

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería

Diseño de un sistema de tratamiento de desechos sólidos
urbanos clasificados de la ciudad de Quetzaltenango

Trabajo de investigación presentado por Candelaria Manrique Zúñiga, para
optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Química

Guatemala
Diciembre, 2005

Diseño de un sistema de tratamiento de desechos sólidos
urbanos clasificados de la ciudad de Quetzaltenango

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería

Diseño de un sistema de tratamiento de desechos sólidos
urbanos clasificados de la ciudad de Quetzaltenango

Trabajo de investigación presentado por Candelaria Manrique Zúñiga, para
optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Química

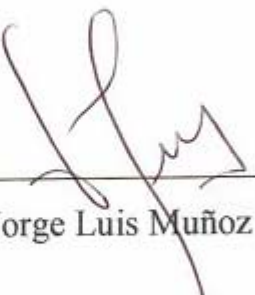
Guatemala
Diciembre, 2005


Vo.Bo.:

(f) 
Ing. Jorge Luis Muñoz
Asesor

Tribunal:

(f) 
Ing. Jose Eduardo Calderón

(f) 
Ing. Jorge Luis Muñoz

(f) 
Lic. Roberto de León

Fecha de aprobación: 08 de diciembre 2005

RESUMEN

En este trabajo se establecieron los lineamientos para el tratamiento de los desechos sólidos urbanos de la ciudad de Quetzaltenango, ya que actualmente no existe ningún tipo de tratamiento, aún teniendo la infraestructura necesaria.

Se hace énfasis en la importancia de la clasificación de la basura, ya que con ella disminuye la contaminación, procesando los materiales reciclables y generando ingresos de su venta y de la elaboración de abono orgánico. Este último, obtenido mediante un proceso de compostaje con el material orgánico de la clasificación. Por fines prácticos y disminución de costos, el método más aplicable para el compostaje es el de pilas con volteo manual, con el que después de tres meses, aproximadamente, se tiene un producto de buena calidad que genera empleo y a la vez, disminuye el material que iría al relleno sanitario.

También se exponen los requerimientos mínimos necesarios para la disposición final en el relleno sanitario, como impermeabilización, drenajes, chimeneas y cobertura, que evitan que el material contamine el manto freático o fuentes de agua, los males olores e incendios y la propagación de enfermedades y contaminación visual, entre otros.

Con una clasificación del 25 % de los desechos sólidos se determinó que la vida útil del relleno sanitario es de 0.53 años. Aumentado la capacidad de separación, ya sea con la implementación de una nueva línea o en el lugar donde se originan los desechos sólidos, se alarga la vida útil del relleno sanitario.

Con un estudio económico se encontraron los costos de operación y mantenimiento de la planta clasificadora y del relleno sanitario para evaluar el monto de su inversión. Aunque la inversión sea elevada, los beneficios que se obtienen de un tratamiento de residuos sólidos son importantes para que en el futuro el manejo de éstos no sea más complicado. Además se determinó que con la venta de materiales reciclables, el proyecto es auto sostenible.

ABSTRACT

In this work, the guidelines for urban solid waste treatment of Quetzaltenango were established due to the lack of any type of treatment, even though the necessary infrastructure is available.

Emphasis is made on the importance of solid waste classification because, with it, contamination decreases; processing the recyclable materials can generate profits from its sales and is possible the elaboration of organic fertilizer. This fertilizer is obtained from a composting process from the organic material obtained from the classification. In practice and because of cost reductions, the most practical method for composting is the periodical manual flip or mix, and after three months a good quality product is obtained, generating employment and reducing the amount of material taken to the sanitary landfill.

The minimum requirements for the final disposition of the sanitary landfill are exposed, as well as water proofing, chimneys and coverage, that prevent the material from contaminating the freatic mantle, bad odors, fires, the propagation of diseases and visual contamination among others.

Classifying 25% of the municipal solid waste, it was estimated that the sanitary landfill would be filled in 0.53 years. Increasing the capacity of classification by the establishment of a new classification line or in the origin, the life of the sanitary landfill can be prolonged.

With an economic study, the operation and maintenance costs of the classifying plant were established to evaluate the amount of the investment. Even though the investment is high, the benefits obtained from the use of solid wastes are important for preventing this operation from getting more complex in the future. In addition, with the sale of the recyclable materials, the project is self-sustained.

ÍNDICE

	Página
Lista de cuadros.....	ix
Lista de ilustraciones.....	xi
Resumen.....	v
Abstract.....	vi
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. ANTECEDENTES.....	2
A. Definición de los residuos sólidos.....	2
B. Clasificación de los residuos.....	2
C. Tipos de residuos sólidos.....	3
D. Composición de los residuos sólidos.....	4
E. Propiedades de los residuos sólidos urbanos (RSU).....	4
F. Elementos funcionales de un sistema de gestión de residuos sólidos.....	6
G. Jerarquía de la gestión integral de residuos sólidos.....	8
H. Tratamiento y recuperación de recursos.....	10
I. Reciclaje de materiales encontrados en los RSU.....	16
J. Evacuación final.....	16
K. Riesgo asociado al manejo de residuos sólidos.....	22
III. JUSTIFICACIÓN.....	23
IV. OBJETIVOS.....	24
A. General.....	24
B. Específicos.....	24
V. PROBLEMA A RESOLVER.....	25
VI. METODOLOGÍA.....	26
VII. RESULTADOS.....	27
A. Planta de clasificación.....	27
B. Relleno sanitario.....	31
C. Compostaje.....	39
D. Análisis económico.....	41

VIII. DISCUSIÓN.....	50
A. Planta clasificadora.....	50
B. Relleno sanitario.....	51
C. Compostaje.....	52
D. Análisis económico.....	52
IX. CONCLUSIONES.....	54
X. RECOMENDACIONES.....	55
XI. BIBLIOGRAFÍA.....	56
XII. ANEXOS.....	57
A. Plano del terreno para disposición final.....	57
B. Mapa de la ciudad de Quetzaltenango.....	58
C. Cálculo de muestra para dimensiones de celdas.....	59
D. Vida útil del relleno sanitario con diferentes capacidades en planta clasificadora.....	64
E. Gráfica de vida útil vrs. capacidad de separación en la planta clasificadora.....	65
F. Costos de material de construcción del relleno sanitario.....	66
G. Depreciaciones.....	67

LISTA DE CUADROS

Cuadro		Página
1.	Fuentes de residuos sólidos en la comunidad	3
2.	Composición general de los residuos urbanos en los países en desarrollo	4
3.	Técnicas empleadas para el tratamiento de los residuos sólidos.....	11
4.	Procesos biológicos para la obtención de productos de conversión a partir de residuos sólidos	12
5.	VARIABLES a considerar en el diseño del proceso de compostaje aerobio.....	13
6.	VARIABLES a considerar en el diseño de un proceso de digestión anaerobia.....	14
7.	Procesos térmicos para la obtención de productos de conversión a partir de residuos sólidos...	15
8.	Factores a considerar en la selección preliminar de la localización de un vertedero	17
9.	Evaluación del impacto ambiental para un vertedero a cielo abierto o un basurero clandestino.	19
10.	Constituyentes encontrados en el gas de vertedero de RSU	20
11.	Factores importantes en el diseño de vertedero de residuos sólidos	21
12.	Costos para materiales de construcción del relleno sanitario.....	41
13.	Inmuebles para planta clasificadora.....	41
14.	Infraestructura para área de compostaje	42
15.	Inversión inicial de infraestructura	42
16.	Prestaciones consideradas.....	43
17.	Personal para planta clasificadora.....	43
18.	Personal para relleno sanitario.....	43
19.	Personal para compostaje	44
20.	Personal para área administrativa	44
21.	Costo total de personal	44
22.	Costo de operación para planta clasificadora.....	45
23.	Costo de operación para relleno sanitario	45
24.	Costo de operación para compostaje	45
25.	Costo de operación total	46
26.	Estimación del material reciclable para la venta.....	46
27.	Equipo de seguridad	46
28.	Costo de tratamiento de desechos sólidos.....	47
29.	Diferencia neta.....	47

30.	Flujo de caja desde año cero a año tres.....	48
31.	Flujo de caja desde año cuatro a año siete.....	48
32.	Flujo de caja desde año ocho a año diez.....	48
33.	Valores de TIR y VAN.....	49
34.	Tiempo de recuperación de la inversión.....	49
35.	Peso específico de residuos urbanos.....	59
36.	Diferentes porcentajes de capacidad de clasificación.....	64
37.	Masa de residuos sólidos urbanos (R.S.U.) para diferentes capacidades de clasificación.....	64
38.	Características de la celda, según capacidad de clasificación.....	64
39.	Vida útil del relleno sanitario según capacidad de clasificación.....	64
40.	Costos de grava.....	66
41.	Costo de malla galvanizada.....	66
42.	Costo de geotextil.....	66
43.	Costo de geomembrana.....	66
44.	Costo de madera de pino.....	66
45.	Tasa de depreciaciones según método de SMARC.....	67
46.	Depreciación desde año un hasta año cuatro.....	67
47.	Depreciación desde año cinco hasta año ocho.....	67

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración	Página
1. Esquema de una instalación general de recuperación de materiales utilizada para separar residuos mezclados	9
2. Vista del vertedero terminado.....	18
3. Sección transversal del vertedero.....	19
4. Secuencia actual del proceso de manejo de residuos sólidos urbanos.....	27
5. Secuencia establecida de manejo de residuos sólidos urbanos.....	28
6. Banda transportadora.....	29
7. Secuencia de clasificación y balance de masa.....	29
8. Diagrama de bloques del proceso en planta clasificadora.....	30
9. Vía de acceso periférico.....	31
10. Terreno destinado para el relleno sanitario.....	31
11. Sistema de multicapas para impermeabilizante.....	33
12. Zanjas para drenaje del lixiviado.....	33
13. Vista transversal de un sistema de drenaje interno.....	34
14. Vista transversal de un respiradero.....	34
15. Chimenea.....	35
16. Construcción de chimeneas.....	35
17. Corte transversal de chimenea terminada.....	36
18. Sistema de multicapas para cobertura final.....	37
19. Pendiente de cobertura.....	37
20. Descarga de desechos sólidos.....	38
21. Avance de la construcción del relleno.....	38
22. Diagrama de bloques del proceso de compostaje.....	39
23. Diagrama de proceso del compostaje.....	40

I. INTRODUCCIÓN

Los desechos sólidos, sin importar su tamaño ni composición, son materiales considerados sin utilidad y por ello se busca deshacerse de ellos. Existen varias formas para eliminar la basura, como quemarla, enterrarla o dejarla al aire libre, pero ninguno de estos métodos es adecuado. La basura se debe clasificar y a cada material, buscarle un tratamiento para su reutilización y en caso de no encontrarse, disponerla de manera adecuada en un relleno sanitario.

Entre los beneficios que se obtienen de un buen tratamiento de residuos sólidos se pueden mencionar: minimización de residuos, reutilización de algunos materiales, conservación del medio ambiente y generación de recursos.

En la actualidad, la ciudad de Quetzaltenango genera aproximadamente 150,000 kilogramos de residuos sólidos urbanos por día, los cuales son llevados a un vertedero a cielo abierto sin tratamiento alguno. Es por ello que en este trabajo, se estableció un sistema de tratamiento de los residuos sólidos urbanos, clasificándolos para su posterior reutilización y a la vez, mejorar la disposición final de los residuos no utilizables, convirtiendo el basurero a cielo abierto, en un vertedero controlado.

II. ANTECEDENTES

A. Definición de los residuos sólidos

Se entiende por residuos sólidos todo aquel residuo derivado de la actividad humana y animal, normalmente en estado sólido, que se desecha debido a que carece de uso o de valor. (Perry 2001:25-104)

B. Clasificación de los residuos

El residuo se puede clasificar de varias formas: por estado, origen, característica y por el tipo de manejo.

