Se llaman urbanos a estos últimos por ser propios de la urbe y su gestión función de los Ayuntamientos, aunque dentro del recinto urbano se generen residuos industriales, e incluso agrícolas.

## **2.2. DEFINICIÓN DE RESIDUO SÓLIDO URBANO (RSU)**

Los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) son aquellos residuos generados en los domicilios particulares, comercios, oficinas y servicios, así como todos aquellos que no tengan la calificación de peligrosos y que por su naturaleza y composición puedan asimilarse a los producidos en los anteriores lugares o actividades.

### **PROCEDENCIA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (R.S.U.)**

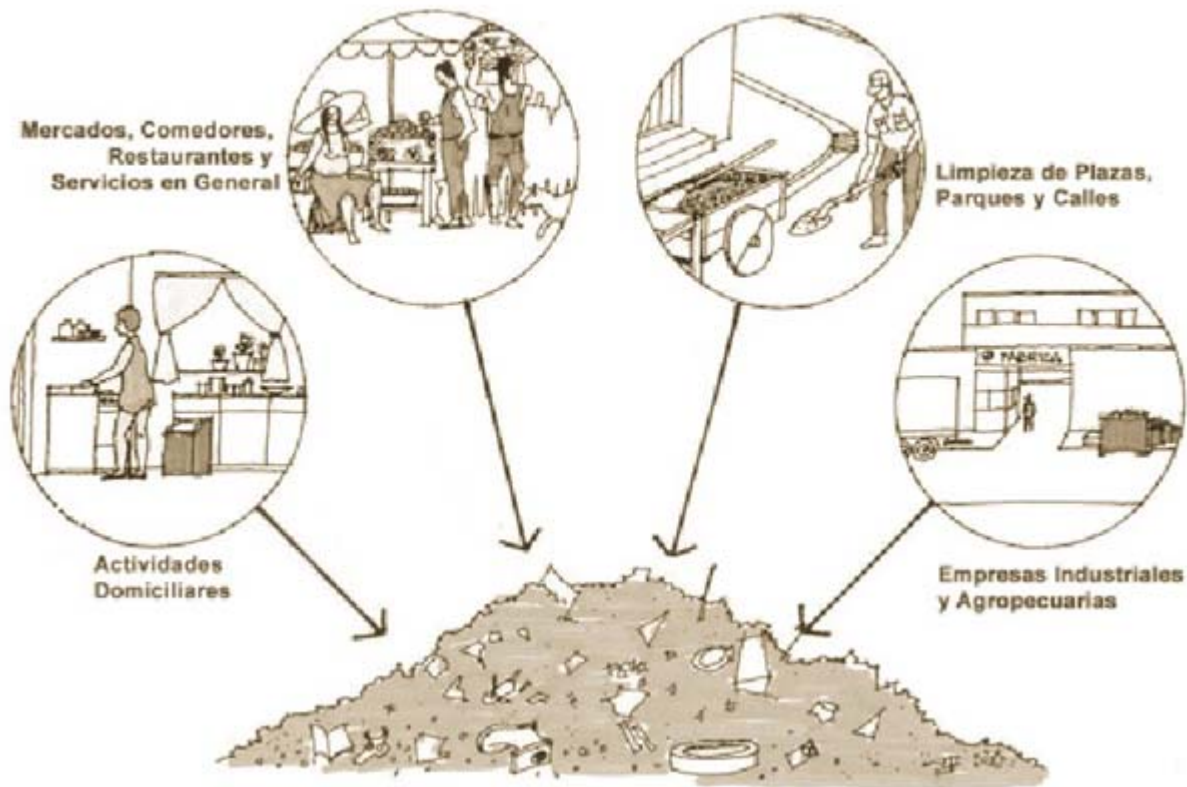


Figura 2 Residuos Sólidos Urbanos

## **2.3. COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)**

El término composición se utiliza para describir los componentes individuales que constituyen el flujo de residuos y su distribución relativa. Los componentes más habituales de los RSU son:

- Materia orgánica. Son los restos procedentes de la limpieza o de la preparación de los alimentos junto la comida que sobra.
- Papel y cartón. Periódicos, revistas, cajas y embalajes, etc.
- Plásticos. Botellas, bolsas, platos, etc.
- Vidrio. Botellas, vajilla rota, etc.



- Metales (aleaciones de hierro y aluminio). Envases de conservas, refrescos, etc.
- Otros. Textil, medicamentos caducados y fuera de uso, madera, etc.

En la composición de los RSU influyen causas y factores muy diversos, aunque los más importantes son las características de la población, los hábitos de consumo, y la climatología propia de la región.

Los RSU de la recogida general se dividirán en dos grupos:

1. Los residuos domiciliarios. Son los residuos generados por los ciudadanos. Los planes de actuación en materia de recuperación y reciclaje tendrán un efecto sobre la cantidad y composición de estos residuos.
2. Residuos comerciales. Bajo este denominador se agrupan todos los RSU de la recogida general que no son domiciliarios como son los de comercios, oficinas, bares y restaurantes y los residuos de pequeñas industrias cuya composición es asimilable a residuos urbanos. Los residuos de algunos sectores de actividad tienen una composición particular que les hace interesantes para actuaciones concretas como son las oficinas para la recuperación de papel, los bares y restaurantes para vidrio y materia orgánica y comercios para papel y plásticos.

## **2.4. TRATAMIENTO BIOLÓGICO**

Independientemente de que el proceso sea aerobio o anaerobio, un sistema de tratamiento biológico consta de las siguientes etapas:

- Pre-tratamiento. Operaciones previas al proceso biológico, para adecuar el residuo y permitir un desarrollo adecuado del proceso. En función del tipo de residuo y de la tecnología aplicada, el pre-tratamiento puede ser más o menos intenso. El pre-tratamiento incluye normalmente la eliminación de impropios, la trituración, la mezcla con aditivos (material estructurante, cosubstratos, etc.), la homogenización, etc.
- Tratamiento/s biológico/s.
- Post-tratamiento. Su objetivo es refinar las características del producto obtenido. Algunas de las posibles operaciones son la clasificación según tamaño, la eliminación de impurezas, el ajuste de humedad, etc.

### **3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO**

#### **3.1. EMPLAZAMIENTO**

Existen condiciones sanitarias, urbanísticas y económicas mínimas que deben cumplirse para elegir un sitio para el Relleno Sanitario. A continuación se presenta un listado general, que no debe limitarse, ya que pueden existir otros factores particulares, según cada municipio, que deben tomarse en cuenta para elegir el sitio apropiado. Por tanto, a manera de referencia, se señalan los siguientes requisitos mínimos a considerar:

- Distancia del perímetro urbano mayor de 500 metros
- Período de traslado desde el centro urbano menor de 30 minutos
- Ubicado a sotavento, es decir, al resguardo del lugar de procedencia del viento
- Condiciones naturales de protección
- Alejado de fuentes de agua
- Profundidad del manto freático mayor de 10 metros
- Coeficiente bajo de permeabilidad del suelo
- Compatibilidad con el desarrollo urbano
- Vida útil mayor de 10 años
- Cercanía del material de cobertura
- Terreno de baja utilidad

Un Relleno Sanitario bien operado no causa molestias, sin embargo es preferible ubicar el sitio alejado de centros poblados, previendo que al final de la vida útil del relleno, éste se puede usar como área verde.

Un Relleno Sanitario debe estar localizado preferentemente sobre un terreno cuya base sean suelos areno-limo-arcillosos (arena gruesa gredosa, greda franco-arcillosa); también son adecuados los limo-arcillosos (franco-limoso pesado, franco-limo-arcilloso, arcillo-limoso liviano) y los arcillo-limosos (arcillo-limoso pesado y arcilloso). Es mejor evitar los terrenos areno-limosos (franco-arenosos) porque son muy permeables.



Figura 3 Ubicación para el vertedero de Kimpese

### **3.2. CLIMA**

La precipitación pluvial, la evaporación, la temperatura y la dirección del viento son los principales datos climatológicos que se deben recopilar para establecer las especificaciones de diseño de la infraestructura del Relleno Sanitario y tener un mejor conocimiento de las condiciones a las que estará sometida la obra en general. La dirección del viento y sobre todo, los registros de precipitación pluvial de la zona son muy importantes para el diseño de los diferentes sistemas de drenaje de agua y lixiviado.

Para nuestro ejemplo particular de la ciudad de Kimpese, se tiene que en su conjunto posee un clima tropical húmedo. Hay dos estaciones muy diferenciadas, una muy lluviosa y otra de sequía.

Las temperaturas giran alrededor de 21° C, por la mañana, y 28-31° C por la tarde. La temperatura media anual en Kimpese se encuentra en 25°C.

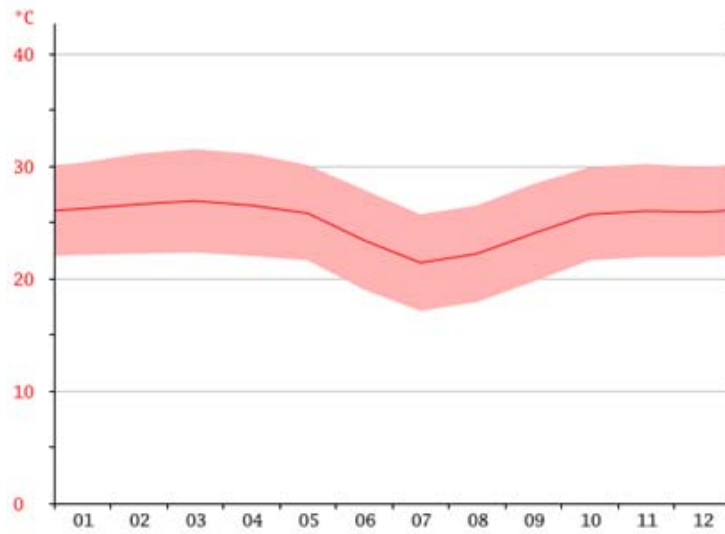


Figura 4 Diagrama de Temperatura

El mes más caluroso del año con un promedio de 26.9 °C es el mes de marzo, mientras que el mes más frío del año con 21.4 °C es el mes de julio.

### 3.3. HIDROGRAFÍA

El mes más seco es julio, con 0 mm, mientras abril tiene las mayores precipitaciones del año, 240 mm.

La precipitación es de 1220 mm al año.

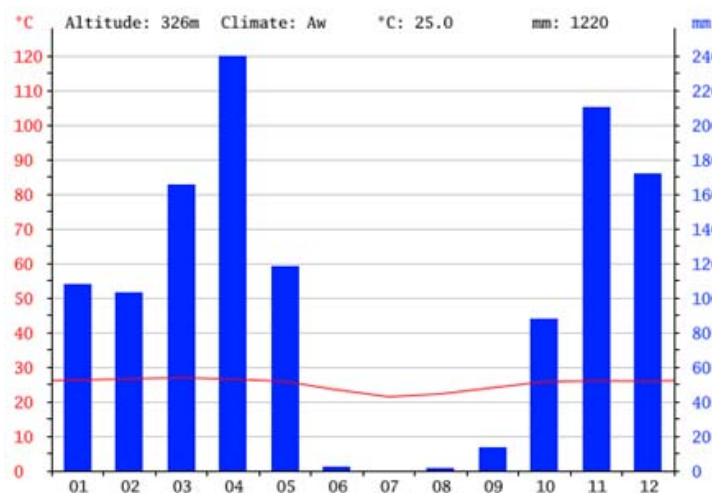


Figura 5 Climograma

month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
mm	108	103	165	240	118	2	0	1	13	88	210	172
°C	26.2	26.6	26.9	26.5	25.8	23.4	21.4	22.2	24.0	25.7	26.0	25.9
°C (min)	22.1	22.2	22.3	22.0	21.6	19.0	17.1	17.9	19.7	21.6	21.9	21.9
°C (max)	30.3	31.1	31.5	31.1	30.1	27.9	25.7	26.5	28.4	29.9	30.2	29.9

Tabla Climática

### 3.4. VEGETACIÓN

Conviene tener en cuenta la vegetación potencial de la zona con un doble objetivo.

- 1- Conocer las especies vegetales que se encuentran adaptadas a la zona y, por tanto, tienen mayores posibilidades de supervivencia.
- 2- Conseguir una mayor integración paisajística.

Para el caso de la ciudad de Kimpese, se podría decir que la vegetación presente es predominantemente herbácea, con escasa presencia de árboles y arbustos. La vegetación arbórea predominante es de palmeras y en ciertos lugares.

Cerca del curso del río la vegetación es algo más densa y en determinados puntos del mismo se encuentran especies arbustivas y herbáceas, apareciendo estas últimas en la orilla.

#### 3.4.1. Especies herbáceas

Son de gran importancia en los primeros años ya que van a ser la cubierta vegetal que sujete el terreno y lo van a tapizar impidiendo que se establezcan especies indeseadas.

Para la elección de las especies se pueden seguir los siguientes criterios:

- Especies autóctonas.
- Especies de elevada rusticidad, precisan menos cuidados.
- Especies que no tengan gran desarrollo ya que competirán con los arbustos o matorrales en sus primeras edades impidiendo un desarrollo adecuado de los mismos.

#### 3.4.2. Especies leñosas

En toda la superficie se hará una reposición con arbustivas aromáticas autóctonas.

Se elegirán especies adaptadas a la zona y que presenten un buen desarrollo vegetativo.

## **4. DISEÑO DE INFRAESTRUCTURA**

### **4.1. RESIDUOS ACEPTABLES E INACEPTABLES**

La mayoría de los residuos sólidos generados por fuentes domiciliarias, comerciales, institucionales y agrícolas podrán disponerse en un Relleno Sanitario Manual con un riesgo mínimo de poner en peligro directa o indirectamente la salud humana y la calidad del ambiente.

Es importante recordar que los Rellenos Sanitarios manuales no están diseñados para aceptar y procesar residuos peligrosos, los que deben disponerse en rellenos especialmente diseñados para ello.

Los residuos inaceptables deben identificarse en el plan de operación del relleno Sanitario y se debe proporcionar una lista de estos residuos sólidos a los usuarios y clientes.

La aceptabilidad de los tipos de residuos sólidos debe considerar el mínimo riesgo frente a la hidrogeología del lugar, las cantidades y características físicas, químicas y biológicas de los residuos sólidos, los métodos de disposición, los riesgos y efectos para el ambiente y la salud pública y sobre todo la seguridad del personal operativo.

Los residuos de establecimientos de salud y los residuos de lodos de aguas residuales que no han recibido tratamiento previo se califican como inaceptables por razones de concentración y grado de peligro.

### **4.2. SELECCIÓN DEL MÉTODO**

El método constructivo y la consiguiente operación de un Relleno Sanitario están determinados principalmente por la topografía del terreno, aunque dependen también del tipo de suelo y de la profundidad del nivel freático. Existen dos maneras básicas de construir un Relleno Sanitario, que se describen a continuación:

#### **Método de trinchera o zanja**

Este método se utiliza en regiones planas y consiste en excavar periódicamente zanjas de dos o tres metros de profundidad, pudiéndose excavar a mano. Con los medios necesarios se han registrado experiencias de excavación de trincheras hasta de 7 metros de profundidad, las cuales se realizan con el apoyo de una retroexcavadora o tractor de oruga. La tierra que se extrae, se coloca a un lado de la zanja para utilizarla como material de cobertura, los desechos sólidos se depositan y acomodan dentro de la trinchera para luego compactarlos y cubrirlos con la tierra diariamente. Se recomienda hacer cada zanja de tal forma que pueda tener una vida útil entre 30 y 90 días, considerando que hay que tener lista una nueva zanja antes de clausurar la que está en uso. De otra forma se corre el riesgo de que el lugar se convierta en un vertedero abierto. La separación entre zanja y zanja debe ser por lo menos de un metro, dependiendo del tipo de suelo del lugar.

Es importante tener datos sobre el nivel freático y el tipo de suelo antes de implementar este método, ya que si el nivel freático está muy próximo a la superficie del suelo existe un alto riesgo de contaminar los acuíferos. Por otro lado, los terrenos rocosos dificultan la excavación.

Se debe tener cuidado en época de lluvias dado que las aguas pueden inundar las zanjas. Por lo tanto, se deben construir canales perimetrales para captarlas y desviarlas e incluso proveerlas de drenajes internos. En casos extremos, puede requerirse el bombeo del agua acumulada. La excavación de zanjas exige condiciones favorables tanto en lo que respecta a la profundidad del nivel freático como al tipo de suelo.

En este caso se deberá en primer lugar desmontar el sitio retirando la capa vegetal y luego excavar para extraer el volumen de suelo necesario. Esta excavación debe llegar a una distancia no menor al metro y medio del agua.