1. **Por estado:** Un residuo se define por estado según el estado físico en que se encuentre.

Existe por lo tanto tres tipos de residuos: sólidos, líquidos o gaseosos. (Galdámez 2000)

2. **Por origen:** Se puede definir el residuo por la actividad que lo origine.

- Doméstico
- Comercial
- Institucional
- Construcción y demolición
- Servicios municipales
- Zonas de plantas de tratamiento
- Industrial
- Agrícola.

Las instalaciones, actividades y localizaciones típicas para la generación de residuos asociadas a cada uno de estos orígenes son expuestas en el cuadro No. 1 (ver pág. No. 3), donde los residuos sólidos urbanos (RSU) normalmente se supone que incluyen todos los residuos de la comunidad con la excepción de los residuos de procesos industriales y de los procesos agrícolas (Tchobanoglous 1994:46).

3. **Por tipo de manejo:** Se puede clasificar un residuo por presentar alguna característica asociada a manejo que debe ser realizado

a. **Residuo peligroso:** Son residuos que por su naturaleza son inherentemente peligrosos de manejar y/o disponer y pueden causar muerte, enfermedad; que son peligrosos para la salud o el medio ambiente cuando son anejados en forma inapropiada.

b. **Residuo inerte:** Residuo estable en el tiempo, el cual no producirá efectos ambientales apreciables al interactuar en el medio ambiente. (Galdamez 2000)

C. Tipos de residuos sólidos

En el cuadro No. 1 se pueden definir los diferentes tipos de residuos sólidos dependiendo a su clasificación (Tchobanoglous 1994:46).

Cuadro No. 1. Fuentes de residuos sólidos en la comunidad

Fuente	Instalaciones, actividades o localizaciones donde se generan	Tipos de residuos sólidos
Doméstica	Viviendas aisladas y bloques de baja, mediana y elevada altura, etc., unifamiliares y multifamiliares.	Residuos de comida, papel, cartón, plásticos, textiles, cuero, residuos de jardín, madera, vidrio, latas de hojalata, aluminio, otros metales, cenizas, hojas en la calle, residuos especiales (artículos voluminosos, electrodomésticos, bienes de línea blanda, residuos de jardín recogidos separadamente, batería, pilas, aceite, neumáticos), residuos domésticos peligrosos.
Comercial	Tiendas, restaurantes, mercados, edificios de oficinas, hoteles, moteles, imprentas, gasolineras, talleres mecánicos, etc.	Papel, cartón, plásticos, madera, residuos de comida, vidrio, metales, residuos especiales (ver párrafo superior), residuos peligrosos, etc.
Institucional	Escuelas, hospitales, cárceles, centros gubernamentales.	(como en comercial)
Construcción y demolición	Lugares nuevos de construcción, lugares de reparación/renovación de carreteras, derribos de edificios, pavimentos rotos.	Madera, acero, hormigón, suciedad, etc.
Servicios municipales (excluyendo plantas de tratamiento)	Limpieza de calles, paisajismo, limpieza de cuencas, parques y playas, otras zonas de recreo.	Residuos especiales, basura, barraduras de la calle, recortes de árboles y plantas, residuos de cuencas, residuos generales de parques, playas y zonas de recreo.
Plantas de tratamiento, incineradoras municipales	Agua, aguas residuales y procesos de tratamiento industrial, etc.	Residuos de plantas de tratamiento, compuestos principalmente de fangos.
Residuos sólidos urbanos	Todos los citados	Todos los citados
Industrial	Construcción, fabricación ligera y pesada, refinerías, plantas química, centrales térmicas, demolición, etc.	Residuos de procesos industriales, materiales de chatarra, etc. residuos no industriales incluyendo residuos de comida, basura, cenizas, residuos de demolición y construcción, residuos especiales, residuos peligrosos.
Agrícolas	Cosechas de campo, árboles frutales, viñedos, ganadería intensiva, granjeas etc.	Residuos de comida, residuos agrícolas, basura, residuos peligrosos.

(Fuente: Tchobanoglous, G., H. Theisen y S. Vigil. 1994. *Gestión integral de residuos sólidos*. México D.F., McGraw-Hill. 2 vols. Página 1-47)

D. Composición de los residuos sólidos

Composición es el término utilizado para describir los componentes individuales que constituyen el flujo de residuos sólidos y su distribución relativa, usualmente basada en porcentajes de masa, ver cuadro No. 2. (Tchobanoglous 1994:55)

Cuadro No. 2. Composición general de los residuos urbanos en los países en desarrollo

Materia	% en masa total
Metales	0.50 – 2.00
Vidrio	1.00 – 4.00
Papel y cartón	3.00 – 5.00
Plásticos	6.00 – 10.00
Aluminio	1.00-2.00
Material no reciclable	7.00-12.00
Residuos orgánicos	50.00 – 65.00

(Fuente: Seoáñez, Mariano, 1999. *Residuos*. Prologuista, Luis Ramos. Madrid, Mundi-prensa. Página 80)

E. Propiedades de los residuos sólidos urbanos (RSU)

1. Propiedades físicas

a. **Peso específico:** Es el peso de un material por unidad de volumen. Como el peso específico de los residuos sólidos urbanos frecuentemente se refiere a residuos sueltos, encontrados en los contenedores, no compactados. (Tchobanoglous 1994:82)

b. **Contenido de humedad:** El contenido de humedad de los residuos sólidos normalmente se expresa de dos formas. El método de medición peso húmedo, la humedad de una muestra se expresa como un porcentaje del peso del material húmedo; en el método peso seco, se expresa como un porcentaje del peso seco del material. El método peso húmedo se usa más frecuentemente en el campo de la gestión de residuos sólidos. Se expresa de la siguiente forma:

$$M = (w - d)100/w$$

donde:

M = contenido de humedad, porcentaje

w = peso inicial de la muestra según se entrega (Kg)

d = peso de la muestra después de secarse a 105 °C (Kg)

(Tchobanoglous 1994:84)

2. **Propiedades químicas:** La información sobre la composición química de los componentes que forman los residuos sólidos urbanos es importante para evaluar las opciones de procesamiento y recuperación. Si los residuos sólidos van a utilizarse como combustible, es preciso conocer:

a. **Análisis físico:** Incluye las siguientes pruebas:

- Humedad (pérdida de masa a 105 °C durante una hora)
 - Materia volátil combustible (pérdida adicional de masa tras combustión a 950 °C)
 - Cenizas (residuo tras combustión)
 - Carbón fijo (residual)
- (Tchobanoglous 1994:87)

b. **Punto de fusión de las cenizas:** Se define como la temperatura en la que la ceniza resultante de la incineración de los residuos se transforma en sólido, o escoria, por la fusión y la aglomeración. Las temperaturas típicas de fusión para la formación de escorias de residuos sólidos oscilan entre 1100 °C y 1200 °C. (Tchobanoglous 1994:92)

c. **Análisis elemental:** Implica la determinación del porcentaje de: carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), azufre (S) y Cenizas.

d. **Contenido energético:** El contenido energético de los componentes orgánicos en los RSU se puede determinar:

- Utilizando una caldera a escala real como calorímetro
- Utilizando una bomba calorimétrica de laboratorio
- Por cálculo, si se conoce la composición elemental. (Tchobanoglous 1994:92)

3. **Propiedades biológicas:** Excluyendo el plástico, la goma y el cuero, la fracción orgánica de la mayoría de los RSU se puede clasificar de la siguiente forma:

- Constituyentes solubles en agua, tales como azúcares, féculas, aminoácidos y diversos ácidos orgánicos
- Hemicelulosa, un producto de condensación de azúcares con cinco y seis carbonos
- Celulosa, un producto de condensación de glucosa de azúcar con seis carbonos
- Grasas, aceites y ceras, que son ésteres de alcoholes y ácidos grasos de cadena larga

- Lignina, un material polímero que contiene anillos aromáticos con grupos metoxi ($-\text{OCH}_3$), presente en algunos productos de papel como periódicos
- Lignocelulosa, una combinación de lignina y celulosa
- Proteínas, que están formadas por cadenas de aminoácidos.

Quizás la característica biológica más importante de la fracción orgánica de los RSU es que casi todos los componentes orgánicos pueden ser convertidos biológicamente en gases y sólidos orgánicos e inorgánicos relativamente inertes. La producción de olores y la generación de moscas están relacionadas también con la naturaleza putrefactible de los materiales orgánicos encontrados en los RSU. (Tchobanoglous 1994:100)

F. Elementos funcionales de un sistema de gestión de residuos sólidos

Las actividades asociadas a la gestión de residuos sólidos desde el punto de generación hasta la evacuación final, han sido agrupados en seis elementos funcionales:

1. **Generación de residuos:** Abarca las actividades en las que los materiales son identificados como sin ningún valor adicional, o bien son tirados o recogidos juntos para la evacuación. (Tchobanoglous 1994:11)
2. **Manipulación y separación de residuos, almacenamiento y procesamiento en origen**
 - a. **Manipulación en la fuente:** Hace referencia a todas aquellas actividades asociadas con la manipulación de los residuos hasta que se depositan en los contenedores destinados al almacenamiento de residuos, previamente a su recolección. (Tchobanoglous 1994:11)
 - b. **La separación de los componentes de los residuos:** Es un paso importante en la manipulación y el almacenamiento de los residuos sólidos en el origen.
 - c. **El almacenamiento en la fuente:** Algunos de los factores a considerar a la hora de proceder al almacenamiento de residuos sólidos en la fuente son:
 - Tipo de contenedor
 - Localización del contenedor
 - Consideraciones estética y de salud pública
 - Método de recolección que se va a emplear
 - Modo futuro de transporte

- d. **Procesado en la fuente de residuos sólidos:** En el origen incluye actividades como la compactación y el compostaje de residuos de jardinería.

3. **Recolección de residuos sólidos:** Incluye no solamente la recolección de residuos sólidos y de materiales reciclables, sino también el transporte de estos materiales, después de la recolección, al lugar donde se vacía el vehículo de recolección. Este lugar puede ser una instalación de procesamiento de materiales, una estación de transferencia o un vertedero. (Tchobanoglous 1994:13)

4. **Separación, procesamiento y transformación de residuos sólidos:** La recuperación de materiales separados, la separación y el procesamiento de los componentes de los residuos sólidos, y la transformación del residuo sólido, que se produce principalmente en localizaciones fuera de la fuente de generación de residuos, están englobados en este elemento funcional. Los tipos de medios e instalaciones utilizados en la actualidad para la recuperación de materiales residuales que han sido separados en el origen incluye la recolección en la acera, los centros de recolección selectiva y los centros de recompra. La separación y el procesamiento de residuos que han sido separados en el origen y la separación de residuos no seleccionados normalmente tiene lugar en las instalaciones de recuperación de materiales, estaciones de transferencia, instalaciones de incineración y lugares de evacuación. El procesamiento frecuentemente incluye:

- Separación de objetos voluminosos
- Separación de componentes de los residuos
- Reducción de tamaño mediante trituración
- Separación de metales férreos, utilizando imanes
- Reducción del volumen por compactación
- Incineración.