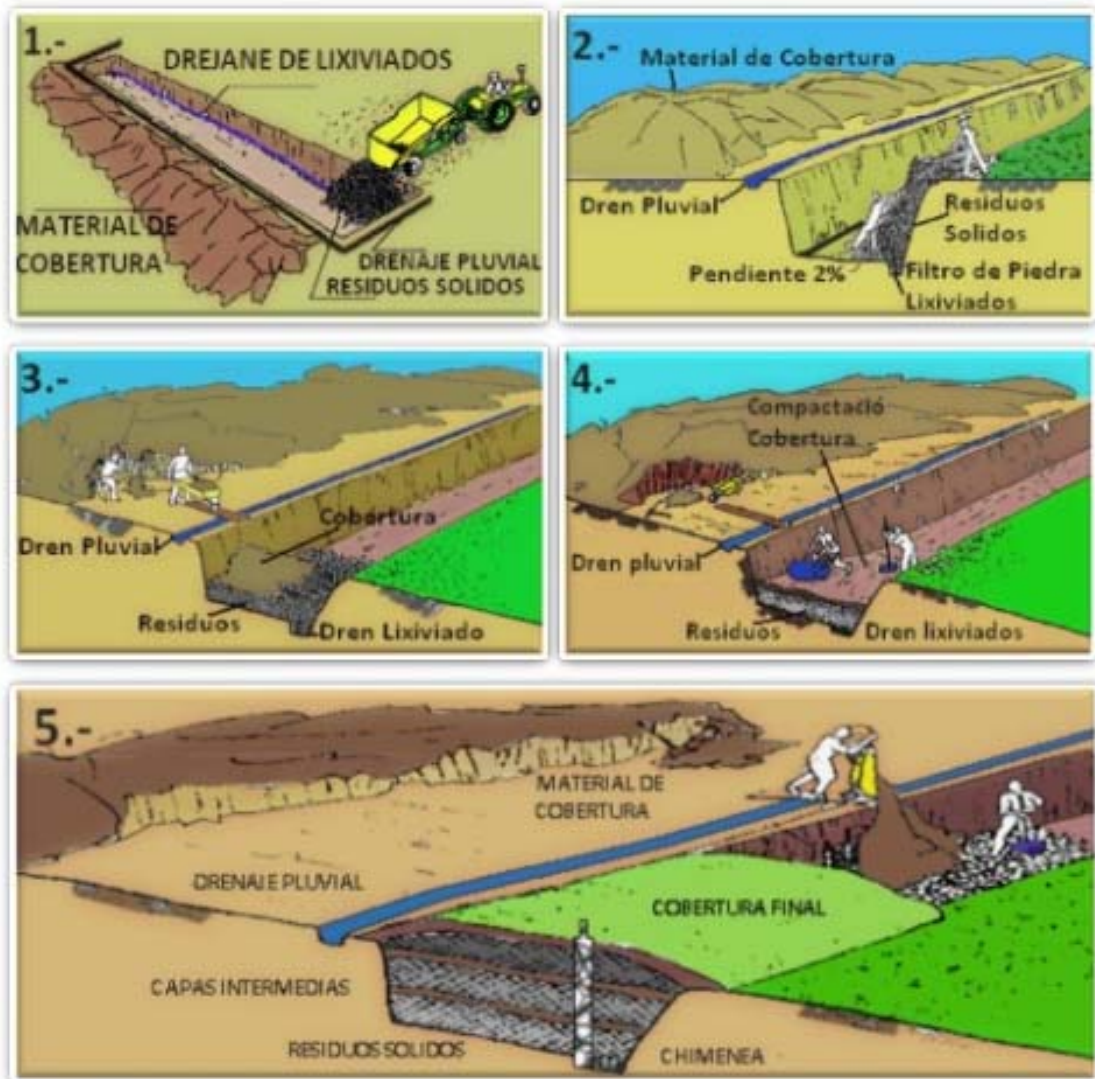


Figura 6 Forma de trabajo para construir un relleno sanitario con el método trinchera

### Método de área

Método aplicado en terrenos o áreas planas a semiplanas, donde no sea factible excavar zanjas o trincheras para disponer y confinar los residuos.

El suelo, dependiendo de sus características y permeabilidad, debe ser acondicionado y nivelado antes de la disposición de residuos. En estos casos, se debe tener identificado la fuente de donde se extraerá el material de cobertura según las características y cantidad necesaria. Las celdas se construirán con una pendiente suave en el talud para evitar deslizamientos y lograr una mayor estabilidad a medida que se eleva el relleno hasta la altura proyectada.

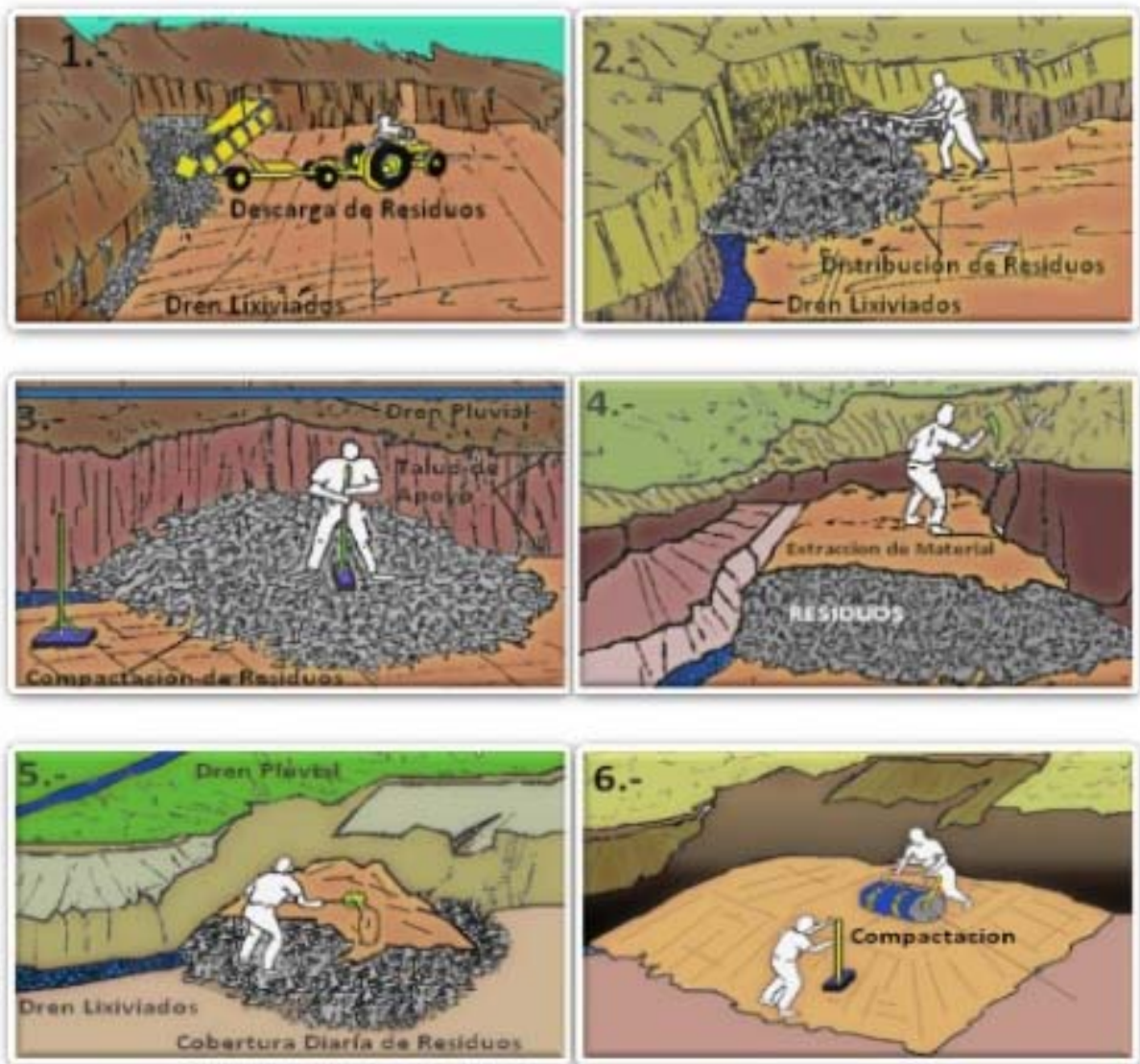


Figura 7 Forma de trabajo para construir un relleno sanitario con el método área



### Combinación de ambos métodos

El método combinado se aplica en terrenos planos, donde se inicia la operación por el método de trinchera y finalizándolo por el de área. Las principales ventajas de éste método son las siguientes:

- Empleo de menor área para lograr un mayor volumen útil de disposición final.
- Busca aprovechar al máximo el material de la excavación a emplearse como cobertura.

Sin embargo, sólo es posible su aplicación en lugares donde se puede excavar sin afectar el nivel freático y el suelo cuente con las características adecuadas para ser empleado como material de cobertura.

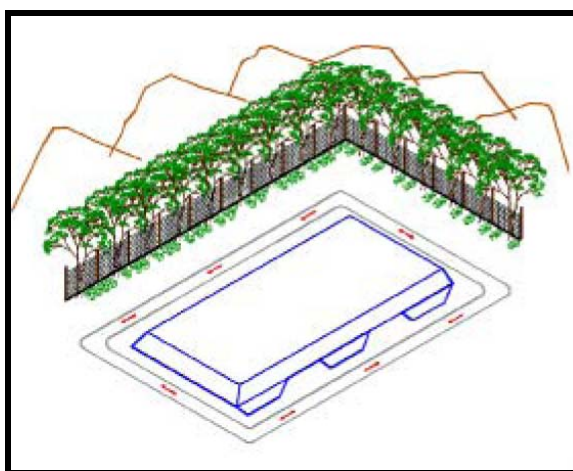


Figura 8 Método combinado (área y trinchera)

### 4.3. CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE RESIDUO A DISPPONER

Para definir la cantidad de residuos sólidos que se pretende proyectar en el Relleno Sanitario Manual, es necesario conocer información demográfica de la población, tales como número de habitantes y la tasa de crecimiento poblacional, así como la generación per cápita de residuos por habitante día.

#### a. Crecimiento poblacional.

El crecimiento poblacional se puede determinar a través de métodos matemáticos. Un ejemplo de su aplicación se muestra a continuación como un crecimiento geométrico, según la fórmula siguiente:

$$Pf = Po \times (1 + r) \times n$$

Donde:

Pf = Población futura

Po = Población actual

r = Tasa de crecimiento de la población

$n = (t_{\text{final}} - t_{\text{inicial}})$  intervalo en años, siendo  $t$  la variable de tiempo expresada en años

Considerando los siguientes datos, estimaremos la población futura en diez (10) años.

- Población actual: 10000 habitantes.
- Tasa de crecimiento poblacional: 0,025

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Población (hab)	10000	10250	10506	10768	11037	11313	11596	11886	12183	12487	12799

Crecimiento poblacional

### b. Generación per cápita de residuos

La información precisa de generación per cápita (Gpc) de residuos sólidos de una población, se obtiene como uno de los resultados del estudio de caracterización de residuos sólidos en la zona, la misma que estará en función de las condiciones socioeconómicas y hábitos de consumo de la población.

La Gpc se podría estimar, realizando algunas mediciones de la cantidad de residuos sólidos que recolecta la municipalidad, y dividiendo dicha cantidad entre el número de habitantes.

$$Gpc \text{ (Kg/hab/día)} = \frac{CRR \text{ (kg)}}{Pob \text{ (Hab)}}$$

Donde:

Gpc = Generación per cápita (Kg/hab/día)

CRR = Cantidad de residuos recolectados (kg)

Pob = Población (N° Hab)

Por lo tanto, la cantidad diaria total de generación de residuos sólidos se estimará multiplicando la Generación per cápita por el número de habitantes de la población. A partir de este dato se proyectará la cantidad de residuos sólidos a disponer en el Relleno sanitario Manual pudiendo ser diaria, mensual, anual y durante el tiempo de vida útil de la infraestructura.

Entonces, la estimación de la cantidad de residuos a disponer en el Relleno Sanitario Manual ( $CRD_{RSM}$ ) se obtendrá aplicando la siguiente fórmula:

$$CRD_{RSM} = Gpc \text{ (kg/hab/día)} \times Pob \text{ (N° Hab)}$$

Donde:

Gpc = Generación per cápita (Kg/hab/día)

Pob = Población (N° Hab)

Tratando de ilustrar lo indicado líneas arriba, se muestra una tabla considerando una  $Gpc = 0,5$  Kg/hab/día

Año	Población (hab)	Generación de Residuos (Tn/día)	Generación de Residuos (Tn/mes)	Generación de Residuos (Tn/año)
0	10000	5	150	1800
1	10250	5,125	153,75	1845
2	10506	5,253	157,59	1891,08
3	10768	5,384	161,52	1938,24
4	11037	5,5185	165,555	1986,66
5	11313	5,6565	169,695	2036,34
6	11596	5,798	173,94	2087,28
7	11886	5,943	178,29	2139,48
8	12183	6,0915	182,745	2192,94
9	12487	6,2435	187,305	2247,66
10	12799	6,3995	191,985	2303,82

#### **4.4. CÁLCULO DEL VOLUMEN NECESARIO**

Los requerimientos de espacio del Relleno Sanitario están en función de:

- La producción diaria de residuos sólidos, si se espera tener una cobertura del 100% o, en su defecto, de la cantidad de residuos sólidos recolectados.
- La densidad de los residuos sólidos estabilizados en el Relleno Sanitario.
- La cantidad de material de cobertura (20-25%) del volumen estabilizado de residuos sólidos.

##### **4.4.1. Volumen de Residuo Sólido**

El volumen diario resulta de la relación entre el volumen de residuos sólidos a disponer en un día ( $m^3/día$ ) y la densidad de los residuos sólidos recién compactados, ( $400-500 \text{ kg}/m^3$ ) y estabilizados ( $500-600 \text{ kg}/m^3$ ).

El volumen anual de residuos sólidos que se requiere disponer se encuentra a partir de la relación entre el volumen de residuos sólidos a disponer en un día ( $m^3/día$ ) entre 365 días en un año (días).

$$V_{\text{diario}} = \frac{CRD}{D_{rs}}$$

$$V_{\text{anual}} = V_{\text{diario}} \times 365$$

Donde:

$V_{\text{diario}}$  = Volumen de residuos sólidos a disponer en un día ( $\text{m}^3/\text{día}$ )

$V_{\text{anual}}$  = Volumen de residuos sólidos en un año ( $\text{m}^3/\text{año}$ )

CRD = Cantidad de residuos sólidos producidos ( $\text{Tn}/\text{día}$ )

$D_{\text{rs}}$  = Densidad de los residuos compactados ( $400\text{-}500\text{kg}/\text{m}^3$ ) y estabilizados ( $500\text{-}600\text{ kg}/\text{m}^3$ )

Se estimará un valor medio para la densidad de  $550\text{kg}/\text{m}^3$

Año	Población (hab)	Generación de Residuos ( $\text{Tn}/\text{día}$ )	Densidad de los Residuos ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Volumen diario ( $\text{m}^3/\text{día}$ )	Volumen Anual ( $\text{m}^3/\text{año}$ )
0	10000	5	550	9,0909091	3318,18
1	10250	5,125	550	9,3181818	3401,14
2	10506	5,253	550	9,5509091	3486,08
3	10768	5,384	550	9,7890909	3573,02
4	11037	5,5185	550	10,033636	3662,28
5	11313	5,6565	550	10,284545	3753,86
6	11596	5,798	550	10,541818	3847,76
7	11886	5,943	550	10,805455	3944
8	12183	6,0915	550	11,075455	4042,54
9	12487	6,2435	550	11,351818	4143,41

#### 4.4.2. Volumen del Relleno Sanitario

Se puede calcular el volumen del Relleno Sanitario para el primer año, multiplicando el volumen de residuos sólidos en un año ( $\text{m}^3/\text{año}$ ) por el material de cobertura, utilizando el factor de material de cobertura (1.2 a 1.25).

$$\text{VRS} = V_{\text{anual}} \times \text{MC}$$

Donde:

VRS = Volumen del Relleno Sanitario ( $\text{m}^3/\text{año}$ )

MC = Factor de material de cobertura (1.2 a 1.25)

Para los cálculos se tomará un valor de 1.25 para el factor de material de cobertura.

Los datos obtenidos se tabulan para conocer el volumen total ocupado durante toda la vida útil del relleno, es decir los valores acumulados anualmente, de ello se tiene:

$$VRS_{vu} = \sum_{i=1}^n VRS$$

Donde:

$VRS_{vu}$  = Volumen Relleno Sanitario durante la vida útil ( $m^3$ )

n = Número de años.

Año	Volumen Anual ( $m^3/año$ )	Factor de material de cobertura	Volumen del Relleno Sanitario ( $m^3/años$ )	Volumen del Relleno Sanitario durante la vida útil ( $m^3$ )
0	3318,18	1.25	4147,725	4147,725
1	3401,14	1.25	4251,425	8399,15
2	3486,08	1.25	4357,6	12756,75
3	3573,02	1.25	4466,275	17223,025
4	3662,28	1.25	4577,85	21800,875
5	3753,86	1.25	4692,325	26493,2
6	3847,76	1.25	4809,7	31302,9
7	3944	1.25	4930	36232,9
8	4042,54	1.25	5053,175	41286,075
9	4143,41	1.25	5179,2625	46465,338

#### 4.4.3. Área requerida

Con el volumen calculado, se puede estimar el área requerida para la construcción del Relleno Sanitario Manual, solamente si se puede estimar de forma aproximada la profundidad o altura del relleno. Esta sólo se conocerá si se tiene una idea de la topografía de los alrededores. El área requerida para la construcción de un Relleno Sanitario depende principalmente de factores como:

- Cantidad de residuos sólidos a disponer y cantidad de material de cobertura.
- Densidad de compactación de los residuos sólidos.
- Profundidad o altura del Relleno Sanitario Manual.
- Capacidad volumétrica del terreno.
- Áreas adicionales para obras complementarias.

El área de los residuos sólidos se halla relacionada con el volumen necesario del Relleno Sanitario ( $m^3/año$ ) entre la altura o profundidad media del Relleno Sanitario (m).

$$ARS = \frac{VRS}{h}$$

Donde:

VRS = Volumen necesario del Relleno Sanitario (m<sup>3</sup>/año)

ARS = Área a rellenar sucesivamente (m<sup>2</sup>)

h = Altura o profundidad media del Relleno Sanitario (m)

El área total requerida será la multiplicación entre el área a rellenar sucesivamente (ARS), por el factor de aumento del área adicional requerida para las vías de penetración, áreas de aislamiento, caseta para portería e instalaciones sanitarias, patio de maniobras, etc. Este se considera entre un 20-40% del área a rellenar.

$$A_{total} = (F \times ARS) + ARS$$

Donde:

A<sub>total</sub> = Área total requerida (m<sup>2</sup>).

F = Factor de aumento del área adicional requerida para las vías de penetración, áreas de aislamiento, caseta para portería e instalaciones sanitarias, patio de maniobras, etc. Este se considera entre un 20-40% del área a rellenar.

Se tomará un valor medio para el factor, F=0,3

Año	Volumen del Relleno Sanitario (m <sup>3</sup> /años)	Altura o profundidad media del Relleno Sanitario (m)	Área a rellenar sucesivamente (m <sup>2</sup> )	Área total requerida (m <sup>2</sup> )
0	4147,725	3	1382,575	1797,3475
1	4251,425	3	1417,14167	1842,28417
2	4357,6	3	1452,53333	1888,29333
3	4466,275	3	1488,75833	1935,38583
4	4577,85	3	1525,95	1983,735
5	4692,325	3	1564,10833	2033,34083
6	4809,7	3	1603,23333	2084,20333
7	4930	3	1643,33333	2136,33333
8	5053,175	3	1684,39167	2189,70917
9	5179,2625	3	1726,42083	2244,34708

#### **4.5. CÁLCULO DEL VOLUMEN DE LA ZANJA**

$$V_z = \frac{t \times CRR \times MC}{D_{rs}} = \frac{90 \times 5000 \times 0,95 \times 1,25}{550} = 9715,91m^3$$

Donde:

$V_z$  = Volumen de la zanja ( $m^3$ ).

$t$  = Tiempo de vida útil (90 días).

CRR = Cantidad de desechos sólidos recolectados (5000 kg/día).

0.95 = Se estima que se recolectará el 95% de la producción.

MC = Factor de material de cobertura de 1.20 a 1.25 (20 a 25%).

$D_{rs}$  = Densidad de los desechos sólidos en el relleno ( $550 \text{ kg}/m^3$ ).

A partir de este valor se puede calcular la cantidad de desechos recolectados y depositados en un día (kg/día).

$$D_{rd} = \frac{V_z}{t} = \frac{9715,91m^3}{90} = 107,95m^3 / dia$$

Donde:

$D_{rd}$  = Cantidad de desechos recolectados y depositados en un día (kg/día).

$V_z$  = Volumen de la zanja ( $m^3$ ).

$t$  = Tiempo de vida útil (90 días).

Se necesitan excavar prácticamente  $108m^3$ /día.

#### **4.6. DIMENSIONES DE LA ZANJA**

Para realizar un Relleno Sanitario Manual las dimensiones de la zanja estarán limitadas por las siguientes dimensiones:

- La profundidad de la zanja, de 2 a 3 metros de acuerdo con el nivel freático, tipo de suelo, tipo de equipo de trabajo y costos de mano de obra.
- El ancho de la zanja entre 10 y 30 metros, que resulta conveniente para evitar el acarreo de larga distancia de la basura y el material de cobertura y sobre todo para proporcionar mejores rendimientos de trabajo, de tal manera que puede ser planteada la construcción dejando un lado para acumular la tierra y el otro para la descarga de los desechos sólidos.
- El largo está condicionado al tiempo de duración o vida útil de la zanja.

Con todo esto se obtiene

$$l = \frac{v_z}{a \times h} = \frac{9715,91m^3}{30m \times 3m} = 107,95m$$

Donde:

l = Largo o longitud

Vz = Volumen de la zanja (m<sup>3</sup>)

a = Ancho (30 m.)

h = Profundidad (3 m.)

#### **4.7. CÁLCULO DE LA VIDA ÚTIL**

La capacidad del terreno debe ser lo suficiente como para permitir su utilización por un periodo mínimo de cinco años, a fin de que su vida útil se compatibilice con la gestión, los costos de implementación y las obras de infraestructura.

La vida útil estará en función de la cantidad de residuos a disponer en el Relleno Sanitario, la densidad de compactación del relleno, el volumen del material de cobertura, la profundidad o altura del relleno y las áreas adicionales para la infraestructura y zonas de seguridad proyectadas. También depende del área del terreno.

Por tanto, se puede entender como vida útil al valor de tiempo expresado en años, meses o días que se proyecta para que el relleno reciba residuos sólidos, en función de la capacidad útil de diseño.

En lo que respecta al método de zanja, una vez calculado el volumen de la misma, suponemos un factor para las áreas adicionales (separación entre zanjas, vías de circulación, aislamiento, etc.) y se estima el número de zanjas que se podrían excavar en el terreno, por lo tanto:

$$n = \frac{A_t}{(F \times A_z) + A_z} = \frac{80000m^2}{(0,3 \times 107,95 \times 30)m^2 + (107,95 \times 30)m^2} = 19$$

Donde:

n = Número de zanjas

At = Área del terreno (m<sup>2</sup>)

F = Factor para áreas adicionales de 20 a 40%

Az = Área de la zanja (m<sup>2</sup>)



Se recomienda que la separación entre zanjas sea como mínimo de un metro, por los empujes que se presentan. Esta separación depende del tipo de suelo y de la forma de la trinchera ya sea cuadrada o trapezoidal, entre otros factores. Entonces la vida útil estará dada por:

$$V_u = \frac{t \times n}{365} = \frac{90 \text{ días} \times 19}{365 \text{ días / año}} = 4,68 \text{ años}$$

Donde:

Vu = Vida útil del terreno (años)

t = Tiempo de servicio de la zanja (días)

n = Número de zanjas

#### **4.8. CÁLCULO DE LA GENERACIÓN DE LIXIVIADO**

Casi todos los residuos sólidos sufren cierto grado de descomposición, pero es la fracción orgánica la que presenta los mayores cambios. Los subproductos de la descomposición están integrados por líquidos, gases y sólidos.

Los lixiviados son aguas procedentes de residuos, formados a partir del agua de lluvia que cae sobre las basuras y de los líquidos producidos en el proceso de descomposición de las mismas. Es decir, los lixiviados se producen por la propia descomposición de los residuos del relleno, que, junto con el agua de lluvia y agua de escorrentía, constituyen una corriente que percola y se acumula arrastrando los distintos componentes presentes en los residuos depositados.

Las aguas de lluvia que atraviesan las capas de basura aumentan su volumen en una proporción mucho mayor que la que produce la misma humedad de los residuos sólidos, razón principal por lo que deben ser interceptadas y desviadas para evitar el incremento de lixiviado; de lo contrario, podría haber problemas en la operación del relleno y contaminación del agua subterránea.

Para la estimación de la generación de lixiviados se empleará un método sencillo, Método Suizo, ampliamente aceptado para establecer un rango suficientemente confiable respecto al volumen de lixiviados a manejar, que se presenta a continuación:

$$Q = \frac{1}{t} \times P \times A \times K$$

Donde:

Q = Caudal medio de lixiviado (m<sup>3</sup>/seg)

P = Precipitación media anual (mm/año)

A = Área del relleno (m<sup>2</sup>)

t = Número de segundos en un año (31536000 seg/año)

$K$  = Coeficiente que depende del grado de compactación de la basura, cuyos valores recomendados son los siguientes:

- Para rellenos débilmente compactados con peso específico de 0.4 a 0.7 ton/m<sup>3</sup>, se estima una producción de lixiviado entre 25 y 50% ( $K= 0.25$  a 0.50) de la precipitación media anual correspondiente al área del relleno.

- Para rellenos fuertemente compactados con peso específico  $> 0.7$  ton/m<sup>3</sup>, se estima una generación de lixiviado entre 15 y 25% ( $K= 0.15$  a 0.25) de la precipitación media anual correspondiente al área del relleno.

Siendo la operación del relleno manual, su característica en general será de débil compactación (hasta 0.7 ton/m<sup>3</sup>) con lo que el rango de generación de lixiviados será entre 25 y 50 % de la precipitación media anual correspondiente al área del relleno.

Con todo esto se obtiene un caudal medio de lixiviado de 0,035 m<sup>3</sup>/ sg.

Para la captación y evacuación de lixiviados se debe instalar drenes en la base de la infraestructura y al pie de los taludes de cada plataforma, considerando las siguientes características:

1. En la base de la infraestructura serán dispuestos en forma de espina de pescado, aprovechando el sistema de drenaje natural u otras formas.
2. Los drenes deben tener tuberías perforadas.
3. La pendiente longitudinal mínima del dren será de 2-3 %.
4. Las dimensiones deben ser compatibles con los caudales esperados de lixiviados.



Figura 9 Canal de drenaje

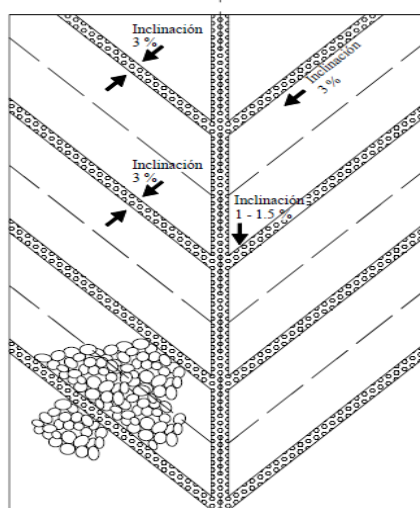


Figura 10 Drenaje según sistema espina de pescado

La minimización de las aguas lixiviadas es especialmente importante para rellenos manuales sujetos a precipitaciones elevadas, ya que es difícil el tratamiento de una cantidad muy alta de aguas lixiviadas que se pueden generar. Las medidas más importantes para la minimización de aguas lixiviadas en rellenos manuales son:

- no construir el relleno en áreas completamente planas o en trincheras, pero sí en terrazas o sobre un terreno ligeramente inclinado para que una parte de las aguas de lluvia pueda desaguarse en la superficie, sin percolar al cuerpo de basura.
- cubrir las celdas terminadas con tierra y sembrar plantas con alta capacidad de absorción para secar el terreno.
- construir drenes de agua de lluvia alrededor de las celdas para evitar que se infiltre agua de afuera al cuerpo de basura.
- cubrir las celdas con plástico de invernadero desechado o con helecho (ese método no sirve en trincheras excavadas, solamente en celdas que tienen la forma de terraza o que son construidas sobre terrenos inclinados).

#### **4.9. CÁLCULO DE LA GENERACIÓN DE GASES**

Un Relleno Sanitario se comporta como un digestor anaerobio. Debido a la descomposición o putrefacción natural de los residuos sólidos, no sólo se producen líquidos sino también gases y otros compuestos. La descomposición de la materia orgánica por acción de los microorganismos presentes en el medio tiene varias fases:

- Fase I: Se produce una fermentación aeróbica con importante formación dióxido de carbono. La duración es aproximadamente de 15 días y los componentes mayoritarios del gas formado son el nitrógeno y el dióxido de carbono. Se pueden alcanzar temperaturas de hasta 70°C y las reacciones son exotérmicas.
- Fase II: En esta fase se inicia la descomposición anaeróbica. Se aumenta la concentración de dióxido de carbono e hidrógeno, y a su vez va disminuyendo la de nitrógeno. La duración aproximada es de 2 meses.
- Fase III: En esta fase comienza a aumentar la concentración de metano mientras que disminuye la de dióxido de carbono e hidrógeno. El tiempo estimado son unos 2 años.
- Fase IV: En esta fase las proporciones de dióxido de carbono y metano se mantienen constantes (55% y 45% respectivamente). Dura en torno a 10 años. La temperatura final del relleno suele situarse en torno a los 25 – 40 °C dependiendo de las condiciones ambientales del lugar donde se sitúe.

El gas metano reviste el mayor interés porque, a pesar de ser inodoro, es inflamable y explosivo si se concentra en el aire en una proporción de 5 a 15% en volumen; los gases tienden a acumularse en los espacios vacíos dentro del relleno; aprovechan cualquier fisura del terreno o permeabilidad de la cubierta para salir, pudiendo originar altas concentraciones de metano con el consiguiente peligro de explosión en las áreas vecinas.

Por lo tanto, es necesario llevar a cabo un adecuado control de la generación y migración de estos gases. Como el gas metano es combustible, se puede quemar simplemente encendiendo fuego en la salida del drenaje, una vez concluido el Relleno Sanitario. También se puede aprovechar este gas como energía en el empleo de una pequeña cocina para calentar alimentos o como lámpara para iluminar el terreno.

La cantidad de gas producido por un relleno se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$G_{\max} = 1,868 \times C_{org} \times (0,014T + 0,28) \times (1 - 10 - Kt)$$

Donde:

Gmax: cantidad de gas producido por un relleno

Corg: Contenido de carbón orgánico en la basura (entre 17-22% en la basura no separada y entre 2-10% en la no biodegradable clasificada)

T: Temperatura (°C); la temperatura dentro del cuerpo de basura se puede estimar con un promedio de 30 °C, debido a los procesos exotérmicos de biodegradación.

K: Constante de Biodegradación (entre 0.025 -0.05; en general se encuentra entre 0.035 -0.04)

Esta fórmula describe la producción máxima teórica de gas de relleno, es decir no considera las pérdidas de carbón orgánico debido a la biodegradación aeróbica y la producción de aguas lixiviadas. Además, existe siempre un cierto porcentaje de carbón orgánico que no se convierte en gas de relleno. Estas pérdidas se calculan según los siguientes factores

$$G = G_{\max} \times fao \times fa \times fo$$

Donde:

Gmax: cantidad de gas producido por un relleno

fao: Factor de pérdidas iniciales (porcentaje de carbón orgánico que no se pierde durante la primera fase de fermentación aeróbica). Este valor se aproxima a 0.80, para las condiciones de: construcción del relleno en capas delgadas, exposición de los residuos al aire libre o crecimiento lento del cuerpo del relleno, y se aproxima a 0.95 en condiciones de construcción del relleno en capas espesas, cubierta inmediata de los residuos y elevación rápida del cuerpo del relleno.

fa: Porcentaje de carbón orgánico que se transforma en gas de relleno (CO<sub>2</sub> ó CH<sub>4</sub>). Este factor tiene un valor promedio de 0.70

fo: Factor de optimización que considera la tecnología del manejo del relleno (especialmente compactación y cobertura diaria). Tiene un valor próximo a 0.65 cuando se presentan condiciones de mala compactación, falta de cubierta diaria y alta precipitación y es 0.80 en condiciones de: construcción del relleno en capas delgadas, cobertura inmediata de la basura, buena compactación, baja precipitación y recirculación de lixiviados.

#### **4.9.1. Drenaje del gas de Relleno**

El gas de relleno se puede evacuar con drenaje activo o pasivo. El drenaje activo consiste en la succión del gas mediante un soplador. Cuando se hace el drenaje pasivo, se controla la difusión natural de los gases, con el fin de evacuarles solamente por los orificios previstos. Se logra una mayor eficiencia con el drenaje activo, pero los costos del drenaje pasivo son mucho más bajos.

##### **Drenaje Activo**

En los sistemas de drenaje activo, se succiona el gas con un soplador que se conecta con las chimeneas. Se conducen los gases hacia el incinerador por un sistema de tubería bajo el cuerpo de basura, como se muestra en el siguiente dibujo

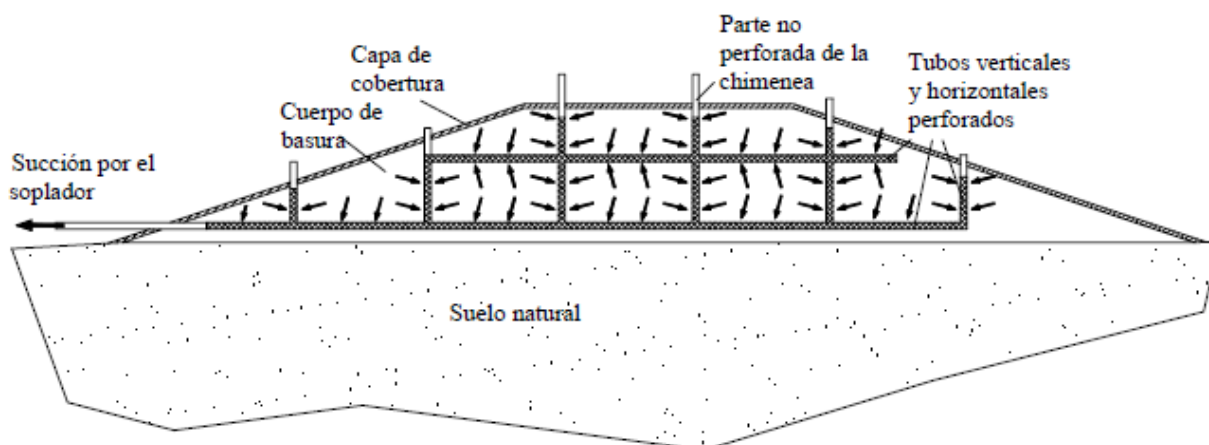


Figura 11 Drenaje Activo

El sistema de drenaje activo consiste de los siguientes elementos:

- Colectores de gas. Estos son las chimeneas verticales y la tubería horizontal que se colocan en el cuerpo de basura.
- Punto de recolección. El gas aspirado en diferentes chimeneas se conduce a ellas y se junta. El punto de recolección puede ser un tanque o un tubo. Se recomienda ubicar el punto de recolección en un nivel abajo de la tubería y de las chimeneas, con el fin de poder condensar en este lugar las aguas contenidas en el gas de relleno. Se debe colocar equipo de medición y ajuste en el punto de recolección.
- Separador de agua. Las aguas condensadas se separan del flujo de gas mediante un sifón o equipo refrigerador; después se manda con una bomba hacia la planta de tratamiento de las aguas lixiviadas.
- Tubo de aspiración de gas. Este es el tubo que conecta el punto de colección con el soplador.
- Ajuste de presión y soplador. El soplador produce depresión para succionar los gases del cuerpo de relleno, y sobrepresión para mandar los gases al incinerador. El ajuste de presión mantiene la depresión y la sobrepresión en el nivel óptimo. La presión necesaria para la succión es entre 200 - 300 mbar.
- Casa del soplador. En rellenos medianos o pequeños, el soplador se puede colocar en un galpón semiabierto con techo o en un contenedor. Para rellenos grandes, se recomienda colocar el soplador en el mismo edificio que el incinerador.
- Tubo de transporte. Este es el tubo que conduce los gases con sobrepresión hacia el incinerador.
- Antorcha. Unidad donde se quema el gas bajo control.
- Incinerador. Unidad compuesta de la antorcha, del equipo para aprovechar la energía de incineración y de los equipos auxiliares (tratamiento del gas, separación de gases, ajustes, etc.)