Los procesos de transformación se emplean para reducir el volumen y el peso de los residuos que han de evacuarse, y para recuperar productos de conversión y energía. La fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos puede ser transformada mediante una gran variedad de procesos químicos y biológicos. (Tchobanoglous 1994:14)

5. **Transferencia y transporte:** Éste comprende dos pasos:

- La transferencia de residuos desde un vehículo de recolección pequeño hasta un equipo de transporte más grande.
- El transporte subsiguiente de los residuos, normalmente a través de grandes distancias, a un lugar de procesamiento o evacuación. (Tchobanoglous 1994:15)

6. **Evacuación final:** La evacuación de los residuos sólidos mediante los vertederos controlados o la extensión en superficie es el destino último de todos los residuos, bien sean residuos urbanos recogidos y transportados directamente a un lugar de vertido, o materiales residuales de instalaciones de recuperación de materiales (IRM), o rechazos de la combustión de residuos sólidos, o compost, u otras sustancias de diferentes instalaciones de procesamiento de residuos sólidos. (Tchobanoglous 1994:16)

G. Jerarquía de la gestión integral de residuos sólidos

La gestión integral de residuos sólidos (GIRS) puede ser definida como la selección y aplicación de técnicas, tecnologías y programas de gestión idóneos para lograr metas y objetivos específicos de gestión de residuos. Puede utilizarse una jerarquía (organización por orden de rango) en la gestión de residuos para clasificar las acciones en la implantación de programas dentro de la comunidad. La jerarquía de GIRS adoptada por la agencia de protección ambiental en USA (EPA) está formada por los siguientes elementos:

1. **Reducción en origen:** Implica reducir la cantidad y/o toxicidad de los residuos que son generados en la actualidad. La reducción en origen está en primer lugar en la jerarquía porque es la forma más eficaz de reducir la cantidad de residuo, el costo asociado a su manipulación y los impactos ambientales. La reducción de residuos puede realizarse en la vivienda y en la instalación comercial o industrial, a través de formas de compra selectivas y de la reutilización de productos y materiales. (Tchobanoglous 1994:17)

2. **Reciclaje:** Éste implica

- La separación y recolección de materiales residuales
- Preparación de estos materiales para la reutilización, el procesamiento y transformación en nuevos productos
- La reutilización, reprocesamiento, y nueva fabricación de productos.

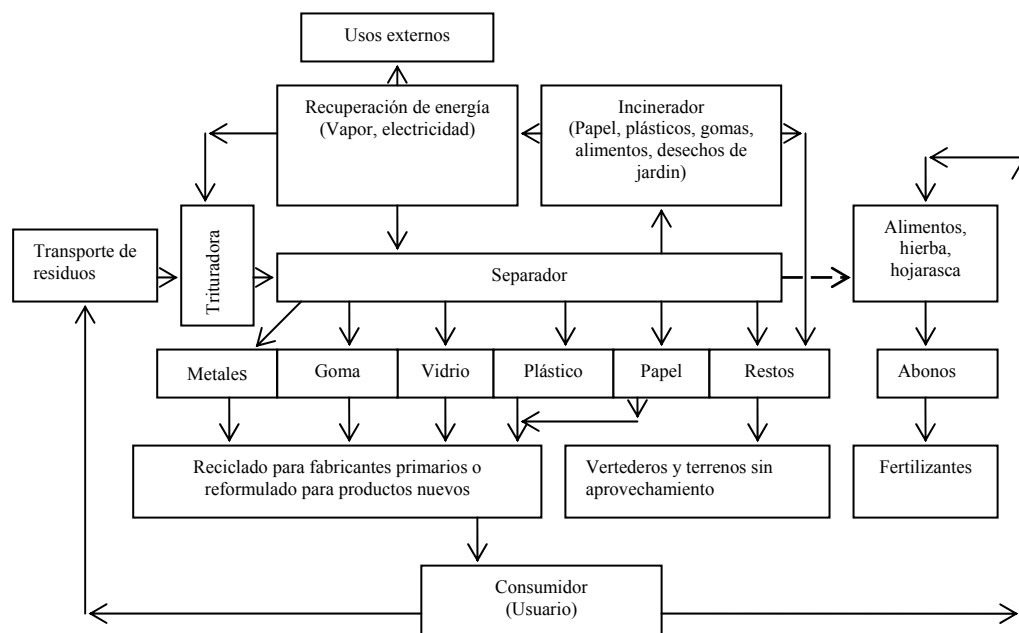
El reciclaje es un factor importante para ayudar a reducir la demanda de recursos y la cantidad de residuos que requieran la evacuación mediante el vertido. Existen plantas de clasificación para este procedimiento, (ver ilustración No. 1, pág. No.9). (Tchobanoglous 1994:17)

Hay dos tipos de reciclado de materiales tales como vidrio, metales, papel y plásticos: primario y secundario:

- a. **Primario:** También llamado reciclaje en ciclo cerrado, los desechos eliminados por los consumidores se reciclan para producir nuevos productos del mismo tipo. (Tyler 2002:379)

- b. **Secundario:** O reciclado en ciclo abierto, los materiales de desecho se transforman en productos diferentes. (Tyler 2002:379)

Ilustración No.1. Esquema de una instalación general de recuperación de materiales utilizada para separar residuos mezclados.



(Fuente: Tyler Miller, George. 2002. *Ciencia ambiental*. Preservemos la Tierra. 5ª edición. México D.F., Thompson. Página 381)

3. **Transformación de residuos:** Éste implica la alteración física, química o biológica de los residuos. Generalmente, las transformaciones físicas, químicas y biológicas que pueden ser aplicadas a los RSU son utilizadas para:

- Mejorar la eficacia de las operaciones y sistemas de gestión de residuos,
- Recuperar materiales reutilizables y reciclables,
- Recuperar productos de conversión, como el compost, y energía en forma de calor, y biogás combustible.

La transformación de materiales de los residuos normalmente da lugar a una mayor duración de la capacidad de los vertederos. (Tchobanoglous 1994:18)

4. **Vertido:** Por último, hay que hacer algo con:

- Los residuos sólidos que no pueden ser reciclados, no tienen uso adicional
- La materia residual que queda después de la separación de residuos sólidos en una instalación de recuperación de materiales, y
- La materia residual restante después de la recuperación de productos de conversión o energía.

Solo hay dos alternativas para la manipulación a largo plazo de residuos sólidos y materia residual:

- Evacuación encima o dentro del manto de la tierra y
- Evacuación en el fondo del océano.

(Tchobanoglous 1994:18)

H. Tratamiento y recuperación de recursos

Existen técnicas y métodos empleados para recuperar materiales y así, obtener productos de conversión y energía de los residuos sólidos. Los aspectos que se contemplan son:

- Las técnicas de procesado o tratamiento de residuos sólidos
- Los procesos térmicos
- Obtención de productos vía transformación biológica
- La recuperación de energía a partir de los residuos.

1. **Técnicas de tratamiento de residuos sólidos:** Las técnicas de procesado o tratamiento de residuos sólidos cumplen varios objetivos dentro de un sistema de gestión residuos:

- Mejora de la eficiencia de los sistemas
- Recuperación de recursos (materiales útiles)
- Acondicionamiento de los materiales para su transformación posterior vía biológica y química

Las técnicas de tratamiento de RSU se pueden ver en el cuadro No. 3 (pág. No.11). (Perry 2001:25-118)

a. **Separación manual de componentes:** Es el término utilizado para describir el proceso de separación por medios manuales, de los componentes identificables de los RSU no seleccionados. La separación de componentes se utiliza para transformar los residuos heterogéneos en un número de componentes más o menos homogéneos. La separación en la fuente es el lugar más adecuado para la separación, pues hace posible la recuperación y la utilización de materiales de forma más efectiva. (Perry 2001:254-118)

b. **Reducción mecánica del volumen:** También conocida como densificación, es el término utilizado para describir el proceso mediante el cual se reduce el volumen inicial ocupado por un residuo, normalmente mediante la aplicación de una fuerza o presión. (Perry 2001:254-118)

- c. **Reducción química del volumen:** La incineración es el tratamiento que se aplica generalmente para este proceso. Uno de los atractivos de la incineración es que puede reducir el volumen inicial de los residuos entre un 80 a 90 %. (Perry 2001:25-118)
- d. **Alteración mecánica del tamaño:** El objetivo de la reducción del tamaño es obtener un producto final que sea razonablemente uniforme y de dimensiones considerablemente inferiores a las del producto original. Es importante recordar que una reducción del tamaño no implica necesariamente una reducción del volumen. En algunas ocasiones, el volumen total del material después de la reducción de tamaño puede ser superior al volumen original. La trituración es el procedimiento habitual para la reducción del tamaño. (Perry 2001:25-119)
- e. **Separación mecánica del componente:** La separación de componentes es una operación necesaria cuando se quiere proceder a la recuperación de materiales presentes en los residuos. En algunos casos es también una operación necesaria como paso previo a la recuperación energético o a la obtención de productos a partir de los residuos. (Perry 2001:25-119)
- f. **Separación magnética y electromagnética:** Permite separar las partículas, magnéticas en disolución o mezcladas con otros tipos de partículas sometiendo todas a un campo magnético, que las separará al atraer la fase magnética. (Seoánez 2000)
- g. **Secado y deshidratación:** En algunos sistemas destinados a la recuperación energética de los residuos sólidos, la fracción ligera triturada es presecada para disminuir su peso. El secado es una operación que mejora las características de los residuos de cara a tratamientos posteriores. En el caso de la incineración, la combustión es más homogénea y la calidad de las cenizas es más alta. (Perry 2001:25-119)

Cuadro No. 3. Técnicas empleadas para el tratamiento de los residuos sólidos

Técnica de tratamiento	Función
Separación manual de componentes	Separación de materiales reciclables, normalmente en el punto de generación
Almacenamiento y transferencia	Almacenamiento y transferencia de residuos que van a ser tratados
Reducción mecánica de volumen	Reducción del volumen de los residuos sólidos; alteración de la forma de dichos residuos; todos los equipos de recolección modernos están equipados con sistema de compactación interna
Reducción química de volumen	Reducción del volumen de los residuos mediante combustión (incineración)
Alteración mecánica de la forma y el tamaño	Alteración de la forma y el tamaño de los componentes de los residuos sólidos
Separación mecánica de componentes	Separación de materiales reciclables normalmente en la instalación de tratamiento
Separación magnética y electromagnética	Separación de metales férricos y no férricos en la instalación de tratamiento
Secado y deshidratación	Eliminación de humedad de los residuos.

(Fuente: Perry, Robert y D. Green. 2001. *Manual del Ingeniero Químico*. 7ª edición. Prologuista, Storch, José. Madrid, McGraw-Hill. 4 vols, página 25-119)

2. **Obtención de productos vía transformación biológica:** Los productos obtenidos a partir de la transformación biológica de los residuos sólidos son el compost, el metano, proteínas, alcoholes y una gran variedad de compuestos orgánicos intermedios. Los principales procesos a través de los cuales se obtienen estos productos se presentan en el cuadro No. 4. El compostaje y la digestión anaerobia se describen con mayor detalle, ya que son los procesos empleados con mayor frecuencia. (Perry 2001:25-120)

Cuadro No. 4. Procesos biológicos para la obtención de productos de conversión a partir de residuos sólidos

Proceso	Producto a conversión	Pretratamiento	Comentarios
Compostaje	Compost	Trituración, separación con aire	Inconveniente: falta de mercado; su aplicación a gran escala esta técnicamente comprobada
Digestión anaerobia	Gas metano	Trituración, separación con aire	Tecnología a nivel laboratorio, exclusivamente
Conversión biológica a proteínas	Proteínas y alcohol	Trituración, separación con aire	Tecnología a escala piloto, exclusivamente
Fermentación biológica	Glucosa y furfural	Trituración, separación con aire	Usado conjuntamente con el proceso hidrolítico

(Fuente: Perry, Robert y D. Green. 2001. *Manual del Ingeniero Químico*. 7ª edición. Prologuista, Storch, José. Madrid, McGraw-Hill. 4 vols. Página 25-120)

a. **Compostaje:** Consiste en la transformación de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos mediante una fermentación, en la que se obtiene un producto de características intermedias entre un fertilizante orgánico (abono pobre) y una enmienda o regenerador de suelos. (Seoánez 2000)

Si la fracción orgánica de los residuos sólidos, excluyendo los plásticos, gomas y cuero, se somete a descomposición bacteriana, se obtiene un producto derivado de la asimilación y desasimilación bacteriana al que se denomina compost o humus. El proceso global que conlleva tanto la separación de dicha fracción como su transformación vía bacteriana se denomina compostaje. La descomposición de la fracción orgánica de los residuos sólidos puede llevarse a cabo vía aerobia o anaerobia, dependiendo la disponibilidad de oxígeno.