A continuación se muestra un sistema de drenaje activo con todas las unidades:

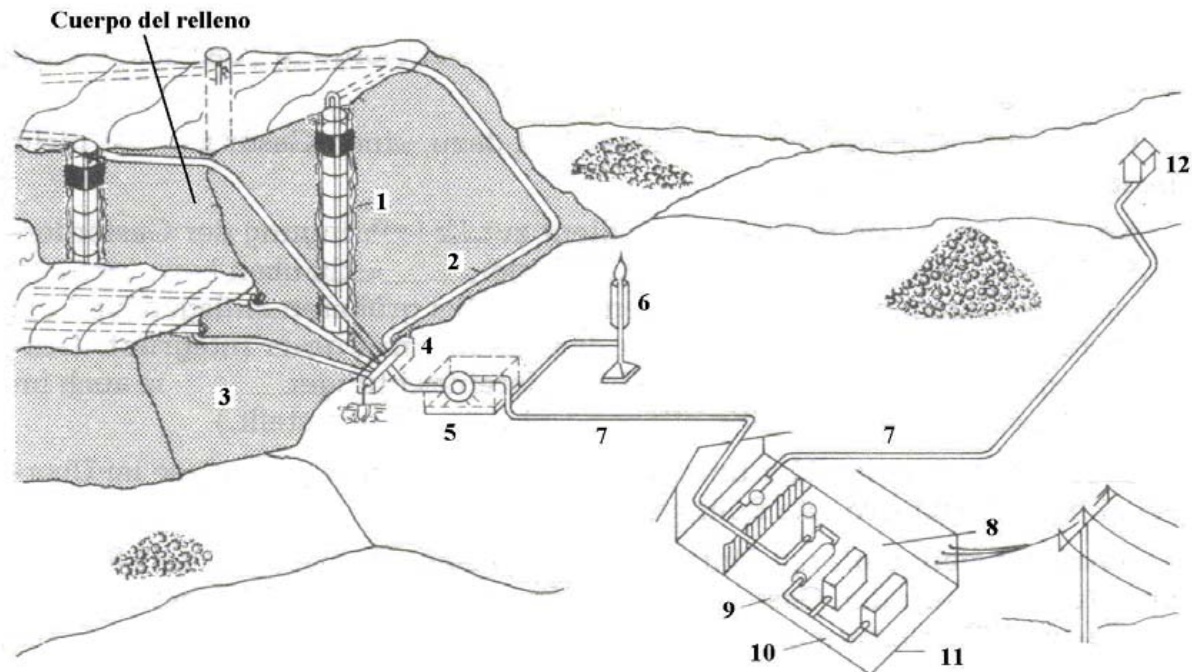


Figura 12 Drenaje Activo

- 1 Chimenea
- 2 Colector de gas
- 3 Drenaje de gas
- 4 Punto de colección
- 5 Punto de transporte de gas
- 6 Antorcha
- 7 Tubería de transporte
- 8 Consumidor 1
- 9 Tratamiento del gas
- 10 Conversión del gas en energía eléctrica
- 11 Casa de turbinas
- 12 Consumidor 2

Se deben considerar los siguientes puntos durante el diseño de un sistema de drenaje activo para los gases de relleno:

- La depresión debe ser eficiente en todo el cuerpo de basura
- Se debe minimizar la cantidad de aire succionado por el soplador
- El sistema debe tener una larga vida útil
- La capacidad de succión debe ser apropiada a la cantidad de gas
- Los tubos de succión deben ser lo más corto posible, para no tener demasiadas pérdidas de presión.

Cuando se diseña el sistema de drenaje activo junto con el relleno, generalmente se utilizan tuberías horizontales colocadas en diferentes niveles del cuerpo de basura para aspirar los gases. Si se debe añadir el sistema de drenaje activo a un relleno ya cerrado, es posible perforar el cuerpo de basura para poder colocar chimeneas verticales.

Se resumen las informaciones más pertinentes para el dimensionamiento de las chimeneas y la tubería en el siguiente cuadro:

Criterio	Chimenea	Tubería
Diámetro exterior	0.6 - 1.2 m	Canal horizontal de 1 m de largo y 0.8 m de ancho
Material de relleno	Piedra bola o grava sin cal	Piedra bola o grava sin cal
Diámetro interior	150 mm	110 mm
Resistencia a la presión	Hasta 10 bar	Hasta 10 bar
Área perforada/ superficie total	10 %	5 %
Capacidad de absorción de gas	2 m <sup>3</sup> /m tubo	0.2 m <sup>3</sup> /m tubo
Conexiones	Todas las conexiones deben ser soldadas	Se debe soldar en lugares no perforados
Distancias	Profundidad máxima: 15 m (en rellenos más profundos, se recomienda succionar el gas separadamente de diferentes niveles) Largo mínimo de tubo no perforado (capa superficial del cuerpo de basura): 3 m El fondo de la chimenea debe ser colocado al menos 2 m arriba de la capa de fondo del relleno.	Mínimo 6 - 8 m encima de la capa de fondo del relleno y 4 m abajo de la capa superficial (se considera el nivel de cierre del relleno). Los tubos perforados deben ser colocados a una distancia mínima de 25 m de los taludes.
Inclinación	---	A menos 3 %
Otros	Se debe poder medir la presión, la temperatura y la concentración de metano en cada chimenea.	La tubería debe atravesar el cuerpo de basura horizontalmente; eventuales conexiones verticales se deben construir fuera del cuerpo de basura.

Con sistemas activos de drenaje, se puede evacuar un 40 - 45 % del gas de relleno. Es importante que la concentración del metano sobre la superficie del relleno no exceda 80 ppm.

### **Drenaje Pasivo Con Chimenea**

Si se realiza el drenaje pasivo con chimeneas hay que construir las chimeneas de drenaje durante la operación del Relleno Sanitario. Aquí se aprovecha de la difusión horizontal del gas de relleno. El gas se difunde hacia la próxima chimenea y por ella de manera controlada hacia afuera. Las chimeneas tienen una alta permeabilidad para el gas y por tanto queda muy poca cantidad de gas que no se difunde por la chimenea, pero por la superficie del cuerpo de basura sí.

Las chimeneas de drenaje se pueden construir de dos maneras:

1. Jaula de malla con 4 puntales de madera, llenada con piedra bola o grava

## 2. Tubo perforado llenado con piedra bola o grava.

Para la recolección y evacuación de gases se utilizarán chimeneas, las cuales deben reunir las siguientes características:

Parámetro	Chimenea construida de malla con puntales de madera	Chimenea con tubo perforado
Ancho de la chimenea	0.5 - 1 m	Ø 0.6 - 1.2 m
Material de construcción	Puntales: Madera (preferiblemente eucalipto o árboles que se cultivan alrededor del relleno y que tienen la función de retener una parte de las aguas lixiviadas) Malla: Malla de acero; distancia entre los alambres < 2 cm	Plástico perforado La superficie total de los orificios debe ser 10 % de la superficie del tubo. Diámetro de los orificios: < 2 cm Material: Preferiblemente PEHD (puede ser fabricado de PEHD reciclado)
Material para llenar la chimenea	Piedra bola o grava. Es importante que no contenga cal, porque se descompone fácilmente la piedra con el alto contenido de cal tanto en la atmósfera como en los gases de relleno	
Dimensiones de las piedras	Se utiliza preferiblemente piedra con un diámetro < 16 cm, lo que impide una rápida congestión por causa del material espeso o sólido entrando a la chimenea. También es importante que sean pequeñas las piedras porque las piedras grandes se rompen bajo la influencia del calor extremo de la incineración de los gases de relleno.	
Distancia entre las chimeneas	25 - 30 m en rellenos manuales que tienen celdas con una altura de menos de 8 m 20 - 25 m en rellenos compactados donde el cuerpo de basura tiene una altura < 15 m 15 - 20 m en rellenos compactados donde el cuerpo de basura tiene una altura > 15 m	



### Chimenea con malla y puntales para drenaje pasivo

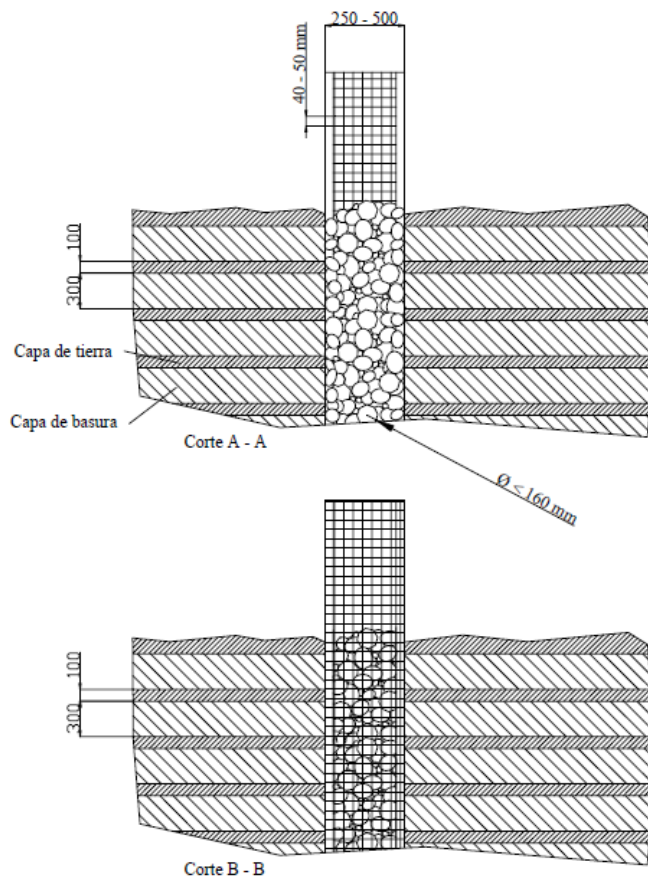


Figura 13 Chimenea con Malla y Puntales

### Chimenea con tubo perforado para drenaje pasivo

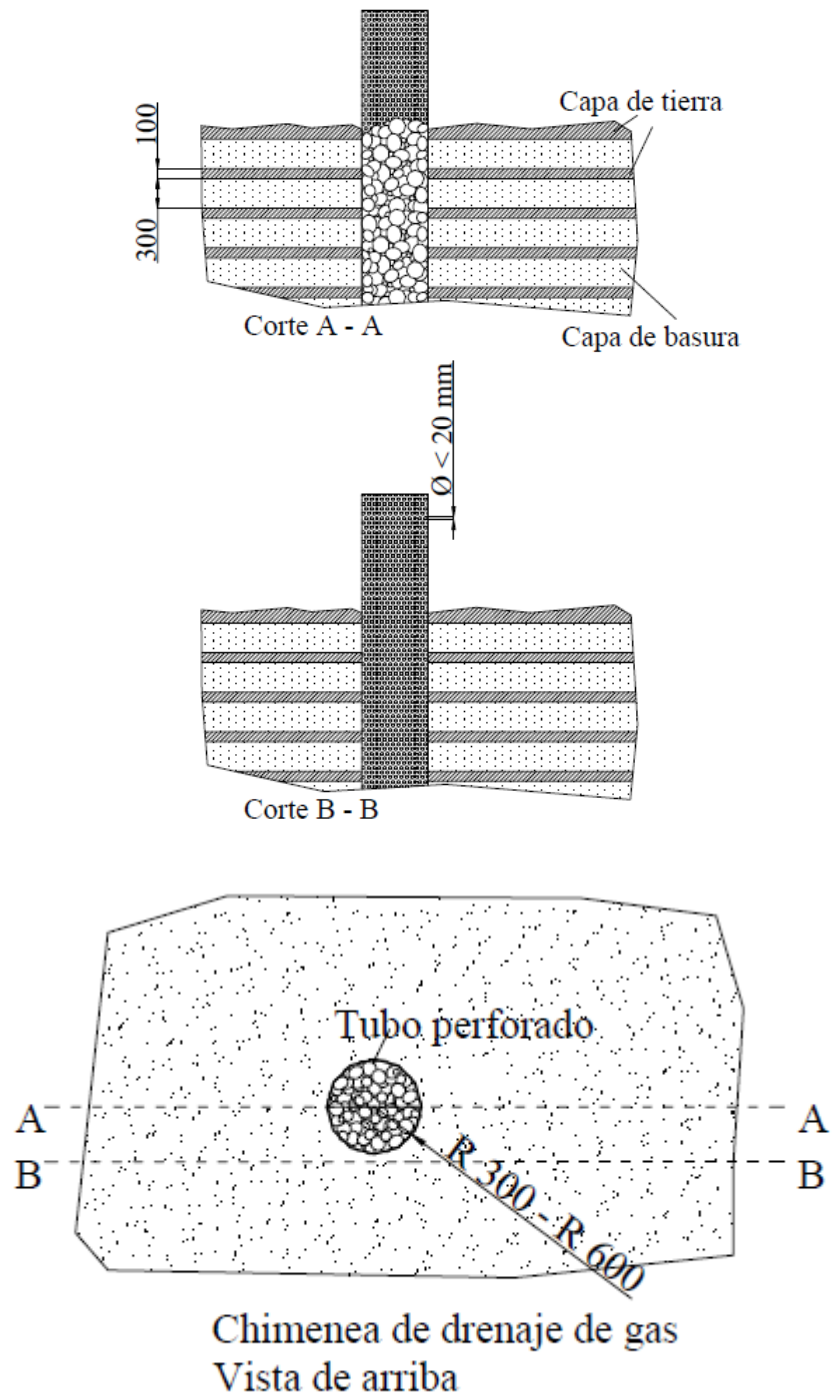


Figura 14 Chimenea con Tubo Perforado

Si se construye un relleno con un sistema de drenaje de las aguas lixiviadas como se presenta en canales colocados en forma de espina de pescado, se recomienda ubicar las chimeneas sobre los canales. Con eso, las aguas se infiltran por las chimeneas y se escurren en dirección de los canales. Paralelamente, las aguas lixiviadas sirven como lavadora para los gases de relleno, y una cierta cantidad de contaminantes del gas ya se absorbe en el agua.

El siguiente dibujo muestra un esquema de colocación de las chimeneas de gas sobre los canales de drenaje

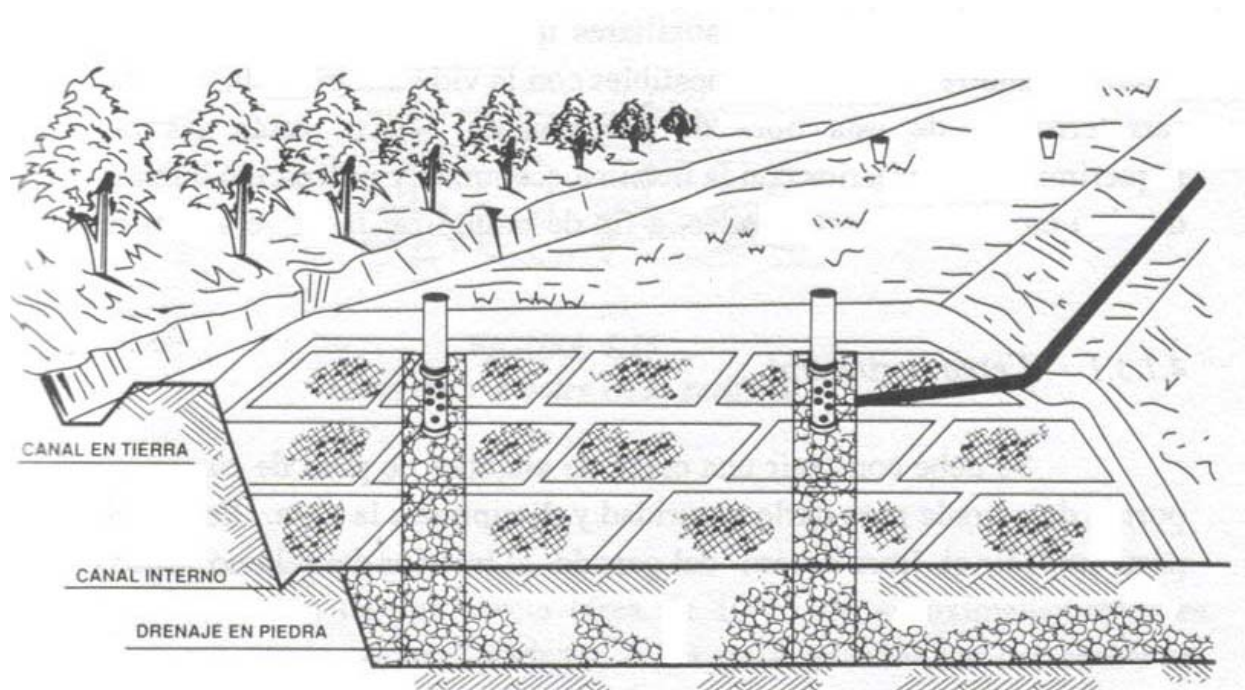


Figura 15 Colocación de Chimeneas sobre Canales de Drenaje

### **Drenaje Pasivo Sin Chimenea**

El drenaje pasivo sin chimeneas provoca algunos problemas, los más importantes son los siguientes:

- En las celdas ya terminadas, cubiertas y planteadas, se puede impedir el suministro de aire de las raíces por causa de la concentración alta de metano en la capa de tierra.
- Cuando existen fisuras en los taludes o la superficie del relleno, los gases se difunden por las fisuras sin pasar por el filtro biológico que constituye la capa de tierra.
- Si se descarga lodo o basura muy húmeda en el relleno, o si el relleno está expuesto a demasiada lluvia, se pierde el impacto de filtro biológico.
- Si se produce una cantidad muy alta de gas de relleno o si el gas se difunde solamente en algunos puntos definidos y no por la superficie entera, hay demasiada carga al filtro biológico y el filtro pierde su eficiencia.

El drenaje pasivo se puede aplicar en rellenos cerrados o en rellenos operados. En un relleno todavía en operación, la capa actual de superficie sirve como filtro biológico. Para eso es muy importante que se cubra diariamente la basura con una capa suficiente de tierra. Si se implementa en una celda que ya terminó su vida útil, se pueden recomendar 2 tipos de procedimiento:

**a) Orificios sirviendo como filtros biológicos**

La celda se cierra y se cubre con tierra bien compactada. Se dejan orificios en esta cubierta de tierra y se llenan con compost. No se compacta el compost en estos orificios. Debe ser suelto para tener la eficiencia óptima como filtro biológico.

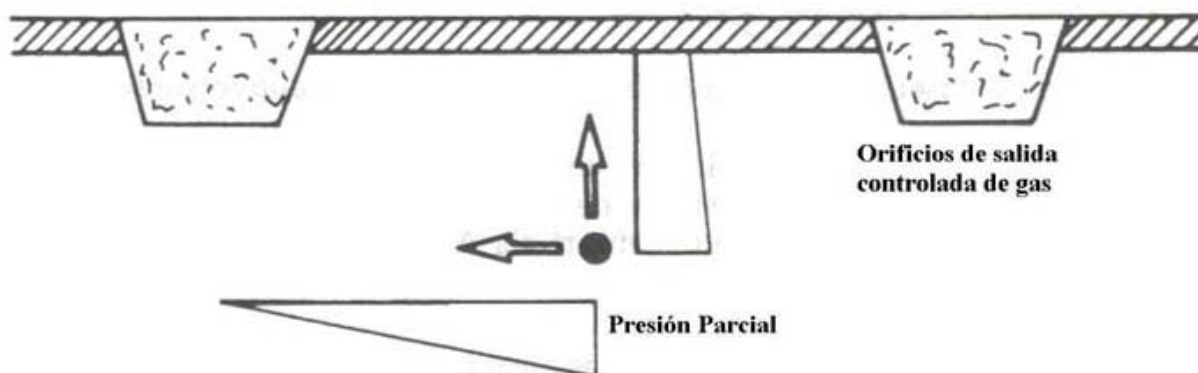


Figura 16

**b) Celdas cubiertas con compost**

Si el municipio en cuestión dispone de una planta de compostaje, y las celdas del relleno son relativamente pequeñas, se puede también recomendar la alternativa de no compactar la capa superficial del cuerpo de basura. En este caso, se coloca una capa de compost con el espesor de 50 cm sobre la celda cerrada. Esta capa serviría como filtro biológico. Como la superficie de este filtro es muy extendida, la carga de contaminantes por área es sumamente baja, lo que asegura una eficiencia óptima.

Esta alternativa se recomienda especialmente para Rellenos Sanitarios Manuales con una planta de compostaje muy cercana.

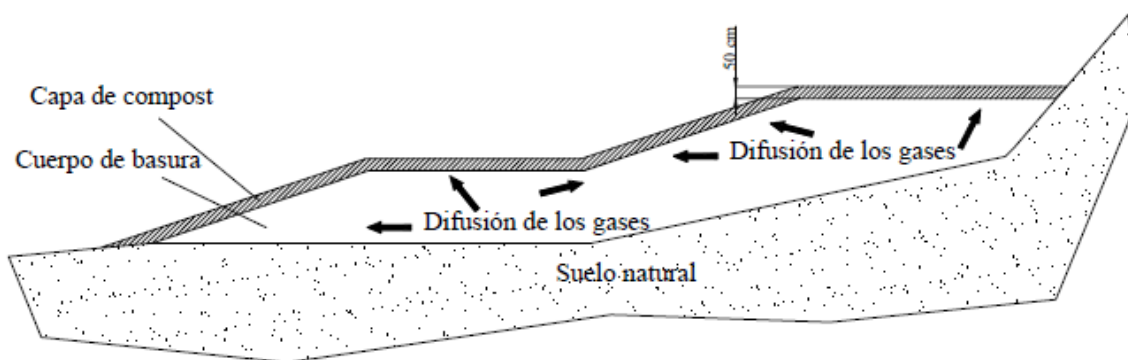


Figura 17

Generalmente no se recomienda el drenaje pasivo sin chimeneas. Solamente se puede preferir este método en los siguientes casos:

- Municipalidad pequeña que no tiene los recursos personales para construir chimeneas durante la operación del Relleno Sanitario.
- Evacuación de gases de relleno en un relleno cerrado que no tiene ningún dispositivo para el drenaje.
- Relleno pequeño manual con mala compactación. Aquí hay un mayor porcentaje de gas que se difunde por la superficie del cuerpo de basura, ya que la difusión vertical no se impide por la compactación.

A continuación se explicará como obtener compost para el drenaje pasivo

La forma manual consiste básicamente en los siguientes pasos:

- La materia orgánica ya seleccionada se traslada a un sitio apropiado, que puede ser un lugar acondicionado para tal fin, en el mismo vertedero.
- Se tritura la basura lo más posible; puede hacerse con un machete. Si no se hace esta parte del proceso, el tiempo de compostaje puede incrementarse en unos dos meses, lo que no es conveniente, ya que es más caro el producto.
- Se apila la basura. Dependiendo del volumen que se maneje, pueden ser pilas de hasta 25 metros de longitud, 2 metros de base y 1 metro de altura. Las pilas pueden ser lineales o circulares.
- Se voltea y se riega constantemente (dos o tres veces por semana) durante dos meses; y en el tercer mes, esta parte del proceso se reduce a una vez por semana (volteo y riego).
- La temperatura de la pila se puede controlar con un termómetro. Si no se dispone de uno, entonces puede utilizarse un machete, que se introduce en la pila y la temperatura indicará si requiere más volteo, mayor humedad.

La temperatura ideal de las pilas debe ser la temperatura ambiente. Debe considerarse que la basura puede alcanzar hasta 70 grados centígrados, lo cual debe ser controlado.

- Al cabo de unos tres meses se obtiene un producto listo para ser utilizado como abono orgánico.

Para poder llevar a cabo este proceso es necesario:

- Contar con suficiente materia prima (adecuadas cantidades de materia orgánica).
- Disponer de un terreno donde se puedan realizar estas operaciones.
- Dos o tres operarios que se encarguen de todos los pasos del proceso.
- Disponer de agua para el riego que necesitan las pilas.
- Carretillas, palas, machetes, rastrillos.
- Un sitio apropiado para el aseo de los operarios al final de la jornada.

A continuación se darán algunas recomendaciones básicas

- Disponer de suficiente materia prima constantemente.
- Un terreno apropiado.
- Evitar el ingreso de animales domésticos.
- Controlar la temperatura ideal (temperatura ambiente).
- Triturar la materia orgánica lo más posible.
- Cuidar que el material a compostar no lleve otros elementos indeseables como plástico, vidrio y otros elementos no putrescibles.
- Las pilas no deben ser mayores a lo recomendado.
- Si se hacen pilas circulares, éstas deben ser de unos 4 m. de radio. Si son lineales, no deben exceder de unos 25 m. de longitud.
- Las pilas pueden estar expuestas al sol o bajo techo, en la práctica se ha comprobado que el resultado es similar.
- Si con el paso del tiempo se observa que las pilas van perdiendo volumen, esto quiere decir que el proceso sigue su curso correcto y que la fermentación aerobia funciona correctamente.
- Si el producto se piensa comercializar, se deben tomar las medidas apropiadas, como empacar en bolsas plásticas, sacos tipo macen o similares y preparar de antemano el mercado potencial.

Alguna de las ventajas de compostar la materia orgánica en grandes cantidades

- Reduce enormemente el volumen de basura en el relleno, tomando en cuenta que el mayor contenido de la basura es materia orgánica.

- El costo del tratamiento de la materia orgánica en forma manual es comparativamente bajo, frente a una forma mecanizada, y los resultados son semejantes.
- La población puede ser inducida, mediante campañas de sensibilización, a hacer separación de la materia orgánica y ahorrar muchas horas de trabajo a los operarios encargados de la selección, considerando las grandes cantidades producidas de residuos orgánicos en las ciudades.
- Los agricultores se beneficiarían al utilizar un producto natural con grandes propiedades de regeneración de los suelos cultivables.
- Se puede reducir la importación de fertilizantes químicos.
- El compost se puede comercializar sin mayores problemas, o ser utilizado en huertos familiares o comunitarios.
- Las legumbres, frutas, hortalizas y otras plantas que se obtienen a partir de suelos mejorados con compost, son de buena calidad.
- La superficie de terreno demandada para rellenos sería menor al depositarse menos cantidades en ellos.
- Una de las fuentes importantes de acopio de este tipo de residuos es el mercado municipal y las industrias de productos alimenticios, los que deben aprovecharse para tener un abastecimiento constante.



Figura 18 Compostera

#### **4.10. CÁLCULO DEL CAUDAL DE ESCORRENTIA SUPERFICIAL**

Para interceptar y desviar el escurrimiento de las aguas de lluvia que podrían entrar a la infraestructura, se proyectarán canales, temporales y permanentes, de acuerdo a las condiciones de precipitación, área tributaria, tipo de suelo, vegetación, topografía, entre otros. Los canales permanentes servirán como drenes internos para impedir que las aguas de lluvia que caen dentro de la infraestructura penetren dentro de las celdas. El canal de drenaje de aguas de lluvia debe considerar los siguientes criterios técnicos:

- Escorrentías generadas por una precipitación de 24 horas de duración y con período de retorno de 25 años.
- Sección trapezoidal, con dimensiones mínimas de 0,30 m en la base y 0,5 m de profundidad.
- Pendiente máxima de 4% en suelos fácilmente erosionables o donde sea inevitable construir los canales con pendientes mayores al 4%, éstos deberán ser revestidos.
- La distancia mínima del canal permanente respecto al límite del área de disposición será de 3,0 m.
- Para facilitar el escurrimiento de las aguas de lluvia, las superficies expuestas de las celdas deben tener una pendiente mínima de 2% con dirección al canal.

Es importante estudiar la precipitación pluvial del lugar, con el fin de establecer las características de los drenajes perimetrales y las obras necesarias, considerando la máxima precipitación anual para el diseño. Así se minimizará la producción del líquido lixiviado o percolado y se evitará la contaminación de las aguas.

Las aguas de lluvia que caen sobre las áreas vecinas al Relleno Sanitario suelen escurrirse hasta él, lo que dificulta la operación del relleno. Interceptar y desviar el escurrimiento de agua de lluvia por medio de un canal perimetral fuera del Relleno Sanitario es un elemento importante de la infraestructura, que contribuirá a reducir el volumen del líquido percolado y mejorar las condiciones de operación. Es necesario construir un canal en tierra o suelo-cemento de forma trapezoidal y dimensionarlo teniendo en cuenta las condiciones de precipitación local, el área tributaria, las características del suelo, la vegetación y la pendiente del terreno.

#### **4.11. DISTRIBUCIÓN GENERAL DE LA INFRAESTRUCTURA**

La distribución general debe definir la ubicación y dimensiones de los componentes de la infraestructura de disposición final de residuos sólidos, las cuales serán:

- a. **Área para administración y control de ingreso de residuos.** El mismo que en su mínima expresión puede ser un ambiente para el almacén de herramientas, servicios higiénicos y una caseta o garita de control.
- b. **Vía de acceso interna.** La que tendrá como mínimo 3 m. de ancho y características para el tránsito pesado y cunetas laterales para zonas con condiciones de alta precipitación.



- c. **Sector de operación.** El cual estará conformado por las celdas de disposición final en cualquiera de sus métodos (área, trinchera o mixta), drenes de recolección e instalación de almacenamiento de lixiviados.
- d. **Área para el abastecimiento y almacenamiento de material de cobertura.** Área asignada de la cual se extraerá el material para fines de cobertura del relleno sanitario o área en el cual se depositará el material de préstamo proveniente de otras canteras.
- e. **Barrera sanitaria.** Es un área perimetral en la cual se implementarán barreras naturales o artificiales que contribuyan a reducir los impactos negativos y proteger a la población de posibles riesgos sanitarios y ambientales.
- f. **Zona de seguridad.** Área libre interna del terreno que no pertenece a la barrera sanitaria y donde no se implementará ninguna instalación, en la misma que el personal puede ubicarse en caso de emergencias.

## **5. CONSTRUCCIÓN**

### **5.1. PREPARACIÓN DEL SITIO**

La preparación del terreno es indispensable para permitir la construcción de la infraestructura básica del relleno, recibir y disponer los residuos sólidos de forma ordenada y con el menor impacto posible, y del mismo modo, facilitar las obras complementarias del Relleno Sanitario.

#### **5.1.1. Limpieza y desmonte**

La limpieza y desmonte conlleva la realización de las operaciones siguientes:

- a) Corte de árboles y arbustos
- b) Quitar maleza, hierbas o residuos de las siembras
- c) Sacar los troncos y las raíces o cortar éstas
- d) Retirar o estibar el producto del desmonte al lugar que se indique, así como quemar lo inutilizable.

El trabajo de desmonte generalmente se efectúa con la ayuda de maquinaria pesada y a mano en algunos casos. Cuando se trata de vegetación arbórea tupida hay necesidad de cortar los árboles y cuando se trata de arbustos se utiliza maquinaria porque ofrece mayor ventaja.



Figura 19 Limpieza y Desmonte

### **5.1.2. Tratamiento del suelo**

#### **Nivelación**

La nivelación preparatoria es el proceso de igualar el terreno o superficie, es decir poner a igual altura dos puntos del terreno. Se ejecuta una vez completado los procesos de desmonte, deshierbe y excavación de tierra. Se realizará principalmente en la construcción de los caminos internos y externos, el sistema de drenaje y otras instalaciones de apoyo al Relleno Sanitario que lo requieran.

Los planes de nivelación preparatoria deben desarrollarse de acuerdo al diseño del drenaje del sitio, las medidas de control de la erosión y las rutas de acceso. Los planos deben mostrar elevaciones del contorno de todas las zonas modificadas y deben establecer criterios para las pendientes mínimas y máximas en todas las áreas de corte y de relleno. Es importante que las pendientes e inclinaciones de la base del Relleno Sanitario se desarrollen sólo después de considerar cuidadosamente las condiciones subsuperficiales (por ejemplo, tipo y profundidad del suelo con respecto al nivel freático) y el drenaje del área.

En caso de construir un Relleno Sanitario con revestimiento impermeable y con un sistema para el manejo del lixiviado, el fondo del Relleno Sanitario debe tener una pendiente para facilitar la recolección de lixiviado. Se recomienda una pendiente mínima del 2%. Para rellenos no revestidos, la nivelación preparatoria es menos crítica pero debe hacerse de acuerdo al plan de diseño a fin de eliminar irregularidades superficiales, controlar la escorrentía y prevenir el estancamiento.

## **Drenaje**

No se ubicará el Relleno Sanitario sobre un terreno pantanoso, una pequeña corriente o nacimiento de agua, o donde la capa freática se encuentre muy arriba.

## **Cortes y conformación de taludes**

### **Cortes**

Son las excavaciones o movimientos de los materiales, realizadas en el terreno natural, en la ampliación o abatimiento de taludes, en derrumbes y en rebajes de terraplenes.

Los materiales excavados de acuerdo con la dificultad que presenten para su extracción y carga se clasifican en:

#### **- Material A**

Es el blando o suelto, que puede ser eficientemente excavado con tractor de orugas de 90 a 110 HP de potencia en la barra – sin auxilio de arados o tractores empujadores, aunque podrían utilizarse ambos para mejores rendimientos. Los materiales clasificables como material “A” son los suelos poco o nada cementados con partículas menores de 7.5 cm. de diámetro.

#### **- Material B**

Es el que por la dificultad de extracción y carga sólo puede ser excavado eficientemente por tractor de orugas con cuchilla de inclinación variable de 140 a 160 HP en la barra o con pala mecánica de capacidad mínima de un metro cúbico sin el uso de explosivos. Además, se consideran como material “B” a las piedras sueltas menores de  $1/2 \text{ m}^3$  y mayores de 20 cm. de lado. Los materiales comúnmente clasificables como material “B” son las rocas muy alteradas, conglomerados mediante cementados y areniscas blandas.

#### **- Material C**

Es el que por su dificultad de extracción sólo puede ser excavado mediante el empleo de explosivos de detonación rápida; también se consideran como material “C” las piedras sueltas que aisladamente cubiquen más de  $1 \text{ m}^3$ . Entre los materiales clasificables como material “C” están las rocas basálticas, las areniscas y los conglomerados y fuertemente cementados, calizas y granitos.

En la clasificación de materiales se observarán las siguientes disposiciones:

- Para clasificar un material se tomará en cuenta la dificultad que haya presentado en su extracción y carga, ajustándolo al que corresponda de los materiales “A”, “B” y “C”. Siempre se mencionarán los tres tipos de materiales para determinar claramente de cual se trata en la siguiente forma: 20- 30 - 50 que quiere decir 20% de material “A”, 30% de material “B” y 50% de material “C”. Es decir que cada material se clasificará por separado y en proporción a su volumen se clasificará el total.

- Cuando no sea posible hacer la clasificación de cada uno de los materiales encontrados, se fijará a todo el volumen una clasificación representativa de la dificultad de extracción y carga considerando siempre los tres materiales aunque para alguno de ellos corresponda 00.
- Cuando el volumen por clasificar esté formado por material “C” alternado con otros de menor clasificación en proporción tal que el material “C” constituya por lo menos el 75 % del volumen total, el conjunto se considerará como material “C”.
- Las excavaciones en los cortes se ejecutarán procurando seguir un sistema de ataque que facilite el drenaje del corte.
- Al hacer las excavaciones, particularmente cuando se emplean explosivos, se evitará hasta donde sea posible aflojar el material en los taludes.
- La medición de los volúmenes se hará tomando como unidad al metro cúbico. El resultado se considerará redondeando a la unidad.
- Debido a las grandes variaciones en el tipo y disposición de los materiales, será indispensable analizar la estabilidad del terreno para definir el talud más apropiado. Se puede establecer como norma que para un corte de más de 7 m. de altura, se deberá realizar el estudio de estabilidad con base en principios de la geotecnia. Para alturas menores, casi siempre se podrá definir el talud con base en la clasificación de las rocas y suelos y en el estado de disposición de los materiales de corte.
- Para un corte de baja altura (menor a 5 metros), se puede recomendar un único talud; para alturas mayores, sería mejor tener dos taludes diferentes, mientras que en otros casos será necesaria la construcción de bermas o banquetas intermedias.
- Los taludes del terreno se dejan de tal manera que no causen erosión y puedan darle una buena estabilidad al relleno. Estos pueden ser desde verticales hasta del tipo 3:1 (horizontal: vertical), dependiendo del tipo de suelo.
- La superficie de las terrazas o terraplenes deberá tener una pendiente del 2% con respecto a los taludes interiores, a fin de conducir las aguas de lixiviado a las zanjas de drenaje y evitar encharcamientos cuando se usen como vías temporales de acceso; lo anterior contribuye también a brindar estabilidad a la obra.
- Las zanjas podrán tener forma trapezoidal, cuadrada o rectangular, dependiendo de las condiciones del suelo. La separación entre ellas será de 0.5 a 1 m., según se requiera para garantizar su estabilidad mientras permanecen vacías.