El compostaje incluye tres etapas básicas:

- Preparación de los residuos sólidos;
- descomposición de los residuos,
- acondicionamiento del producto para su venta.

La recepción, clasificación, separación, reducción de tamaño y la adición, si es necesaria, de agua y nutrientes forman parte para la etapa de preparación. Se han desarrollado varias técnicas para la etapa de descomposición. Una vez que los residuos se han convertido en humus, están listos para la

tercera etapa, el acondicionamiento para la venta. Esta etapa puede incluir moliendas, mezclado con aditivos, granulado, embolsado, almacenamiento, transporte y, en algunos casos, venta directa. Algunas variables a considerar en el diseño de compostaje se pueden observar en el cuadro No. 5. (Perry 2001:25-120)

Cuadro No. 5. Variables a considerar en el diseño del proceso de compostaje aerobio.

Variable	Comentario
Tamaño de partícula	El tamaño de los residuos sólidos deberá estar entre 25 – 75 mm.
Inoculación y mezclado	El tiempo de compostaje se verá reducido si los residuos se mezclan con residuos sólidos parcialmente descompuestos (1% – 5 % en peso).
Mezclado y volteado	Para prevenir el secado, la formación de costras y de canales de aire, el material que se está compostando deberá ser volteado con cierta frecuencia.
Requerimientos de aire	El material sometido a compostaje, deberá estar en contacto con aire que presente al menos 50 % de la concentración normal de oxígeno
Contenido en humedad	Deberá estar entre 50 % – 60 %, con un valor óptimo de 55 %
Temperatura	Deberá mantenerse entre 49 °C – 54 °C durante los primeros días, entre 54 °C – 60 °C durante el periodo activo de compostaje. Si la temperatura aumenta por encima de los 66 °C, la actividad biológica disminuirá significativamente.
Relación carbono/nitrógeno (C/N)	La relación inicial C/N (en masa) óptima se sitúa entre 35 – 50 para el compostaje aerobio. Si la relación es inferior, se produce una pérdida de N en forma de amoníaco. Si los valores son considerablemente más bajos, la actividad biológica estará impedida. Si los valores de la relación son superiores a los señalados, el nitrógeno es el factor limitante (nutriente limitante)
PH	Para minimizar las pérdidas de N en forma de amoníaco, el pH no deberá superar a 8.5
Control de patógenos	Si el proceso de compostaje se desarrolla en condiciones idóneas, dadas las temperaturas que se alcanzan, es posible la muerte de los organismos patógenos, semillas y malas hierbas. Para ello, la temperatura se habrá de mantener entre 60 °C – 71 °C

(Fuente: Perry, Robert y D. Green. 2001. *Manual del Ingeniero Químico*. 7ª edición. Prologuista, Storch, José. Madrid, McGraw-Hill. 4 vols. Página 25-122)

b. **Digestión anaerobia:** La digestión o fermentación anaerobia es el proceso a través del cual se produce metano a partir de los residuos sólidos, algunas de las variables a considerar en el diseño de un proceso anaerobio, se ilustra en el cuadro No. 6 (pág. No. 14). Este proceso lleva implícita tres etapas:

1. La preparación de residuos para su fermentación anaerobia, generalmente incluye la recepción, clasificación, separación y reducción de tamaño
2. Se adiciona agua y nutrientes, se mezclan los residuos y se controla el pH, aproximadamente entre 6-7, se calienta la masa generada hasta una temperatura entre 54 °C y 60 °C, en un reactor de mezcla completa, durante un tiempo variable, puede ser de 1 a 2 semanas
3. La separación de los distintos gases producidos como consecuencia de la digestión.

Por último, se hace una gestión de los residuos después de la digestión. (Perry 2001:25-120)

Cuadro No. 6. Variables a considerar en el diseño de un proceso de digestión anaerobia

Variable	Comentario
Tamaño del material triturado	El tamaño de los residuos a diferir será tal que no interfiera en las operaciones de bombeo y mezclado
Equipo de mezclado	Se recomienda la agitación mecánica para evitar la formación de espumas
Porcentaje de residuos sólidos mezclados con lodos	Aunque el porcentaje puede variar entre 50 % y 90 %, incluso más, el 60 % es el porcentaje más adecuado
Temperatura	Entre 54 °C – 60 °C
Destrucción de compuestos volátiles presentes en los residuos sólidos	Varía entre un 60 % – 80 %, se puede emplear un 70 % para estimaciones
Sólidos totales destruidos	Varia entre un 40 % – 60 %, dependiendo del contenido inicial en inertes
Producción de gas	0.5 – 0.75 m ³ /Kg de sólidos volátiles destruidos, CH ₄ = 60 % y CO ₂ = 40 %

(Fuente: Perry, Robert y D. Green. 2001. *Manual del Ingeniero Químico*. 7ª edición. Prologuista, Storch, José. Madrid, McGraw-Hill. 4 vols. Página 25-123)

3. Procesos térmicos: Los productos de conversión derivados del tratamiento térmico de los residuos sólidos con calor, gases, variedad de aceites y compuestos orgánicos afines. Los procesos térmicos a los que pueden ser sometidos los residuos sólidos se pueden ver en el cuadro No. 7 (pág. No.15). (Perry 2001: 25-122)

a. **Combustión:** Se define como la reacción química del oxígeno con materias orgánicas para producir compuestos oxidados, acompañados por emisión de luz y una rápida generación de calor. Se utiliza el oxígeno en exceso para asegurar la combustión total.

La combustión de los residuos sólidos es una opción sumamente atractiva dentro de un sistema de gestión de residuos, ya que reduce en un 70 % – 90 % el volumen de los residuos. Dado que la disponibilidad de suelo destinado a vertedero es cada vez más limitada, el empleo de este sistema de tratamiento ha crecido vertiginosamente. (Perry 2001:25-123)

b. **Pirólisis:** Ya que la mayoría de las sustancias orgánicas son térmicamente inestables pueden romperse en fracciones gaseosas, líquidas y sólidas, mediante el calentamiento en una atmósfera libre de oxígeno. Pirólisis es el término utilizado para describir este proceso. En contraste con el proceso de combustión, que es altamente exotérmico, el proceso pirolítico es altamente endotérmico. Por esta razón a menudo se utiliza el término destilación destructiva como alternativo a pirólisis. (Perry 2001: 25-125)

Los rasgos característicos de las tres fracciones de componentes más importantes que resultan de la pirólisis en la porción orgánica de los RSU son:

1. El flujo de gas principalmente el hidrógeno (H₂), metano (CH₄), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), y diversos gases, según las características del material orgánico que se piroliza;
2. El flujo de alquitrán y/o aceite que es líquido a temperatura ambiente y contiene sustancias químicas tales como ácido acético, acetona, etanol;
3. La carbonilla, que está compuesta de carbono casi puro más cualquiera de los materiales inertes que han entrado en el proceso. (Tchobanoglous 1994:705)

c. **Gasificación:** El proceso de gasificación implica la combustión parcial de un combustible carbonoso para generar un gas combustible rico en monóxido de carbono, hidrógeno y algunos hidrocarburos saturados, principalmente metano. (Tchobanoglous 1994:708)

Cuando el gasificador se opera a presión atmosférica, con el aire como oxidante, los productos finales del proceso de gasificación son:

1. Un gas de bajo poder calorífico, contiene dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H₂), metano (CH₄) y nitrógeno (N₂)
2. Carbonilla, que contiene carbono y los inertes originarios del combustible, y
3. Líquidos condensables similares al aceite pirolítico. (Perry 2001:25-123)

La gasificación es una técnica energéticamente eficaz para reducir el volumen de los residuos sólidos y recuperar energía. (Tchobanoglous 1994:708)

Cuadro No. 7. Procesos térmicos para la obtención de productos de conversión a partir de residuos sólidos

Proceso	Producto a conversión	Pretratamiento	Comentarios
Incineración con recuperación de calor	Energía en forma de vapor	Ninguno	Se requiere un mercado para el vapor; tecnología comprobada en aplicaciones a gran escala; legislación sobre contaminación atmosférica puede limitar o prohibir su aplicación
Combustible en calderas (suplementario)	Energía en forma de vapor	Trituración, separación con aire, separación magnética	Modificación de las calderas existentes; legislación sobre contaminación atmosférica puede limitar o prohibir su aplicación
Gasificación	Energía en forma de gas de baja energía	Trituración, separación con aire, separación magnética	La gasificación se puede aplicar conjuntamente para el tratamiento de lodos industriales
Pirólisis	Energía en forma de gas o aceite	Trituración, separación con aire, separación magnética	Tecnología a escala piloto; aunque la contaminación atmosférica es menor, puede ser prohibida su aplicación por cuestiones legislativas
Hidrólisis	Glucosa y furfural	Trituración, separación con aire	Tecnología probada a escala piloto
Conversión química	Aceite, gas, acetato de celulosa	Trituración, separación con aire	Tecnología probada a escala piloto

(Fuente: Perry, Robert y D. Green. 2001. *Manual del Ingeniero Químico*. 7ª edición. Prologuista, Storch, José. Madrid, McGraw-Hill. 4 vols. , Página 25-122)

4. **Recuperación de energía a partir de residuos:** La fracción orgánica de los RSU puede ser convertida en productos utilizables, y últimamente, en energía por varios métodos, incluyendo;

1. La combustión para producir vapor y electricidad,
2. Pirólisis para producir un gas sintético, combustible líquido o sólido,
3. Gasificación para producir un combustible sintético
4. Biodigestión para generar metano

I. Reciclaje de materiales encontrados en los RSU

La meta de cualquier proceso de reciclaje es el uso o reuso de materiales provenientes de residuos. La importancia en el proceso de reciclaje es que el procedimiento comienza con una separación. Desde un punto de vista de eficiencia del rendimiento de estos sistemas de separación favorece que se haga una separación en el origen.

Existen tres actividades principales en el proceso del reciclaje:

1. **Recolección:** Se deben juntar cantidades considerables de materiales reciclables, separar elementos contaminantes o no reciclables y clasificar los materiales de acuerdo a su tipo específico.
2. **Manufactura:** los materiales clasificados se utilizan como nuevos productos o como materias primas para algún proceso.
3. **Consumo:** Los materiales de desperdicio deben ser consumidos. Los compradores deben demandar productos con el mayor porcentaje de materiales reciclados en ellos. Sin demanda, el proceso de reciclaje se detiene.

J. Evacuación final

La disposición sobre capas de tierra o en el interior de ella es hasta el momento el único método viable para la gestión a largo plazo de:

1. Los residuos sólidos recogidos y sin uso posterior,
2. Los rechazos de una planta de recuperación de materiales,
3. Los rechazos generados tras el compostaje de la materia orgánica y de las cenizas tras la incineración de residuos.

1. **Vertederos de residuos sólidos:** La evacuación de residuos sólidos en un vertedero consiste en la colocación de forma controlada de capas de residuos sobre un terreno. Los aspectos a considerar y controlar en un vertedero controlado son:

1. Selección del lugar
2. Métodos y operaciones de vertido
3. Generación de lixiviados
4. Generación de gases
5. Control de la dinámica de gases y lixiviados
6. Algunos problemas a consecuencia de cambios físicos y biológicos
7. Diseño del vertedero.

a. **Selección del lugar:** Se deben tener en cuenta algunos factores a considerar para la selección del lugar, ver cuadro No. 8. (Perry 2001: 25-130)

Cuadro No. 8. Factores a considerar en la selección preliminar de la localización de un vertedero

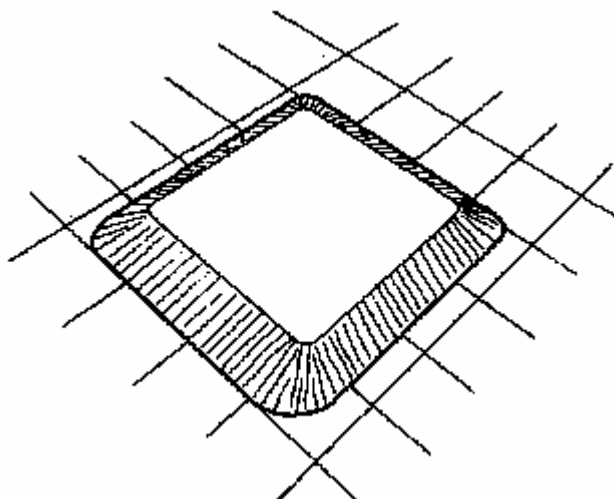
Factores	Consideraciones
Disponibilidad del terreno	Asegurarse que el terreno sea suficiente, como mínimo un año en el lugar definido, para reducir al máximo los costes.
Distancia de recolección	Aunque es deseable que ésta sea mínima, se deben contemplar otros factores, como: rutas de recolección, tipo de residuos a remolcar, modelos locales de circulación y vías características de las vías de circulación.
Condiciones del terreno y topografía	Ya que se requiere proporcionar material de cobertura, y la cobertura final de vertedero, deben obtenerse los datos necesarios sobre las cantidades y las características del suelo de la zona. La topografía local afectará al tipo de operación del relleno.
Condiciones climatológicas	En la evaluación del lugar de ubicación final del vertedero se deberán considerar las condiciones meteorológicas a las que se encuentra sometido el lugar. En invierno, si las temperaturas son bajas el material se dispondrá en pilas siempre que no sea posible la excavación. Se han de analizar los vientos y los patrones de viento de la zona. Se implantarán barreras antiviento para evitar el volado de papeles.
Hidrología del agua superficial	En base a ésta se establecerán los drenajes con las características adecuadas, así como el modo de desagüe adecuado. También deben identificarse otras condiciones que puedan conllevar la inundación del vertedero.
Condiciones hidrológicas y geológicas	Estas condiciones determinan la adecuación del lugar elegido en base a condicionantes ambientales. Se ha de disponer de datos suficientes sobre estos factores como para determinar la contaminación potencial del lugar escogido y aplicar las medidas necesarias de control de gases y lixiviados.
Condiciones locales ambientales	La proximidad de urbanizaciones o de áreas industriales es un factor a considerar. Deberán de tomarse las medidas adecuadas para que el impacto debido a olores, ruidos, vuelo de papeles, etc., sea mínimo.
Destino final del vertedero	El vertedero, una vez clausurado, se ha de insertar en el medio. Ya que este uso final afecta al diseño y planificación del vertedero, es un factor a considerar en las primeras fases de éste.

(Fuente: Perry, Robert y D. Green. 2001. *Manual del Ingeniero Químico*. 7ª edición. Prologuista, Storch, José. Madrid, McGraw-Hill. 4 vols. , Página 25-131)

b. Métodos y operaciones de vertido: Para conseguir el aprovechamiento máximo del espacio disponible se debe elaborar un plan operacional para el vertido. Los principales métodos utilizados son:

1) Método de áreas: Este método es adecuado cuando las características del terreno no permiten la excavación de surcos en los que colocar los residuos. La operación de evacuación comienza con la construcción de un dique de tierra frente al cual se van disponiendo los residuos en finas capas compactadas (ver ilustración No. 2). Cada capa se va compactando según se va rellenando, hasta que las capas alcanzan una altura entre 2 – 3 m. En ese momento y al final de cada día de operación, se coloca una capa de 15 – 30 cm. de material de cubierta. En un vertedero, se denomina celda a una elevación formada por los residuos compactados y el material de cubierta que ha alcanzado la cota deseada. Operando de esta forma se van generando sucesivas capas hasta que se alcanza la altura final. En este momento, se coloca una capa final de material de cubierta. (Perry 2001:25-131)

Ilustración No. 2. Vista del vertedero terminado



(Fuente: Perry, Robert y D. Green. 2001. *Manual del Ingeniero Químico*. 7ª edición. Prologuista, Storch, José. Madrid, McGraw-Hill. 4 vols. Página 25-131)

2) Método de depresiones o trinchera: En aquellas zonas en las que de forma natural o artificial existen depresiones en el terreno, es posible destinarlas al depósito de residuos sólidos, para ello se aprovechan cañones, barrancas, canteras, etc. las técnicas de depósito y compactación en este tipo de vertederos dependen de la geometría del lugar, de las características del material de cubierta, de la hidrología y geología de la zona y de la accesibilidad del lugar, ver ilustración No. 3 (pág. No.19) . (Perry 2001:25-131)

Ilustración No. 3. Sección transversal del vertedero.



(Fuente: Perry, Robert y D. Green. 2001. *Manual del Ingeniero Químico*. 7ª edición. Prologuista, Storch, José. Madrid, McGraw-Hill. 4 vols. Página 25-131)

3) Vertederos a cielo abierto: Las características generales de un vertedero a cielo abierto es que no existe planeamiento que anteceda a la utilización del donde arrojar las basuras, no existen obras de control ni el equipamiento es deficiente o nulo. En el cuadro No. 9, se puede observar el impacto ambiental que tiene un vertedero de éste tipo.

Cuadro No. 9. Evaluación del impacto ambiental para un vertedero a cielo abierto o un basurero clandestino.

Causa	Efecto
Producción de gases	Principalmente metano, dióxido de carbono y gases productores de olores ofensivos
Producción de humos y polvos	Producidos por incendios naturales o provocados
Presencia de sustancias biodegradables en el agua	Todas aquellas sustancias que incrementen la demanda bioquímica de oxígeno en los cuerpos de agua
Presencia de tóxicos en el agua	Sustancia que pueden producir intoxicación a seres vivos que viven o utilizan el agua superficial o subterránea
Recurso agua	Reducción o pérdida de acceso al recurso, pérdida de calidad y cantidad
Deterioro del patrimonio cultural o natural	Depreciación de sitios arqueológicos, históricos, paisajísticos ecológicos
Emanación de olores ofensivos	Cambios perceptibles en el aire por la presencia de sustancias volátiles
Vectores de enfermedades	Insectos, roedores transmisores de enfermedades
Paisaje	Cambios en la percepción espacial de la relación entre las construcciones, vegetación y tratamiento de superficies en el entorno
Usos del suelo	Modificación de los usos del suelo por la presencia de basureros clandestinos
Valor de la tierra	Depreciación del valor de los terrenos por la presencia de basureros
Arraigo	Alteración de las condiciones de comodidad y adaptabilidad al entorno por la presencia de basureros

(Fuente: *Perfil ambiental de Guatemala*. 2004. Universidad Rafael Landívar e Instituto de incidencia ambiental. Guatemala. 461 págs. Página. 222)

c. **Generación de lixiviado y contaminación de las aguas freáticas:** Cuando el agua se filtra por cualquier material, es posible que se disuelvan sustancias químicas y las arrastre, a este proceso se llama lixiviación. El líquido con diversos contaminantes disueltos se llama lixiviado. Cuando el agua se filtra por los desechos sólidos, ya sea por lluvia o por descomposición de residuos, se genera un lixivio nocivo con residuos de materia orgánica en descomposición junto con otros materiales como metales y sustancias químicas. La falta de medidas de precaución dirigen éstos lixiviados a los mantos freáticos, contaminándolos. (Nebel y Wright 1999:512)

d. **Producción de gases:** Aproximadamente, dos tercios de materia orgánica, están sujetos a la descomposición natural. En los rellenos sanitarios, por la falta de oxígeno, la descomposición se lleva a cabo en forma anerobia, cuyo principal subproducto es el biogás, compuesto por una mezcla de metano, hidrógeno, dióxido de carbono, entre otros (ver cuadro No. 10). Este gas es generado dentro del relleno, esto que puede causar explosiones si se acumula y prende. (Nebel y Wright 1999:512)

Cuadro No. 10. Constituyentes encontrados en el gas de vertedero de RSU

Componente	Porcentaje (base volumen seco)
Metano (CH ₄)	45 – 60
Dióxido de carbono (CO ₂)	40 – 60
Nitrógeno (N ₂)	2 – 5
Oxígeno (O ₂)	0.1 – 1.0
Sulfuros, disulfuros, etc.	0.0 – 1.0
Amoníaco (NH ₃)	0.1 – 1.0
Hidrógeno (H ₂)	0.0 – 0.2
Monóxido de carbono (CO)	0.0 – 0.2
Trazas	0.01 – 0.06
Características	Valor
Temperatura	37 – 67 °C
Densidad específica	1.02 – 1.06
Contenido de humedad	Saturado
Poder calorífico superior	3723 – 5117 KJ/m ³

(Fuente: Tchobanoglous, G., H. Theisen y S. Vigil. 1994. *Gestión integral de residuos sólidos*. México D.F., McGraw-Hill. 2 vols. Página 430)

e. **Control de la dinámica de gases y lixiviados:** Bajo condiciones ideales, los gases generados en un vertedero deberían eliminarse a la atmósfera, o bien, en vertederos de mayor capacidad, ser recuperados para la producción de energía. Para el caso de los lixiviados, se deberán controlarse y mantenerse en el interior del vertedero o ser recogidos para su posterior tratamiento.

f. **Problemas de los vertederos:** Debido a que están sujetos a cambios biológicos y físicos, descritos anteriormente, los vertederos pueden sufrir consecuencias que pueden causar problemas, tales como:

- Descomposición incompleta: algunos residuos se resisten a la descomposición natural. El término biodegradación se refiere a la descomposición total de los compuestos de carbono en dióxido de carbono y agua.
- Asentamientos: se dan asentamientos no uniformes provocados por las transformaciones descritas, porque crean depresiones que acumulan y retiene agua. (Nebel y Wright 1999:430)

g. **Diseño del vertedero:** Los factores principales a considerar en el diseño y funcionamiento de vertederos son:

1. Requerimientos del terreno
2. Tipo de residuos que van a ser depositados
3. Evaluación de la infiltración potencial
4. Sistemas para el drenaje y el control de infiltraciones
5. Desarrollo de un plan general de operación
6. Diseño de un plan de desarrollo del vertedero
7. Definición de los requerimientos de equipo.

Cuadro No. 11. Factores importantes en el diseño de vertedero de residuos sólidos

Factores	Consideraciones
Acceso	Carreteras pavimentadas, las carreteras de acceso al lugar de descarga podrán ser de tierra.
Diseño y construcción de celda	Variable, dependerá del terreno, el método de relleno y de si se va a recuperar gas.
Material de cobertura	Empleo del material disponible en el terreno, se requiere aproximadamente un m ³ por cada 4 – 6 m ³ de residuos sólidos; se controlan las infiltraciones por mezcla con material aislante.
Drenaje	Se instalan diques de drenaje para desviar el agua de la superficie, se mantiene una pendiente del 1 % – 2 % en el vertedero clausurado para evitar la inundación.
Requerimientos de equipo	Variable de acuerdo con las dimensiones del vertedero
Prevención de incendios	Disponibilidad de agua; si el agua no es potable, se señalará adecuadamente. La separación adecuada de celdas evita el incendio masivo
Protección de las aguas subterráneas	Protección del acuífero; si es necesario se dispondrán aislantes de los lixiviados, instalaciones para la circulación del gas y control de la calidad de las aguas del acuífero.
Disponibilidad del terreno	La superficie disponible será lo suficientemente amplia como para almacenar los residuos por un período mínimo de un año, siendo lo habitual periodos entre 5 y 10 años.
Método de relleno	La elección del método depende del terreno y del material de cobertura disponible.
Plan de operación	Con o sin tratamiento conjunto con lodos de depuradora y recuperación de gas
Descarga y compactación	Los residuos se descargan y compactan en capas de 0.6 m.
Area de descarga	De dimensiones reducidas, generalmente inferiores a 30 m.