## **Excavaciones**

Se ejecutan en los lugares fijados en el proyecto a fin de obtener el material de cubierta.

Para iniciar una excavación, previamente se despalmará la superficie por atacar, desalojando la capa superficial de terreno natural que por sus características no sea adecuada para ser utilizada

como material de cobertura. Los despalmes sólo se ejecutarán en material “A”. El despalme se iniciará después de que se haya efectuado el seccionamiento de la superficie probable de ataque, y el material producto del despalme se colocará en el lugar que se indique. Se procurará que durante el ataque no se alteren ni modifiquen las referencias y bancos del nivel del seccionamiento.

Una vez despalmeado el terreno se seleccionarán nuevamente antes de ser atacados dejando las referencias y los bancos de nivel a distancias tales del lugar de ataque y de trabajo que no vayan a ser destruidos o alterados.

La ubicación y las dimensiones de las excavaciones serán fijadas en cada caso en el proyecto. Se excavará únicamente hasta la profundidad fijada en el proyecto; siempre la excavación será en material apropiado y en la forma más regular posible a fin de facilitar su medición.

La medición del material producto del despalme del sitio a excavar se hará tomando como unidad el metro cúbico y se empleará el sistema del promedio de las áreas extremas y su resultado se redondeará a la unidad. Para los materiales de la excavación se tomará como unidad el metro cúbico para cada uno de los materiales según su clasificación, seccionando la excavación misma y usando el método del promedio de las áreas extremas en distancias de 20 metros o menores sin la configuración del terreno así lo exige, el resultado se redondeará a la unidad para cada material.

### **Acarreos**

Transporte del material producto de las excavaciones de cortes, adicionales bajo la subrasante, aplicación o abatimiento de taludes, rebaje de terraplenes, escalones o despalmes, derrumbes o canales para construir un terraplén o efectuar un desperdicio.

Todos los materiales deben tener un acarreo libre de 20 metros a partir del cual su transporte se considerará como sobre acarreado.

## **5.2. PROCESO CONSTRUCTIVO**

### **5.2.1. Herramientas**

Las herramientas necesarias para la operación del Relleno Sanitario manual consisten en utensilios de albañilería, como palas, azadones, barras, picos o pichas, pisones de mano, rastrillos, horquillas, etc., más un rodillo compactador manual.

Para la construcción del rodillo, se recomienda un barril metálico con capacidad de 55 galones, llenado con piedra, arena u hormigón, con el fin de evitar que los golpes en el terreno lo abollen.

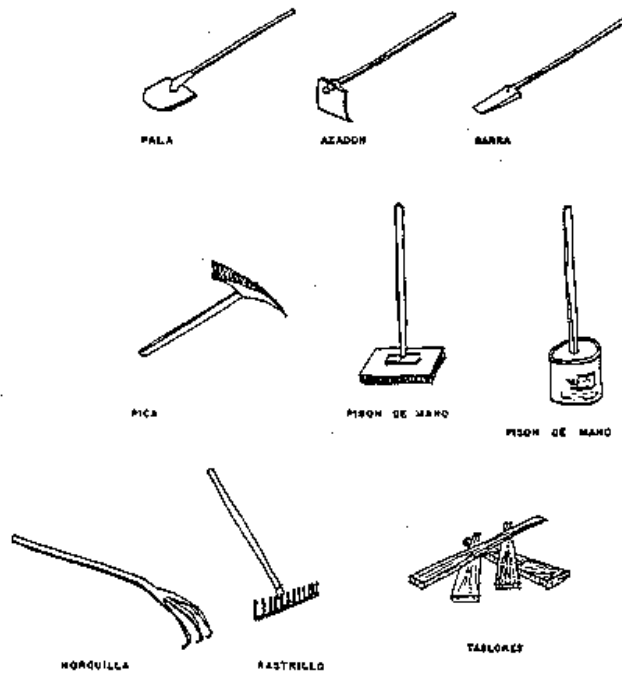


Figura 20 Herramientas

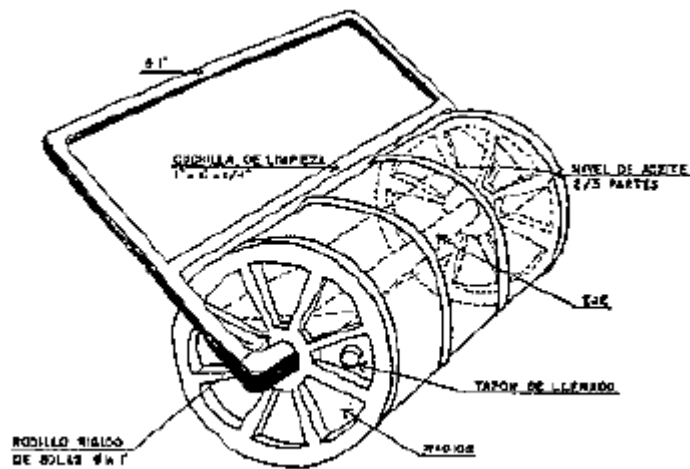


Figura 21 Rodillo

Es importante tener en cuenta que la cantidad de herramientas está en función del número de trabajadores que estarán en el Relleno Sanitario, que serán los encargados de tapar o cubrir los desechos sólidos que llegarán diariamente al relleno provenientes de los municipios involucrados en el proyecto.

En la siguiente tabla se describen las herramientas y el uso que deben tener en el Relleno Sanitario.

Nombre	Uso
Pala	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cargar, descargar y colocar basura suelta</li> <li>- Cargar, descargar y colocar material de cobertura</li> <li>- Excavar</li> <li>- Mantenimiento de la fosa séptica y laguna de tratamiento biológico (excavación de sedimento)</li> </ul>
Azadón	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aflojar el terreno</li> <li>- Trabajos de arborización</li> <li>- Mantenimiento de cunetas y canales de drenaje</li> </ul>
Barra	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aflojar el terreno para excavaciones</li> <li>- Trabajos de arborización</li> <li>- Mantenimiento y construcción de cunetas y canales de drenaje</li> </ul>
Pico	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mullir el terreno para excavaciones</li> <li>- Trabajos de arborización</li> <li>- Mantenimiento y construcción de cunetas y canales de drenaje</li> </ul>
Pisón de mano	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Compactación manual de la basura colocada en las superficies laterales (taludes)</li> </ul>
Horquilla o diablo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Carga y descarga de basura en fundas</li> </ul>
Machete	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cortar palos para la construcción de chimeneas u otros trabajos de mantenimiento</li> <li>- Afiliar palos y estacas</li> <li>- Cortar árboles pequeños para la preparación del terreno</li> </ul>
Martillo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Construcción y mantenimiento de chimeneas</li> <li>- Mantenimiento de herramientas</li> </ul>
Sierra	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cortar palos y otra madera</li> </ul>
Rastrillo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Colocación homogénea del material de cobertura: homogenización de la basura colocada</li> </ul>
Carretilla	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transporte interno de basura y del material de cobertura</li> </ul>
Rodillo manual	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Compactación de la basura y de la cubierta con tierra</li> </ul>

### **5.2.2. Construcción de trincheras**

Se realizarán trabajos de movimiento de tierras, ejecutando excavaciones en el terreno hasta llegar a los niveles establecidos en los perfiles.

Se nivelará y compactará el fondo y paredes de la trinchera, dejándolo listo para recibir su impermeabilización, la cual puede ser mediante el uso de geomembranas (espesor recomendado 1mm), y una protección con el empleo de geotextiles, o bien mediante materiales más rudimentarios como pueden ser embalajes de plástico, botellas de plástico, o cualquier material de plástico.

El material empleado para la impermeabilización debe estar sujeto en la parte superior de las trincheras, y debe ser rellenado con material propio de la zona.

El uso de arcilla como medio impermeabilizante es bastante común en los países más desfavorecidos, a continuación presentaremos una forma de poner este material para lograr esta condición impermeabilizante.

Sobre el terreno emparejado se colocarán 0,60 m de material arcilloso, homogéneo, sin contenido orgánico, con no menos de 40% en su peso seco. Este material se colocará en capas de 0,20 o 0,30 m., con una humedad algo mayor que la óptima, compactándose cada capa con rodillo, pata de cabra o similar hasta obtener una densidad seca no inferior al 90% de la densidad seca máxima establecida. El coeficiente de permeabilidad en el laboratorio para el material arcilloso no será superior a  $K = 10^{-6}$  cm/seg.

### **5.2.3. Construcción de drenes de lixiviados en trincheras**

Los drenes para los lixiviados se construirán a lo largo de toda la longitud de las trincheras para captar y conducir a los mismos hasta la zona de captación.

El diseño de los drenes debe estar de acuerdo a la producción de lixiviados.

Los drenes, al igual que las trincheras pueden ser impermeabilizados mediante el uso de geomembranas (espesor recomendado 1mm), y una protección con el empleo de geotextiles, o bien mediante materiales más naturales como es la arcilla.

El interior del dren está formado por piedras de 4'' a 6'' de diámetro aproximadamente y cubierto por material que permita filtrar los lixiviados, aislando el dren de los residuos sólidos.

Existe la posibilidad de usar tubería perforada en la conformación del dren de lixiviados, esta tubería debe estar protegida por una capa de grava de menor diámetro para evitar daños a la misma.





Figura 22 Dren de Lixiviados en Trinchera

#### **5.2.4. Construcción de drenes de lixiviados en plataformas**

Se construirán drenes de lixiviados en el exterior de las plataformas, en todo lo largo a pie de talud.

Se captarán y conducirán a los lixiviados hacia la poza de captación, las cuales serán impermeabilizadas con geomembranas y protegidas con geotextiles, o con materiales más rudimentarios citados anteriormente en el apartado 5.2.2. El interior de dichas pozas estará constituido con piedra seleccionada de 6" a 8" de diámetro aproximadamente.

Los drenes de lixiviados conducirán a estos a una poza de captación donde posterior a su almacenamiento en un período de tiempo corto, serán recirculados dentro de las trincheras y plataformas de disposición final, de haberse optado por dicha estrategia.



Figura 23 Dren de Lixiviado en Plataforma

### **5.2.5. Construcción de celdas**

Las celdas son subdivisiones o compartimentos de vertido dentro del Relleno Sanitario, interponiendo capas de cobertura intermedias para independizar una de otra. Con esta división se persigue el aislamiento de las partes para optimizar el control de las emisiones de cada una minimizando la generación de lixiviados, el área y tiempo de exposición de residuos reduciendo por tanto las exigencias de cobertura y minimizando el riesgo de arrastre de residuos con el viento.

La división del relleno en celdas se puede realizar sea cual sea el modo de explotación del Relleno Sanitario (trinchera, área, mixto), formándose mediante la deposición secuencial de capas de residuo compactado según se va recibiendo.

Las principales ventajas que se consiguen con la construcción de celdas son:

- optimizar el control de emisiones
- minimizar la producción de lixiviados
- minimizar el riesgo de formación de bolsas de gas
- facilitar la compactación más homogénea de la masa de la celda
- favorecer un manejo de residuos más adaptado a las condiciones de cada momento
- minimizar el riesgo de incendios
- agilizar el inicio de la fase metanogénica
- facilitar el acceso y movilidad de los vehículos para descargas posteriores

Generalmente, se construyen celdas diarias de trabajo, así al terminar cada jornada los residuos quedan cubiertos y aislados evitando así molestias de olores, residuos volados, esparcimientos, acceso y contacto de animales con los residuos, presencia de insectos y roedores, etc., mejorando las condiciones sanitarias del relleno y del entorno.

Pasos a seguir para la construcción de las celdas:

- Para la construcción de la primera celda se debe delimitar el área que ocupará, de acuerdo con las dimensiones estimadas basadas en la cantidad de desechos y grado de compactación fundamentalmente, esto dará una visión rápida y aclarará las dudas de los trabajadores.
- Descargar la basura en el frente de trabajo a fin de mantener una sola y estrecha área descubierta durante la jornada y evitar el acarreo de larga distancia.

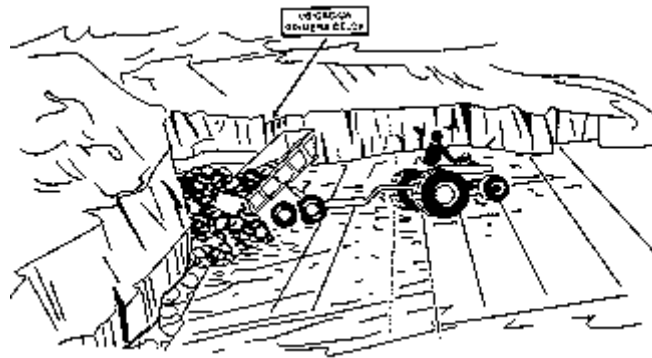


Figura 24 Descarga de los Desechos Sólidos

- Esparcir la basura en capas delgadas de 20 a 30 centímetros y compactar hasta obtener la altura recomendada para la celda en el frente de trabajo.

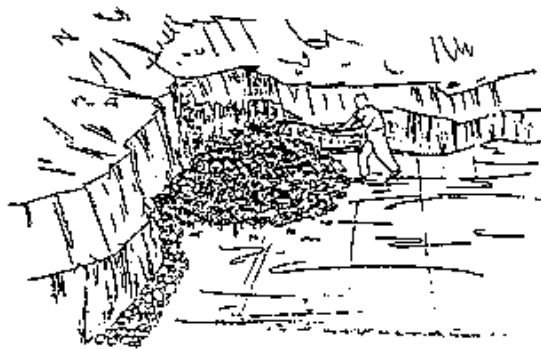


Figura 25 Esparcimiento de los desechos

- Cubrir las basuras compactadas con la tierra una vez al día al final de la jornada con el espesor suficiente para tapanlas completamente y rellenar las irregularidades de la superficie.



Figura 26 Extracción de la tierra para cubrir la basura

- Compactar toda la celda hasta obtener una superficie uniforme.

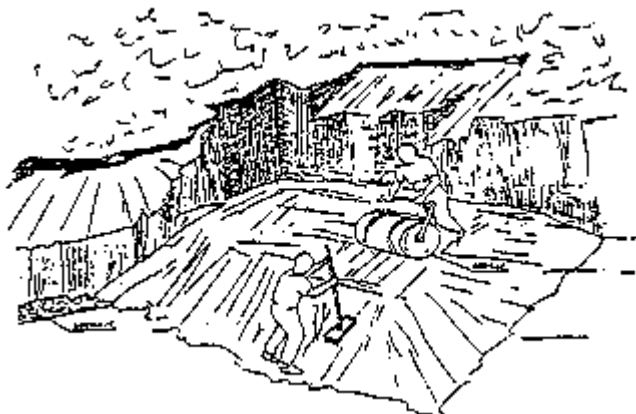


Figura 27 Compactación de la celda terminada (Primera Celda)

El tamaño y diseño de las celdas depende de la cantidad de residuos sólidos que requieren disposición.

Las celdas se forman, como se ha dicho, mediante la deposición secuencial de capas de residuo hasta llegar a una altura de unos 3 m., porque esta altura no produce grandes asentamientos ni problemas de inestabilidad del talud.

#### 5.2.5.1 Material de cobertura

La cobertura o recubrimiento es la operación por la cual las basuras depositadas y ya compactadas son tapadas diariamente con material inerte.

El recubrimiento diario de las basuras minimiza el vuelo de papeles, plásticos, etc., posibilita el tránsito de vehículos, reduce los olores en el relleno, evita el contacto de los residuos con el oxígeno del aire reduciendo la fase aerobia inicial, inhibe la aparición de roedores y aves, reduce la entrada de agua de lluvia y reduce el riesgo de incendios.

La cobertura de tierra diaria para delimitar cada una de las celdas se expresa como una relación residuos/suelo que ronda 10:1, utilizándose un espesor de cobertura de 15-20 cm.

La cobertura diaria de cada celda provoca que el relleno no sea homogéneo en sentido vertical y por ello la permeabilidad vertical será menor que la horizontal. Esto producirá caminos de flujos horizontales y acumulaciones de lixiviados que pueden afectar a la estabilidad. Por ello los requerimientos para el material de cobertura diaria son poco exigentes pudiendo utilizarse tierras de excavación o incluso arenas que favorecen la conectividad hidráulica y el drenaje. Si se utilizan coberturas impermeables, p.ej. arcillas, es recomendable un arado de la superficie antes del vertido de la siguiente capa.

La cobertura de los desechos se realizará en tres etapas:

**1ra. Etapa.** Cobertura Diaria: en este tipo de cobertura el espesor de la capa de suelo puede ser de 20 a 30 cm. lo que servirá para el control del arrastre de papeles y plásticos, controlar la proliferación de vectores y disminuir la infiltración de aguas lluvias.

**2da. Etapa.** Cobertura Intermedia: con esta cobertura, se logra los mismos propósitos que en la cobertura diaria, además sirve para el desplazamiento de los vehículos recolectores, da estabilidad a las chimeneas para el drenaje de los gases; por lo que se recomienda un espesor de capa de 30 a 40 centímetros, compactada a cada 15 o 20 centímetros, la cual deberá ser colocada cada semana y se deberá controlar que no se erosione.

**3ra. Etapa.** Cobertura Final: esta deberá tener un espesor de 60 centímetros, compactada en capas de 20 centímetros, del mismo tipo de tierra utilizada para las demás coberturas y 20 centímetros, adicionales de humus (tierra negra), con el fin de que se facilite el crecimiento de vegetación.

El ancho de la celda equivale al frente de trabajo necesario para que los vehículos recolectores puedan descargar la basura al mismo tiempo sin interferencias ni esperas, o como múltiplo del ancho de la maquinaria utilizada para su compactación.

El largo está definido por la cantidad de residuo que llega al relleno en un día, aunque se debe jugar con estas dimensiones y la relación largo/ancho para perseguir siempre una superficie cuadrada para homogeneizar el comportamiento de los residuos en el interior y minimizar las necesidades de tierra de cobertura.

Los taludes de finalización de cada celda tendrán una pendiente máxima entre 10 –30% para facilitar las tareas de compactación asegurando a su vez la estabilidad del mismo. Pendientes menores, son mejores para conseguir una buena compactación, a la vez que reducen el riesgo de producirse fallas en los taludes y el mantenimiento a largo plazo. Por el contrario, cuanto mayor sea la pendiente de los taludes menor será la relación área superficial/volumen, con el consecuente ahorro de material de cobertura.