(Fuente: Perry, Robert y D. Green. 2001. *Manual del Ingeniero Químico*. 7ª edición. Prologuista, Storch, José. Madrid, McGraw–Hill. 4 vols. Página 25-136)

K. Riesgo asociado al manejo de residuos sólidos

1. Gestión negativa

- Contaminación de aguas: La disposición no apropiada de residuos puede provocar la contaminación de los cursos superficiales y subterráneos de agua, además de contaminar la población que habita en estos medios.
- Contaminación atmosférica: El material evacuado, el ruido y el olor representan las principales causas de contaminación atmosférica
- Contaminación de suelos: Los suelos pueden ser alterados en su estructura debido a la acción de los líquidos percolados dejándolos inutilizados por largos periodos de tiempo
- Problemas paisajísticos y riesgo: La acumulación en lugares no aptos de residuos trae consigo un impacto paisajístico negativo, además de tener en algunos casos asociados un importante riesgo ambiental, pudiéndose producir accidentes, tales como explosiones o derrumbes.
- Salud mental: Existen numerosos estudios que confirman el deterioro anímico y mental de las personas directamente afectadas. (Galdamez 2000)

2. Gestión positiva

- Conservación de recursos: El manejo apropiado de las materias primas, la minimización de residuos, las políticas de reciclaje y el manejo apropiado de residuos traen como uno de sus beneficios principales la conservación y en algunos casos la recuperación de los recursos naturales.
- Reciclaje: Un beneficio directo de una buena gestión lo constituye la recuperación de recursos a través del reciclaje o reutilización de residuos que pueden ser convertidos en materia prima o ser utilizados nuevamente.
- Recuperación de áreas: Otros de los beneficios de disponer los residuos en forma apropiada un relleno sanitario es la opción de recuperar áreas de escaso valor y convertirlas en parques y áreas de esparcimiento, acompañado de una posibilidad real de obtención de beneficios energéticos.
(Galdamez 2000)

III. JUSTIFICACIÓN

La ciudad de Quetzaltenango es la segunda más importante de la República de Guatemala y es el centro de la región de occidente, ayudando así al desarrollo económico, social y cultural.

Debido al crecimiento que ha tenido la ciudad en forma desorganizada y la falta de educación en su población, se observa mucho desorden y contaminación. Se ve la gran cantidad de desechos sólidos dispersos en las calles, en terrenos baldíos o en basureros clandestinos. Es necesario abordar estos temas lo antes posible, haciendo proyecciones para que en el futuro no sea un mayor problema.

La municipalidad de Quetzaltenango posee una planta clasificadora de basura y un terreno destinado para un relleno sanitario, pero éstos no se utilizan. Actualmente los desechos sólidos urbanos recolectados, que son aproximadamente 150,000 kg/día (150 TM¹/día), se depositan al azar en un terreno ubicado en las faldas del volcán Santa María.

Por lo tanto, se necesita un proyecto que implemente un sistema de tratamiento de desechos sólidos urbanos recolectados y clasificados, para aprovechar los recursos que ya se poseen y así mismo, prevenir contaminación, enfermedades, incendios, facilitar el ambiente de trabajo de los recolectores y operarios del lugar, generar ingresos para la municipalidad por medio de la basura clasificada.

¹ TM = tonelada métrica

IV. OBJETIVOS

A. General

- Hacer un diseño para un sistema de tratamiento de desechos sólidos urbanos, con el fin de disminuir la contaminación ambiental y aprovechar la basura que se pueda reciclar, después de ser debidamente seleccionadas en la planta clasificadora de basura que tiene la municipalidad de la ciudad de Quetzaltenango.

B. Específicos

- Determinar el procedimiento de clasificación adecuado para el funcionamiento de la planta clasificadora de residuos sólidos urbanos.
- Desarrollar la ingeniería básica para el diseño y operación del relleno sanitario.
- Establecer el proceso para la obtención de abono orgánico.
- Convertir el diseño en un modelo adaptable para otros municipios.
- Presentar un estudio económico para la funcionalidad del proyecto.

V. PROBLEMA A RESOLVER

La municipalidad de la ciudad de Quetzaltenango posee una planta clasificadora de residuos sólidos urbanos y un terreno para relleno sanitario, los cuales no se utilizan. Actualmente, estos residuos son recogidos en la ciudad y son llevados al basurero municipal para su disposición final, donde son vertidos al azar sin tratamiento alguno.

VI. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el trabajo de graduación, se inició con la recolección de datos, para ello, se inició una búsqueda bibliográfica sobre desechos sólidos urbanos y su tratamiento para evitar la contaminación. Se tomaron fotografías sobre el actual basurero de la municipalidad de Quetzaltenango, y sobre la planta clasificadora de basura para poder determinar cómo se llevaría a cabo su funcionamiento.

Se recopiló información en la municipalidad, sobre la basura generada por día, el equipo utilizado para la recolección. Con esta información se procedió a hacer el diseño del relleno sanitario y sus debidas especificaciones para su funcionamiento, el diseño de logística en la planta clasificadora de basura y el análisis económico para determinar si es rentable el proyecto, todo esto para implementar el tratamiento de los desechos sólidos urbanos generados en el municipio de Quetzaltenango.

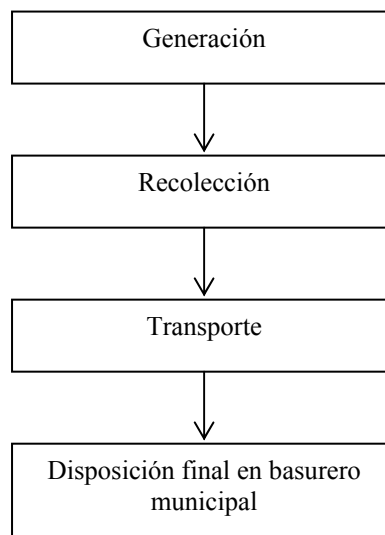
Con esta información, se inició el reporte final de trabajo de graduación.

VII. RESULTADOS

A. Planta de clasificación

1. **Situación actual:** La cantidad de generación diaria de residuos sólidos urbanos en la ciudad de Quetzaltenango es aproximadamente 150,000 kg/día (150 TM²/día), la cual es generada por el 95 % de la población urbana. Para la recolección, la municipalidad dispone de 16 camiones de 10,000 kg (10 TM) cada uno, los cuales transportan la basura al terreno de la municipalidad que sirve como un vertedero a cielo abierto.

Ilustración No. 4. Secuencia actual del proceso de manejo de residuos sólidos urbanos

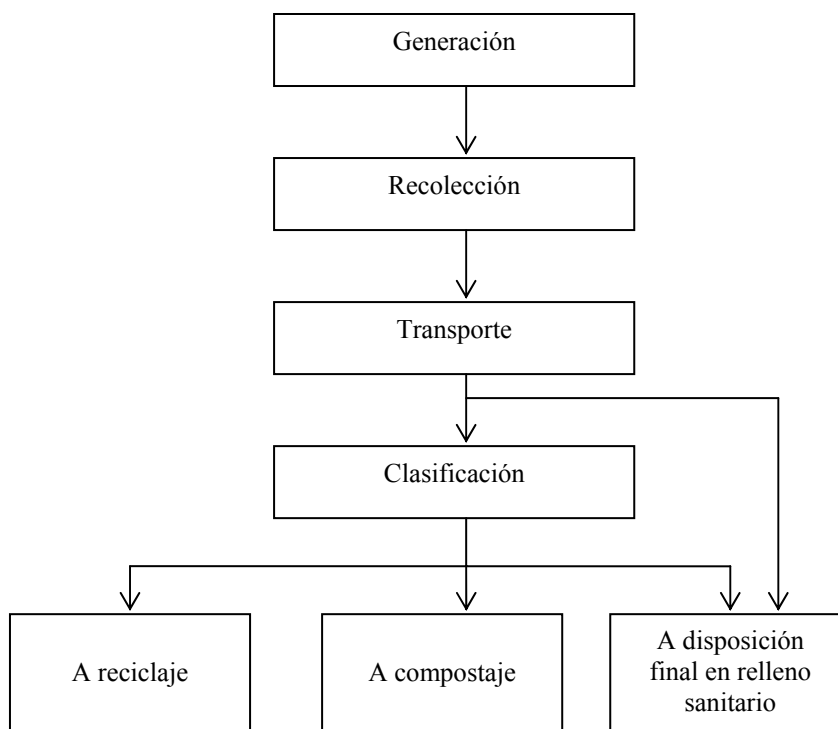


2. **Situación proyectada:** La base que se considera para el proyecto es que la generación diaria de residuos sólidos urbanos es la misma, se utilizará el mismo transporte, con la diferencia que el 25 % de ésta va a ser transportada a la planta clasificadora, el material a separar será 37500 kg/día, el resto de la basura será llevará directamente a su disposición final o relleno sanitario.

Al área de compostaje se llevará el material orgánico proveniente de la recolección directa en mercados (sin pasar por planta clasificadora), así también de la cantidad obtenida en la planta clasificadora.

² TM = tonelada métrica

Ilustración No. 5. Secuencia establecida de manejo de residuos sólidos urbanos



3. **Ubicación:** La planta clasificadora de residuos sólidos urbanos de la ciudad de Quetzaltenango se encuentra en el centro de la ciudad y está ubicada en un terreno municipal de 1253.80 m² de los cuales 280.50 m² son ocupados por la planta. (Ver mapa de la ciudad en anexo B, pág. No. 58)

4. **Descripción general de la planta:** El sistema está ubicado bajo techo, en una planta de dos niveles, en la parte alta cuenta con el sistema de separación y en la parte baja con el almacenamiento del material reciclado.

La planta clasificadora cuenta con dos líneas para separación. Cada línea cuenta con una banda inclinada, ubicada en el primer nivel, de 4.60 m de largo por 0.75 m de ancho, la cual funciona por medio de un motor de 2.24 kW (3 HP), esta banda sirve para transportar la basura del primero al segundo nivel. En la planta alta existe una banda horizontal, que es donde los operarios hacen la clasificación, la cual mide 20.0 m de largo por 0.90 m de ancho que funciona por medio dos motores, uno ubicado al inicio de la banda de 2.24 kW y otro al final de 3.73 kW (5 HP).

Cada línea para el proceso de separación cuenta con cinco receptores para almacenamiento de desechos reciclables, uno para material no reciclable y uno para recibir el material para compostaje.

Ilustración No. 6. Banda transportadora



Banda inclinada



Banda horizontal

5. **Material a clasificar:** Los materiales clasificados son materia prima de procesos de reciclaje, ya que existe una demanda en el mercado de estos productos. Los materiales que pueden ser reciclados son: el vidrio, plásticos, cartón, papel, aluminio y metales. Los materiales no reciclables, son los que se llevarán a la disposición final en el relleno sanitario, como: pañales y pañuelos desechables, toallas sanitarias, etc. Los compuestos orgánicos que son separados en la planta clasificadora se dispondrán en un área de compostaje, para obtener recursos con el abono orgánico.

6. **Capacidad de operación:** La planta clasificadora tiene capacidad de clasificación del 25 % de los residuos sólidos urbanos generados en la ciudad de Quetzaltenango.

7. **Proceso de clasificación:** Se determinó el proceso de clasificación, tomando como base la composición general de residuos urbanos encontrados en los países en desarrollo, cuadro No. 2 (pág. No.4), debido a que no se tiene un estudio real de la composición de residuos sólidos en Quetzaltenango. Se realizó un balance de masa para representar las cantidades de material reciclable por día.

Ilustración No. 7. Secuencia de clasificación y balance de masa

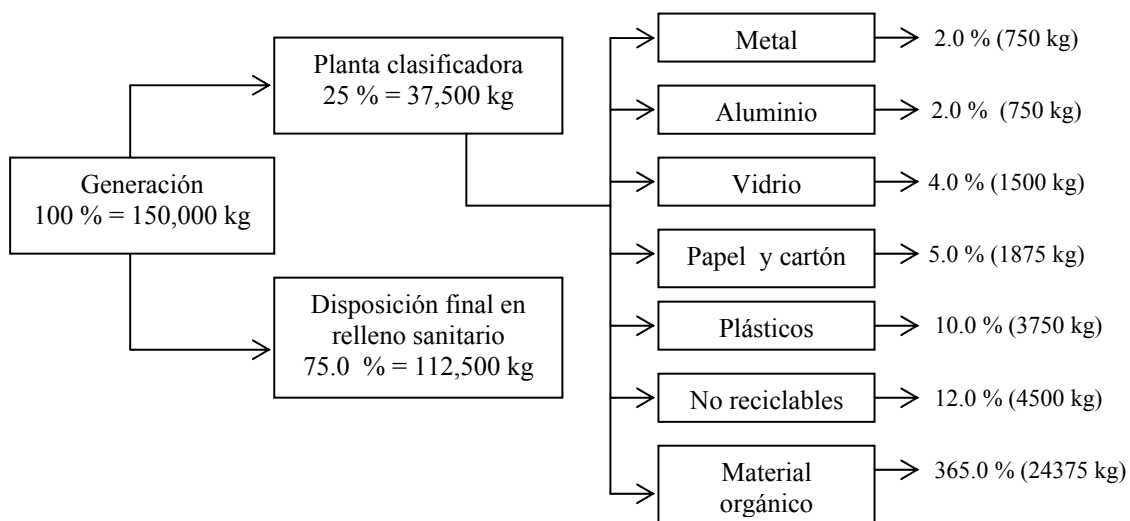
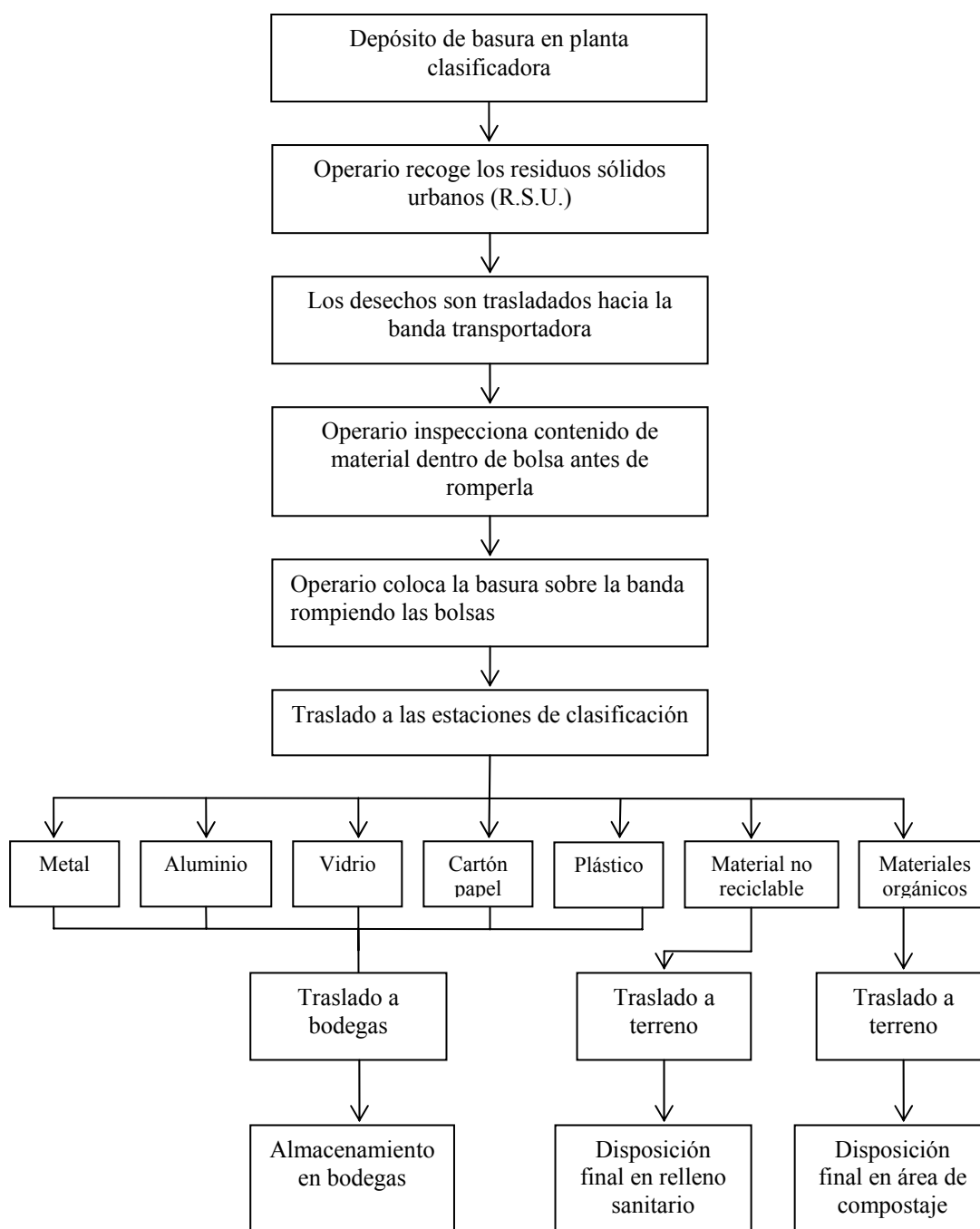


Ilustración No. 8. Diagrama de bloques del proceso en planta clasificadora



B. Relleno sanitario

1. **Vía de acceso:** El relleno sanitario se encuentra ubicado en el cantón Chuicaracoj, localizado a 15 km del centro de la ciudad de Quetzaltenango, en las faldas del volcán Santa María. La vía de acceso representa un gran problema, ya que la carretera es de terracería y de difícil acceso en invierno.

Ilustración No. 9. Vía de acceso periférico



2. **Método a utilizar:** Por las características del terreno, el método de relleno sanitario a utilizar sería el de área combinado con el de trinchera. El método de área, debido a que el terreno es relativamente plano, y el de trinchera debido a que existe un talud propio del terreno que servirá para que los residuos sólidos depositados sean recostados contra él.

Ilustración No. 10. Terreno destinado para el relleno sanitario



3. **Dimensiones del relleno sanitario:** El terreno tiene un área de 7500 m², sus dimensiones son de 50 m de ancho por 150 m de largo y la altura es de 5 m, ver anexo A (pág. No. 57).

4. **Condiciones del suelo:** El material necesario para cubrir los residuos colocados en el vertedero cada día, se deben obtener del área de disposición de material de excavación el cual se obtiene de terrenos adyacentes. El suelo del área es arenoso y pedregoso volcánico.

5. **Condiciones climatológicas:** Los datos presentados a continuación son el promedio obtenido del año 2004 de la estación climatológica INSIVUMEH de la ciudad.

- Precipitación pluvial, 789.6 mmH₂O/m²
- Temperatura, 15.1 °C, con un mínimo 6.6 °C y un máximo 22 °C,
- Humedad, 72 %.

6. **Condiciones ambientales:** El terreno para el relleno sanitario se encuentra en el mismo lugar en donde actualmente está el basurero municipal, en un área rural ubicada en las faldas del volcán Santa María. Dicha área es afectada por los malos olores que emanan de los residuos depositados en el vertedero a cielo abierto y por el vuelo de residuos que van dejando los camiones recolectores en su trayectoria entre otros.

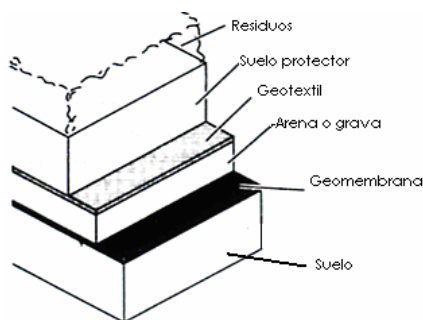
7. **Diseño del relleno sanitario:** Todo relleno sanitario debe contar con ciertos elementos de protección ambiental y a continuación se presentan los que se consideran apropiados para el relleno sanitario de la ciudad de Quetzaltenango.

a. **Impermeabilización:** Los impermeabilizantes sirven para controlar el movimiento de lixiviados y de gases de vertedero hacia los suelos adyacentes al vertedero. El material material que recubre internamente el vertedero es normalmente un sistema de multicapas, suelo, membrana, capa de drenaje, filtro y una capa base.

Sobre el suelo del relleno sanitario, se colocará una capa de geomembrana de polietileno de alta densidad (PEAD) de 1 a 2 mm de espesor, seguida por una capa de grava o capa de drenaje de 0.20 m a 0.30 m aproximadamente y encima de esta se colocará una capa de geotextil no tejido, hecho de polipropileno de 200 g/m². El sistema de multicapas termina con la cobertura final, o la capa base del relleno sanitario, con material de excavación del mismo terreno, con un espesor entre 0.40 m a 0.50 m.

Para poder realizar la impermeabilización se debe excavar el terreno alrededor de 0.85 m, para la colocación de todas las capas mencionadas anteriormente.

Ilustración No. 11. Sistema de multicapas para impermeabilizante

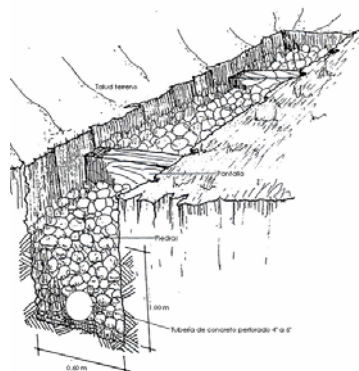


(Fuente: Tchobanoglous, G., H. Theisen y S. Vigil. 1994. *Gestión integral de residuos sólidos*. México D.F., McGraw-Hill. 2 vols. Página 488.)

b. **Control de lixiviados:** Debido a que la lixiviación se debe a disolución de material soluble de una mezcla de sólidos (en este caso, residuos sólidos) mediante un disolvente líquido, se debe tener un buen control de lixiviados ya que sirve para evitar la filtración de líquidos al manto freático, que es un cuerpo de agua de infiltración en el subsuelo que se encuentra ubicado a poca profundidad, así como evitar que el agua pluvial se mezcle con los desechos sólidos en el relleno sanitario.

1) **Construcción del sistema de drenaje periférico:** Se excavan zanjas de drenaje alrededor del relleno de 0.6 ancho por un metro de altura y se instalan pantallas de madera, cada 5 , con un espesor de 0.2 m. Para que el lixiviado pueda permanecer almacenado en el interior del relleno sin rebosar por las zanjas, como se puede observar en la ilustración No. 12, se deja un borde libre de 0.3 metros entre la pantalla y el nivel de la superficie del terreno. En el fondo de la zanja se coloca una tubería de concreto perforado aproximadamente con diámetros entre 0.10 m a 0.15 m (4" a 6") y se rellena la zanja con grava. También se dará en el fondo una pendiente del 2 % a 5 % para que facilite el drenaje.