La recomendación general es trabajar con pendientes del 25-30%.

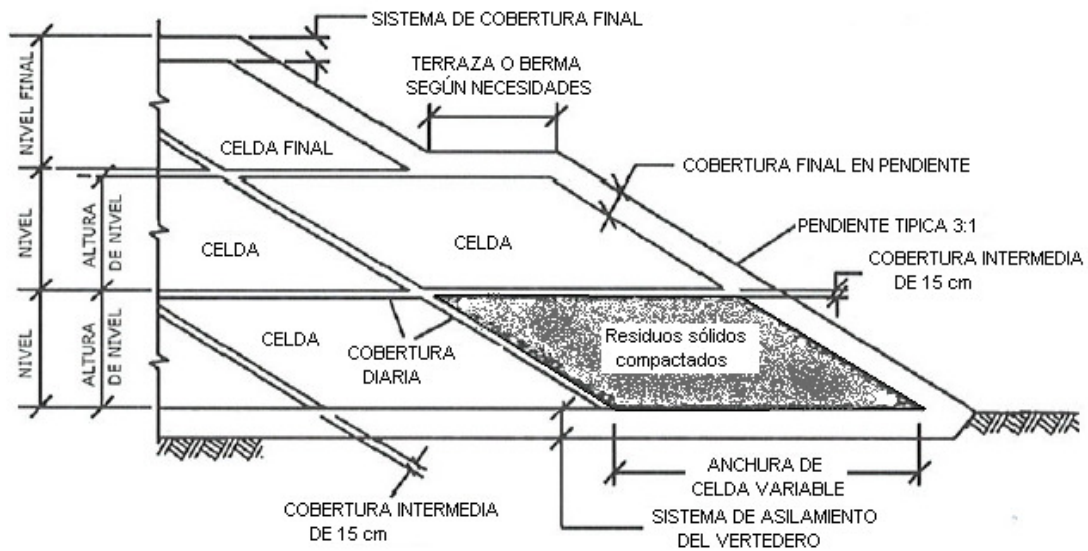


Figura 28 construcción de celdas

La continuación de la disposición de residuos en días consecutivos se realiza con la formación de celdas contiguas inicialmente en sentido transversal al avance del relleno formando líneas de celdas o “fajas” y a continuación en el sentido de avance del frente de trabajo.

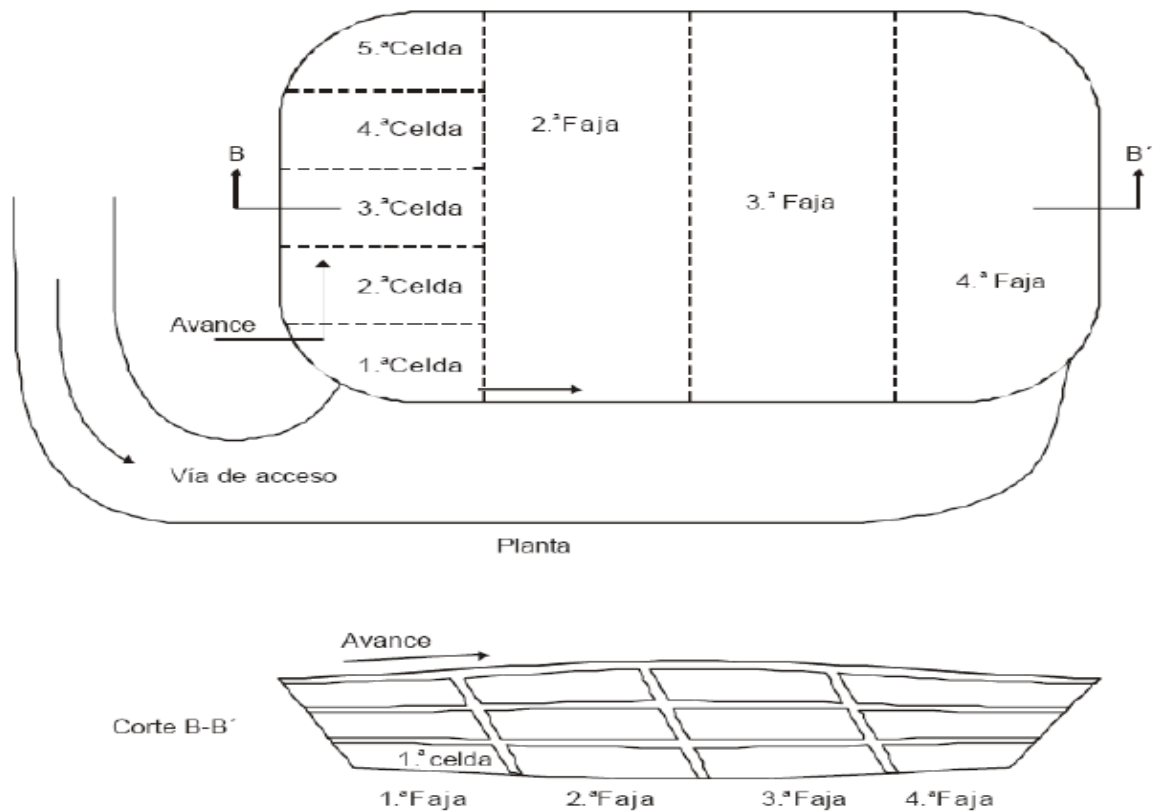


Figura 29 Avance de la construcción de las celdas

Como resultado de la consecución de las celdas se van completando grandes capas de residuo compactado y cubierto formando niveles sucesivos.

### 5.2.5.2 Compactación

La compactación es el proceso por el cual la basura ya depositada es aplastada por vehículos. El grado de compactación deseado se alcanza combinando cuatro variables: el peso de la maquinaria, el número de pasadas que realiza, la pendiente y el espesor de la capa de basuras.

La compactación aumenta la vida útil de relleno al reducir los requerimientos de espacio; facilita el movimiento de vehículos; reduce el riesgo de asentamientos o movimientos de las basuras; reduce la presencia de moscas y parásitos; reduce el riesgo de fuego en el interior del relleno y los eventuales incendios superficiales; y aumenta la producción de biogás.

Cabría pensar que lo más idóneo es intentar maximizar la densidad de los residuos depositados, por ejemplo, como fardos o balas mediante un compactador, pero esto conlleva un riesgo: tan elevada densidad no permite alcanzar el grado de humedad óptimo para la fermentación de la materia orgánica, pudiendo llegar a inhibirse la producción de gas.

La densidad de los desechos sólidos a alcanzar en los Rellenos Sanitarios manuales debe ser de  $400 - 500 \text{ Kg/m}^3$  la cual es relativamente baja, ya que la compactación se realiza con pisones y rodillos manuales.

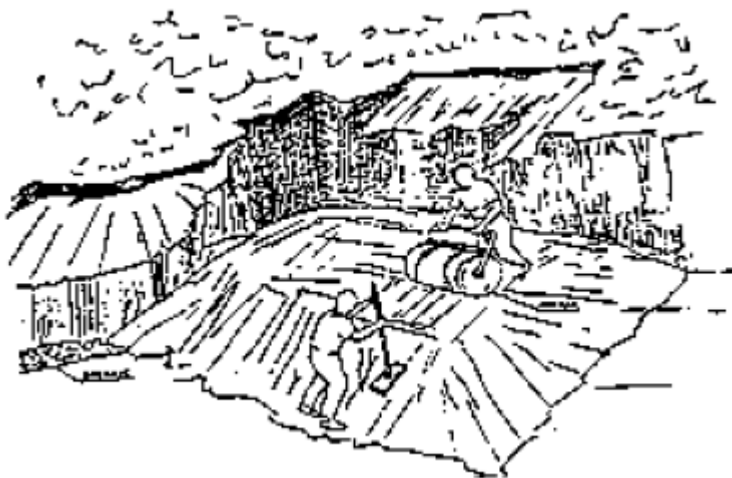


Figura 30 Compactación realizada con pisones y rodillos manuales

Existen otros tipos de factores a considerar que aumentan la compactación de los desechos sólidos en el relleno, entre estos están:

- Tránsito de vehículos sobre las celdas ya terminadas, es recomendable no realizar este trabajo en período lluvioso, puesto que hay peligro que se hundan los vehículos si el terreno está demasiado flojo. El transitar de los vehículos sobre los desechos se puede facilitar poniendo planchas y palos sobre la celda de la basura.

- Descomposición de la materia orgánica, la cual se transforma en agua, humus y gases, lo que reduce su volumen haciendo que las celdas superiores se compacten debido a su peso a las celdas inferiores.
- Almacenamiento de material de cobertura en las celdas ya terminadas.

### 5.2.6. Construcción de chimeneas

Para Rellenos Sanitarios Manuales es aconsejable realizar las chimeneas con un diámetro de 0.3 a 0.5 m y separadas de 20 a 50 m, considerando que como mínimo se colocará una por celda en la disposición final cuando el Relleno Sanitario es relativamente pequeño y no cuenta con celdas de más de 2500 m<sup>2</sup>.

Estas chimeneas serán construidas de forma vertical a medida que avanza el Relleno Sanitario y desde la base del mismo, procurando que el entorno de la chimenea este bien compactada.

Los materiales de construcción pueden ser diversos, se aconsejan puntales de madera, con trabas a cada metro, así mismo recubiertos con malla y rellenos de piedra con diámetros de 4'' o 6'' u otro tipo de material como piedra partida o graba de dimensiones mayores a los 4 cm., con el fin de garantizar el flujo del gas durante la vida útil del relleno y su posterior cierre.



Figura 31 Construcción de Chimeneas



## 6. OPERACIÓN DE RELLENO SANITARIO

Todo Relleno Sanitario debe contar con un plan de operaciones.

### 6.1. DEL PERSONAL

**Cantidad de trabajadores:** se precisará la cantidad de trabajadores considerados para la operación del Relleno Sanitario, lo cual se determinará en función de la cantidad de los residuos a recepcionar diariamente y el horario de operación.

El siguiente ejemplo muestra como se calcula la necesidad de mano de obra para un pequeño Relleno Sanitario Manual.

Número de habitantes	10000 habitantes
Producción de basura	5 t/día
Volumen de basura	9,09 m <sup>3</sup> /día
Área rellenada diariamente	4,92 m <sup>2</sup> /día
Volumen de tierra para cobertura	5 m <sup>3</sup> /día
Duración de una jornada	8 h/día
Tiempo de trabajo efectivo	6 h/día
Días laborables por semana	6 días/semana

Hay que considerar que los trabajos pesados como movimiento de basura y tierra con palas no se pueden hacer ininterrumpidos durante 8 horas. Es más realista considerar un tiempo efectivo de 75% de la jornada y dedicar el resto del tiempo a trabajos de mantenimiento más ligeros.

a) Mano de obra necesaria para el movimiento de los desechos

$$\frac{PDB(T / día) \times 7}{0,8(T / (h - hombre)) \times horas laborables día \times días laborables semana} = \frac{5 \times 7}{0,8 \times 6 \times 6} = 1,21 \text{ hombre / día}$$

b) Mano de obra para la compactación de los desechos

$$\frac{Área superficial (m^2) \times 7}{0,92(m^2 / (h - hombre)) \times horas laborables día \times días laborables semana} = \frac{4,92 \times 7}{4,92 \times 6 \times 6} = 0,19 \text{ hombre / día}$$

c) Movimiento de tierra

$$\frac{Tierra(m^3) \times 7}{0,35 \times 0,7 (m^2 / (h - hombre)) \times horas laborables día \times días laborables semana} = \frac{5 \times 7}{0,5 \times 6 \times 6} = 1,95 \text{ hombre/día}$$

El coeficiente de rendimiento para el movimiento de tierra varía entre 0,35-0,70, según el tipo de tierra (pesada, ligera, dura, suelta, suelo natural o tierra anteriormente colocada para servir como cobertura) y se debería verificar bajo condiciones locales.

En el ejemplo que nos ocupa se estimó un valor de 0,5.

d) Mano de obra necesaria para la compactación de la celda cubierta

$$\frac{Área superficial(m^2) \times 7}{4,92 (m^2 / (h - hombre)) \times horas laborables día \times días laborables semana} = \frac{4,92 \times 7}{4,92 \times 6 \times 6} = 0,19 \text{ hombre/día}$$

Necesidad total de mano de obra:

Movimiento de los desechos	1,21 hombre/día
Compactación de los desechos	0,19 hombre/día
Movimiento de tierra	1,95 hombre/día
Compactación de la celda	0,19 hombre/día
<b>TOTAL</b>	<b>3,54 hombres/día</b>

En este ejemplo se necesitan 3,54 hombres/día, pero habría que considerar si es más económico hacer trabajar una persona a media jornada o hacerlo trabajar la mitad del tiempo en el relleno y la otra mitad emplearlo en otras tareas.

**Horario de atención y jornal de trabajo:** el horario de atención se define por la operación del Relleno Sanitario, debiendo priorizar horarios diurnos aprovechando la luz del día. La jornada de trabajo conforme a las normas legales es de 8 horas, sin embargo, por el tipo de actividad es recomendable que se considere sólo 6 horas operativas en el Relleno Sanitario.

**Salud ocupacional, higiene y seguridad de los trabajadores:** este aspecto es de vital importancia y debe ser tenido en cuenta por el responsable del proyecto de RSM, ya que de ello dependerá la preservación y protección de la salud de los trabajadores.

El proyecto debe considerar el desarrollo de un Plan de salud ocupacional, higiene y seguridad. El mismo que contendrá un componente de capacitación, evaluaciones médicas e inmunizaciones, medidas de protección y seguridad. Los trabajadores bien entrenados podrán

desarrollar mejor sus labores, incrementando la eficiencia y disminuyendo los accidentes laborales.

El administrador o titular del RSM debe dotar a todos los trabajadores en cantidad suficiente para cambio y limpieza, la indumentaria y equipos de protección personal (EPP) necesarios, según la función que desarrollen. Los trabajadores que realizarán labores de operación en las celdas deben estar protegidos con lo siguiente: casco, mascarilla de filtro para polvos y gases, ropa de protección, guantes de cuero, y botines de seguridad.



Figura 32 Equipo de protección

## **6.2. OPERACIONES DE DISPOSICIÓN FINAL**

Como se ha comentado, el sellado final o recubrimiento de un Relleno Sanitario o parte de él, está formado por varias capas, cada una con su función, pero que, en conjunto, tienen los siguientes objetivos:

- Evitar la infiltración de las precipitaciones en el relleno
- Evitar la producción de emisiones incontroladas

La principal condición que debe cumplir el sellado para alcanzar estos objetivos es la hermeticidad y durabilidad para cubrir a largo plazo la evolución del relleno hasta el agotamiento de la actividad interna de la masa de residuos.

En la siguiente figura se presenta el esquema del sellado final hermético y las capas que constituyen el mismo:

	CAPA	MATERIALES
	SUPERFICIAL	SUELO-SOPORTE PARA: - CUBIERTA ARBUSTIVA (60 cm) - CUBIERTA ARBOREA (3 m)
	DE PROTECCIÓN	GEOTEXTIL
	DE DRENAJE	GRAVA Y ARENA (60 cm) GEOMALLA
	DE BARRERA	GEOMEMBRANAS GEOSINTÉTICOS DE ARCILLA
	SUB-BASE	SUELO NATIVO(30-60 cm)
	RESIDUOS	

Figura 33 Capas que contiene el sellado

Se desarrolla a continuación las funciones y descripción de cada una de las capas:

### Capa básica

#### **Función**

Sirve como fundamento para la compactación mecánica de las capas superiores y, hasta cierto punto, reduce las variaciones en la compactación.

#### **Exigencias para los materiales**

Los componentes indeformables deben poseer un tamaño inferior a los 15 cm. Las coberturas preliminares de tierra pueden formar parte de la capa básica.

#### **Espesor de la capa**

Sin exigencias, variable según las condiciones del Relleno Sanitario.

#### **Realización**

Se debe emplear una compactadora de más de 20 toneladas. Los taludes con pendientes superiores a la relación 1:3 deberán ser reperfilados.

Las coberturas preliminares de tierra que delimitan la celda pueden formar parte de la capa básica.

Tras la compactación se deberán instalar drenes horizontales para el gas mediante su instalación en zanja con relleno de arena.

### Capa de apoyo

#### **Función**

La capa de apoyo se coloca sobre la capa básica para proporcionar una cobertura intermedia y superficie lisa para la construcción de la cobertura final.

La capa de apoyo tiene tres funciones:

- 1 Evitar la penetración de objetos punzantes en el sellado
- 2 Servir de base para las capas sellantes
- 3 Servir de suplemento para el drenaje del gas

#### **Exigencias para los materiales**

La arena utilizada para la capa arenosa deberá tener la resistencia y permeabilidad adecuadas para el gas. Las posibles contaminaciones no pueden influir en las características mecánicas. Si sobre la capa de apoyo se instala un sellado sintético sin capa de geotextil no tejido, la granulometría máxima de la capa de apoyo puede ser de hasta 3 mm. Si se aplica una capa de geotextil no tejido, se permite una granulometría de 5 a 6 mm.

#### **Espesor de la capa**

Mínimo, 0,30 m. En aquellos puntos donde la capa básica esté debilitada o húmeda el espesor de la capa de apoyo se incrementará un mínimo de 10 cm.

#### **Realización**

El grado de compactación in situ, debe ser al menos del 95%. Si se incrementa el grosor de la capa es recomendable añadir el material en la base de la capa de apoyo. En estos puntos puede ser necesario instalar un drenaje adicional. Si se estima preciso, como separación o refuerzo, puede ser instalado un geotextil entre la capa básica y la de apoyo. Los drenes para el gas se instalarán en la capa básica empleando zanjas rellenas de arena.

Si se realiza con material permeable, esta capa puede servir como capa de drenaje de gas. En los taludes puede servir para recoger los lixiviados hasta un sistema de recogida al pie del talud. En este caso la compactación debe realizarse con humedad baja hasta conseguir integridad estructural y estabilidad de los taludes.

Si se realiza con material impermeable servirá para reducir la percolación e infiltración de precipitaciones, reduciendo la producción de lixiviados. En este caso el material debe ser compactado para aportar una superficie uniforme para la disposición de las capas posteriores.

### Sellado

## **Función**

Controlar y evitar, en la medida de lo posible, la infiltración de las precipitaciones en el Relleno Sanitario, así como evitar la emisión incontrolada de gas.

## **Exigencias para los materiales**

Para un sellado sintético se utilizará el mismo tipo de material que para la impermeabilización de la base del vaso de vertido.

Para el sellado mineral se repiten igualmente las mismas condiciones que en el caso del sellado sintético, puesto que las exigencias y funciones que debe cumplir el sellado son equivalentes a las que se requieren para la impermeabilización de la base.

## **Espesor de las capas y secuencia**

Sellado sintético: espesor mínimo de 2 mm, al margen de la textura de la capa superficial

Sellado mineral:

- arena-bentonita: espesor efectivo mínimo de 0,25 m compensado mediante un incremento en el espesor en el caso de superficies irregulares y otras situaciones anómalas.
- arcilla: mínimo 0,50 m

## **Realización**

Secuencia de las capas: desde el punto de vista de la estabilidad y aspectos prácticos del trabajo se recomienda instalar la capa sintética encima de la capa mineral.

Sellado sintético:

Las bobina de geosintético, se desenrollarán manual o mecánicamente evitando en todo caso el arrastre sobre el suelo.

En cuanto a la posición de los geosintéticos, se vigilarán particularmente los siguientes puntos:

- Se deben respetar los anchos mínimos de recubrimiento en función de las técnicas de soldadura a emplear.
- Se minimizará en la medida de lo posible la superposición de varias capas de geosintéticos desplazando las coincidencias de las juntas.

En los puntos donde coinciden las juntas de más de dos capas de geosintético se debe hacer una soldadura tipo T y proteger adicionalmente con un pedazo soldado encima.

- Sobre los taludes, se desenrollarán los geosintéticos con precaución en sentido descendente, con el fin de facilitar la instalación y degradación del soporte. Conviene posicionar una línea de unión según la mayor pendiente y evitar las uniones horizontales.

- Se debe prohibir la circulación de los vehículos sobre los geosintéticos salvo disposiciones particulares a justificar por la empresa de instalación.

- Para la soldadura, las láminas deben solaparse alrededor de 15 cm para asegurar que exista suficiente espacio en la ejecución de la operación y cubrir eventuales irregularidades en el borde de la lámina no detectadas. Los bordes a soldar deberán estar limpios de polvo o incrustaciones y completamente secos.

- La técnica de soldadura por termofusión ha demostrado ser el método más fiable para la unión de geomembranas flexibles. Según las operaciones a realizar se emplearán dos técnicas diferentes:

- La unión de las láminas: Termofusión doble con canal central de ensayo de dos bandas de soldadura de 15 mm de ancho cada una a ambos lados de un hueco central vacío de 15 mm de ancho, destinado al ensayo de aire a presión.

- Los puntos singulares: (reparaciones, extremidades de la soldadura o doble canal, puntos triples, zonas difícilmente accesibles, uniones a las tuberías, etc.) serán soldados por extrusión con una sola banda de soldadura.

- La unión o la soldadura se debe realizar inmediatamente después del desenrollado de la bobina. La unión de las láminas se realizará en función de su naturaleza:

- Las láminas de geocompuestos desenrolladas sobre la superficie a impermeabilizar serán unidas por simple calentamiento, sin dañar la geomembrana.

- Las láminas de geomembranas serán soldadas entre ellas mediante soldadura doble con canal central de comprobación.

Durante la instalación, se tomará la precaución de colocar un lastre temporal encima (bolsas de arena o neumáticos) para la protección de los geosintéticos de los efectos del viento. Todas las láminas de geosintéticos serán inspeccionadas visualmente para comprobar la existencia de defectos e imperfecciones, deterioros, roturas u otros defectos, y se marcarán todos los defectos con una tiza para posteriormente repararlos de manera adecuada.

Sellado mineral:

- arena-bentonita: se obtiene la homogeneidad adecuada con una mezcladora forzada. El porcentaje de humedad debe coincidir con el porcentaje óptimo definido en base a los ensayos de aptitud.

- arcilla: se debe mantener el porcentaje de humedad natural.

En todo caso el contenido mínimo de esta capa sellante será de un 35% de arcilla.

Tanto en el caso de la capa sintética como en el de la mineral las condiciones climáticas influyen notablemente en la calidad de los trabajos.

### *Arena para la capa drenante*

#### **Función**

Esta capa, junto con el sistema de drenaje instalado en su interior, debe evacuar el exceso de precipitación. Así mismo la capa juega un cierto papel en la protección del sellado situado por debajo de la misma contra la actividad de bichos y alimañas, el desarrollo radicular y el impacto de los futuros usos del relleno.

#### **Exigencias para los materiales**

Un material adecuado es la arena de tamaño medio, altamente permeable, sin carbonatos y con un bajo contenido en materia orgánica. La fracción limosa con tamaño de grano inferior a 2 mm debe ser como máximo del 5%. Si por debajo de la capa de drenaje se instala un sellado sintético el tamaño de grano máximo sería de 3 mm.

#### **Espesor de la capa**

Mínimo 0,30 m

#### **Realización**

Se debe comprobar la compactación. En relación con el peligro de erosión la capa de drenaje debe ser cubierta lo antes posible (en un máximo de 1-2 días) por una capa de cobertura.

### *Sistema de evacuación de agua de la capa drenante*

#### **Función**

Este sistema garantiza un drenaje rápido del agua infiltrada estancada sobre la capa sellante, y evita una fuerte acumulación de agua sobre el sellado como consecuencia de una capacidad drenante demasiado limitada. La acumulación del agua favorece la infiltración a través de la capa mineral.

#### **Exigencias para los materiales**

Se recomienda utilizar conductos de PVC o polipropileno de un diámetro mín. de 60 mm en lecho drenante de grava, gravilla volcánica o escorias. Si se previera la infiltración de partículas finas los conductos deberían ser envueltos en una capa filtrante. Un sistema drenante formado por dos geotextiles envolviendo una capa drenante, puede constituir una alternativa posible si se demuestra que esta construcción tiene la estabilidad suficiente.



## **Realización**

En la capa drenante se excavan varias zanjas en las que se colocan manualmente los drenes. Eventualmente los drenes pueden ser instalados con anterioridad a la capa drenante. Sin embargo esto conlleva cierto riesgo en lo que a posibles daños se refiere.

El sistema de conductos debe ser instalado con una pendiente mínima del 3% con respecto al plano horizontal.

Como segunda alternativa a la ejecución de una red de tuberías se puede colocar una lámina geodrenante.

## Cobertura

### **Función**

Esta capa sirve como base para la vegetación, para los futuros usos y como protección para el resto de las capas.

### **Exigencias para los materiales**

La aptitud del material deberá ser determinada por un experto mediante ensayos en laboratorio o sobre el terreno. En base a la capacidad de retener el agua por parte de la vegetación y de la sensibilidad del material a la erosión, se consideran aptos los siguientes tipos de suelo:

- suelos arenosos con una cantidad de materia orgánica media-alta (porcentaje de materia orgánica >3%)
- arena con un porcentaje de limos medio-bajo (fracción limosa entre el 5 y el 18%)
- arcilla limosa o limo arcilloso (fracción de arcilla entre el 18 y 35%)

### **Espesor de la capa**

En caso de vegetación herbácea: mín. 0,8 m

En caso de vegetación con raíces más profundas: mín. 1,0 m.

### **Realización**

El suelo aplicado debe estar lo más seco posible y no puede extenderse durante períodos húmedos. La parte superior de la capa no puede compactarse demasiado y, en caso necesario, deberá ser arada y compactada ligeramente. Durante la aplicación en diferentes capas se debe realizar una transición gradual entre las mismas para evitar efectos de contacto. El sellado de la capa debe realizarse siguiendo las isolíneas.

## Vegetación

### **Función**

La vegetación debe asemejarse con el paisaje y contrarrestar la erosión de la cobertura.

### **Tipo de vegetación**

Depende de las exigencias de uso impuestas al emplazamiento una vez finalizado el sellado. Se desaconseja la plantación de árboles de gran porte por la limitada capacidad de anclaje que ofrece el emplazamiento y la posibilidad de ser abatidos por el viento.

Especialmente en el período inmediatamente posterior a la instalación de la cobertura, la hierba juega un papel importante de cara a evitar/limitar la erosión.

### **Realización**

En primer lugar se debe hacer una preparación adecuada del suelo para, posteriormente, realizar una plantación o semillado con una mezcla adecuada de especies de rápido crecimiento para asegurar una cobertura y protección lo más rápida posible del sellado. Se procurará finalizar esta plantación antes del otoño para favorecer este rápido desarrollo. Por último, la plantación a largo plazo se producirá cuando las especies inicialmente sembradas y la vegetación nativa se desarrollen, lo que indicará una capacidad suficiente del suelo creado.

## **6.3. OPERACIONES DE MANTENIMIENTO**

El mantenimiento es necesario para garantizar el buen funcionamiento de las instalaciones a largo plazo.

A continuación se recogen los puntos más importantes a incluir en estos trabajos:

- 1 Descripción del equipamiento en cuestión
- 2 Elementos: los elementos individuales propios de cada instalación que requieren un mantenimiento diferente
- 3 Mantenimiento: una breve descripción
- 4 Frecuencia: se distinguirá entre mantenimiento periódico y en caso de necesidad (por fallos). Para el mantenimiento periódico de cada instalación se puede establecer una frecuencia de realización de los trabajos. El mantenimiento en caso de necesidad se lleva a cabo en circunstancias especiales que pueden incluir, entre otras, un fallo en los sistemas, movimientos de tierras y anomalías en el programa de medición
- 5 Localización: el lugar donde se realizan los trabajos
- 6 Fallos más comunes: para cada equipamiento se indican uno o varios fallos
- 7 Fase del Relleno Sanitario en el momento de realizarse los controles. Se distingue entre:

- control durante la fase de construcción
- control durante la fase de explotación

- control durante la fase de sellado
- control durante la fase de seguimiento

8 Comentarios: información suplementaria en caso de ser necesaria.

#### **6.4. CIERRE Y POST-CIERRE**

Para todo tipo de depósitos controlados de residuos se asegurará su aislamiento definitivo de la infiltración del agua de lluvia y se integrará la instalación en el medio. Se deberá garantizar el uso futuro del emplazamiento compatible con la presencia de residuos. A partir de la última capa de residuos:

- Instalar una capa de asentamiento de un espesor de 50 cm.
- Instalar un nivel drenante para la evacuación de gases.
- Instalar una capa de impermeabilización mineral natural (arcilla,  $k \geq 10^{-9}$  m/s) de un espesor mínimo de 30 cm para depósitos de materiales inertes (clase I) y de 90 cm para depósitos de residuos especiales y no especiales (clases III y II).
- Para depósitos de clase II y III puede requerirse instalar sobre la capa mineral de impermeabilización una lámina sintética de un espesor de 2mm.
- Sobre la capa de impermeabilización se instalará un nivel drenante de 30 cm de espesor al cual se le sobrepondrá una primera capa de 50 cm de tierra capaz de soportar la vegetación y una segunda capa de tierra vegetal de 30 cm. debidamente abonada.
- Cerrado definitivamente el depósito, éste se integrará en el medio por medio de la siembra de especies idóneas que deberán ofrecer una protección suficiente contra la erosión por el agua o el viento y minimizar la infiltración del agua de lluvia.

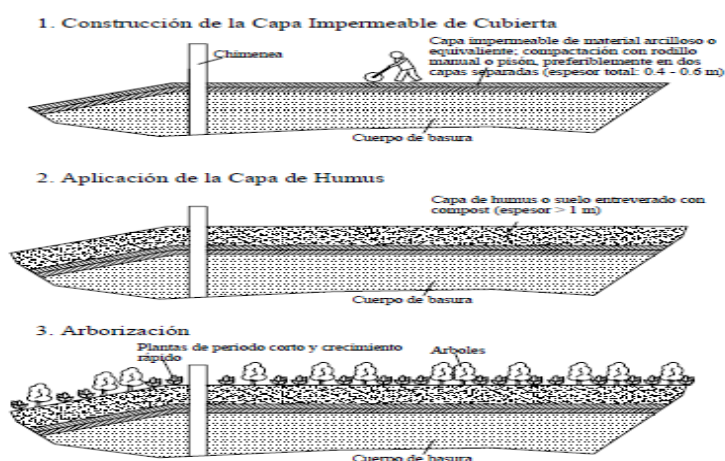


Figura 34 Cierre del Relleno Sanitario

## **6.5. USO FUTURO DEL ÁREA DESPUÉS DEL CIERRE**

En principio, los posibles usos de un Relleno Sanitario, una vez que se haya clausurado, se podrían definir en los siguientes tipos:

- Agrícola
- Reforestación
- Recreativo
- Habitable
- Industrial

El uso final previsto para el sitio de un Relleno Sanitario es muy importante a la hora de desarrollar el plan de clausura final y conseguir la aceptación de las administraciones reguladoras y de la población en general.

Los principales aspectos que rodean a un antiguo Relleno Sanitario y que condicionarán los posibles usos posteriores y el plan de clausura:

- Baja capacidad de carga del terreno
- Asentamientos diferenciales
- Producción de metano que puede emanar a la atmósfera y/o puede estar confinado en “burbujas” provocando riesgo de explosiones
  - El carácter corrosivo de la descomposición sobre aceros, hormigones y materiales de construcción
  - Producción de olores desagradables
  - Aceptación del público

Aunque el uso de un sitio antiguamente ocupado por un Relleno Sanitario correctamente clausurado no presenta riesgos para la salud pública, sí presenta rechazo por la población.

Para usos de pastoreo o agrícolas el recubrimiento debe ser lo suficientemente profundo como para conseguir que las raíces no entren en contacto con los residuos ya que, además de impedir el crecimiento de las plantas, existe riesgo de introducir elementos dañinos en la cadena alimentaria. La profundidad mínima que se debe guardar para ciertas plantas es:

Hierba: .....	>3 m
Cereales: .....	>1 m
Vegetales enraizados: .....	>1 m
Árboles con desarrollo lateral de raíces: .....	>2 m
Árboles con desarrollo profundo de raíces: .....	>4 m

El uso de un relleno clausurado como lugar para la construcción no es aconsejable debido a las restricciones comentadas tales como movimiento de gases, corrosión de materiales, asentamientos diferenciales, baja capacidad de carga.

Los usos más adaptados son usos recreativos al aire libre tales como instalaciones deportivas, parques, campos de golf, áreas verdes. Aunque en todo caso debe vigilarse las necesidades de riego por el potencial incremento de la generación de lixiviados o interferencia con el drenaje.

Los usos que requieran la construcción de edificios son completamente no recomendables por las dificultades técnicas que implica el material de base heterogéneo, con asentamientos diferenciales, efectos corrosivos y la liberación de gases y olores en las excavaciones.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Guía para la implementación, operación y cierre de rellenos sanitarios.
- Guía para el Diseño, Construcción y Operación de Rellenos Sanitarios Manuales, Programa de Salud Ambiental Serie Técnica No. 28. Organización Panamericana de la Salud, Jorge Jaramillo, 1991.
- Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales. Jorge Jaramillo. 2002.
- Manual de Diseño y construcción de Vertederos de RSU. Iván Vaquero Díaz. 2004.
- Diseño, construcción, operación y cierre de rellenos sanitarios municipales, Servicio Alemán de Cooperación Social – Técnica, Loja Ecuador, 2002.
- Recolección y tratamiento de Desechos Sólidos. Manuales Elementales de Servicios Municipales.
- Master en Ingeniería medioambiental y Gestión del Agua 2007/2008. Residuos Sólidos Urbanos. Julio González.
- Programa de Doctorado en tecnología, Administración y gestión del Agua. Predicción de Lixiviados en Vertederos de Residuos Sólidos Urbanos en Ambientes Semiáridos. Aplicación del Modelo Help en el Vertedero de Fuente Álamo (Murcia). Javier Senent Aparicio.
- Guía de Diseño, Construcción, Operación, Mantenimiento y Cierre de Residuos Sólidos Municipales.
- Manual de Especificaciones Técnicas para la Construcción de Rellenos Sanitarios para Residuos Sólidos Urbanos (RSU) y Residuos de Manejo Especial (RME).
- Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Rellenos Sanitarios Municipales. Eva Röben. DED/Ilustre municipalidad de Loja, Ecuador.
- Diseño y Factibilidad de Relleno Sanitario Manual para el municipio de La Libertad, Departamento de la Libertad. Ivannia Yanet Fernández Sandoval.
- Diseño de un Vertedero de Residuos Sólidos Urbanos con Aprovechamiento Energético de Biogás en la provincia de Ávila. Marco Martínez Martín, Irene Cuenca Marcos.
- Producción y Recuperación del Biogás en Vertederos Controlados de Residuos Sólidos Urbanos: Análisis de Variables y Modelización. Santiago Martín González.
- Master Profesional en Ingeniería y Gestión Medioambiental 2009-2010 Oscar Luis Méndez Lucas

- In: Andrés, P y Rodríguez, R (Eds) 2008. Evaluación y prevención de riesgos Ambientales en Centroamérica
- PFC. Proyecto Fin de Carrera de Ingeniería Técnica en Minas (Sondeos y Prospecciones Mineras)
- RELLENOS SANITARIOS MANUALES. Álvaro Cantanhede, Leandro Sandoval. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.

[www.bvsde.paho.org](http://www.bvsde.paho.org)

[www.bvsde.ops-oms.org](http://www.bvsde.ops-oms.org)

[http://www.ingenieriaquimica.org/articulos/relleno\\_sanitario](http://www.ingenieriaquimica.org/articulos/relleno_sanitario)

[www.iit.upcomillas.es](http://www.iit.upcomillas.es)

[www.dub128.mail.live.com](http://www.dub128.mail.live.com)

[www.es.climate-data.org](http://www.es.climate-data.org)

[www.es.slideshare.net](http://www.es.slideshare.net)

[www.reciclame.info](http://www.reciclame.info)