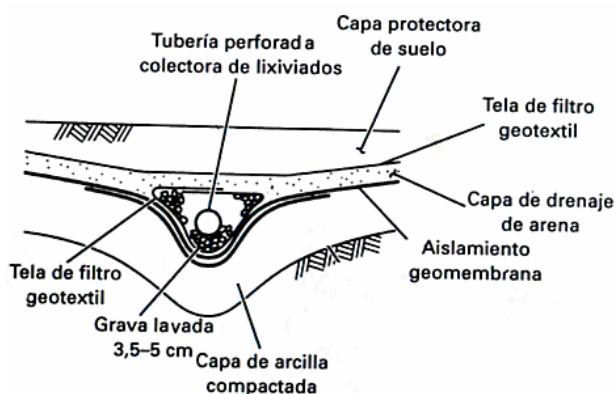
Ilustración No. 12. Zanjas para drenaje del lixiviado



(Fuente: Jaramillo, Jorge. 2002. *Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales*. Antioquia, OPS/CEPIS. 303 págs. Página 156)

2) Construcción del sistema de drenaje interno: Se coloca una tubería de concreto perforada de 6.5 cm de diámetro aproximadamente (2.5"), por debajo de la capa de grava en la base del relleno, el tamaño de las piedras debe tener un diámetro entre 0.1 y 0.15 metros. Se recomienda colocar sobre ellas un material que permita retener partículas finas, un geotextil (se puede utilizar sacos o costales de polipropileno) y encima de éste se coloca una capa de suelo compactado para garantizar el aislamiento entre la superficie del drenaje y los residuos sólidos.

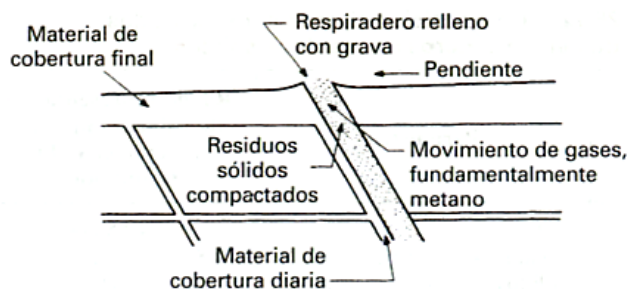
Ilustración No. 13. Vista transversal de un sistema de drenaje interno



(Fuente: Tchobanoglous, G., H. Theisen y S. Vigil. 1994. *Gestión integral de residuos sólidos*. México D.F., McGraw-Hill. 2 vols. Página 492)

c. Control de gases de vertedero: El movimiento lateral de los gases producidos en un vertedero, se puede controlar mediante la instalación de respiraderos, los cuales están hechos comúnmente con grava, para ello se recomienda un espesor de 0.30 a 0.50 m.

Ilustración No. 14. Vista transversal de un respiradero

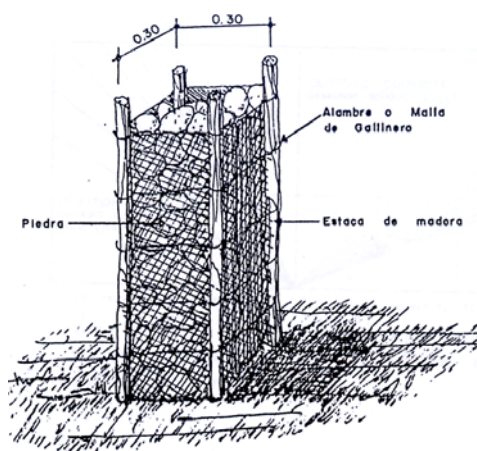


(Fuente: Perry, Robert y D. Green. 2001. *Manual del Ingeniero Químico*. 7ª edición. Prologuista, Storch, José. Madrid, McGraw-Hill. 4 vols. Página 25-135)

El movimiento de gases desde el interior del relleno, se debe evacuar mediante un sistema de ventilación, como una chimenea, que atraviesa en sentido vertical, todo el relleno desde el fondo hasta la superficie. Las chimeneas se deberán construir a 10 m de los taludes, con una separación de 30 m, por lo que se colocarán dos chimeneas a lo ancho del terreno y cinco a lo largo. En total se tendrán diez chimeneas con un diámetro aproximado de 0.30 m.

Se pueden utilizar como materiales de construcción vigas de madera de pino, revestidas de malla galvanizada y relleno de piedra, (ver ilustración No. 15). A medida que el relleno sube de nivel, se van construyendo las chimeneas (ver ilustración No. 16).

Ilustración No. 15. Chimenea



(Fuente: Jaramillo, Jorge. 2002. *Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales*. Antioquia, OPS/CEPIS. 303 págs. Página 161)

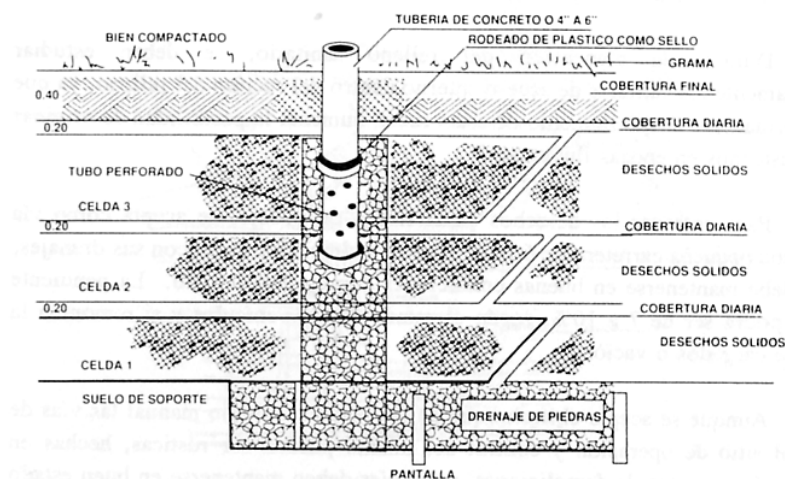
Ilustración No. 16. Construcción de chimeneas



(Fuente: Jaramillo, Jorge. 2002. *Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales*. Antioquia, OPS/CEPIS. 303 págs. Página 192.)

En el extremo superior, al finalizar la chimenea, se colocan dos tubos de concreto, uno encima de otro, para facilitar la captación de gases. El primero será de concreto perforado y el segundo de concreto liso (ver ilustración No. 17.)

Ilustración No. 17. Corte transversal de chimenea terminada



(Fuente: Jaramillo, Jorge. 2002. *Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales*. Antioquia, OPS/CEPIS. 303 págs. Página 192.)

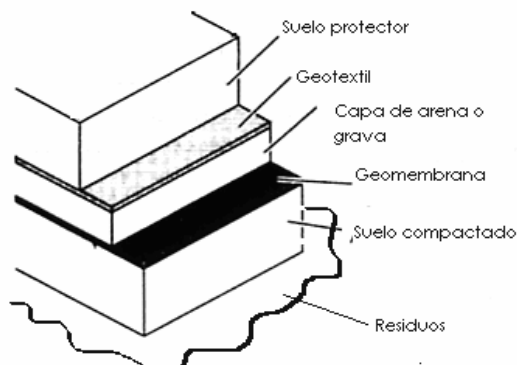
d. Celdas

1) **Tamaño de celdas:** Se hará dos celdas por día, con un volumen de 97.5 m^3 cada una, las cuales se dispondrán en áreas cuadradas de 8.1 m^2 , con una altura de 1.5 m por celda. En total serán aproximadamente 18 celdas a lo largo y 6 a lo ancho del terreno, o sea, 115 celdas por nivel. Debido a que el terreno tiene 5 m de altura, se podrían tener 3 niveles, haciendo un total de 384 celdas en todo el relleno sanitario.

2) **Cobertura de celdas:** Al construirse la celda, es necesario cubrirla con una capa de tierra, entre 0.10 a 0.20 m. El material de cobertura se obtiene de terrenos adyacentes al relleno sanitario, y en general el volumen necesario es de 20 % a 25 % del volumen de la celda.

3) **Cobertura final:** Al ser llenado en su totalidad, el relleno sanitario utilizará una cobertura final para disminuir el riesgo de filtración de agua. Para este fin se debe colocar encima del último nivel de residuos sólidos, una capa de suelo compactado (subbase) con un espesor entre 0.20 m y 0.30 m, una capa de geomembrana (capa de barrera), seguido de una capa de arena o grava (capa de drenaje) aproximadamente de 0.20 m, luego una capa de geotextil no tejido, para limitar la mezcla de suelo con la arena (capa para separación). Por último se coloca una capa de suelo superficial o protector entre 0.40 m a 0.50 m. Ver ilustración No. 18.

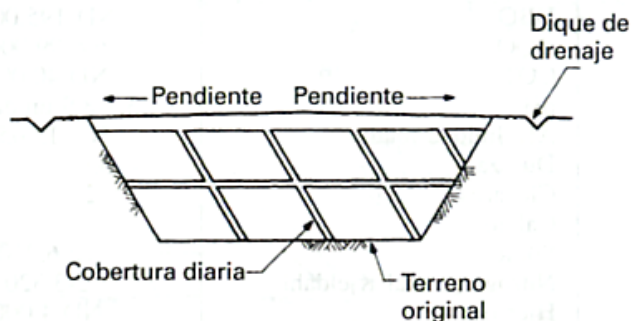
Ilustración No. 18. Sistema de multicapas para cobertura final



(Fuente: Tchobanoglous, G., H. Theisen y S. Vigil. 1994. *Gestión integral de residuos sólidos*. México D.F., McGraw-Hill. 2 vols. Página 488)

Como se puede observar en la ilustración No. 19, la última capa de suelo debe tener una pequeña inclinación, entre el 2 al 3 %, para maximizar la escorrentía superficial, y debe tener un dique de drenaje alrededor del terreno del relleno.

Ilustración No. 19. Pendiente de cobertura



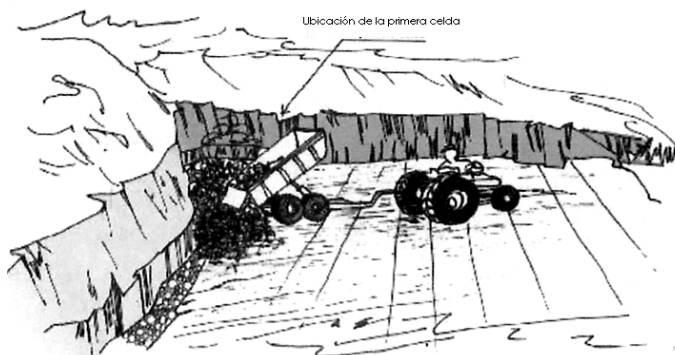
(Fuente: Perry, Robert y D. Green. 2001. *Manual del Ingeniero Químico*. 7ª edición. Prologuista, Storch, José. Madrid, McGraw-Hill. 4 vols. 25-135)

e. **Operación:** Una vez realizado el diseño del relleno sanitario y la preparación del terreno, sigue la operación del mismo, se debe contar con un plan de operación preestablecido para que la construcción del relleno sanitario sea adecuado.

1) Método constructivo: Cada camión recolector que llegue al terreno debe descargar solo en el frente de trabajo autorizado, y debe depositar los desechos esparciéndolos sobre la superficie del terreno y recostarlos contra el talud del terreno inclinado, ver ilustración No. 20. Posteriormente, se debe compactar uniformemente la basura para formar la celda que será cubierta posteriormente. Como se puede observar en la ilustración No. 21, las celdas deben ser construidas empezando por un extremo y se avanza hasta terminar en el otro extremo.

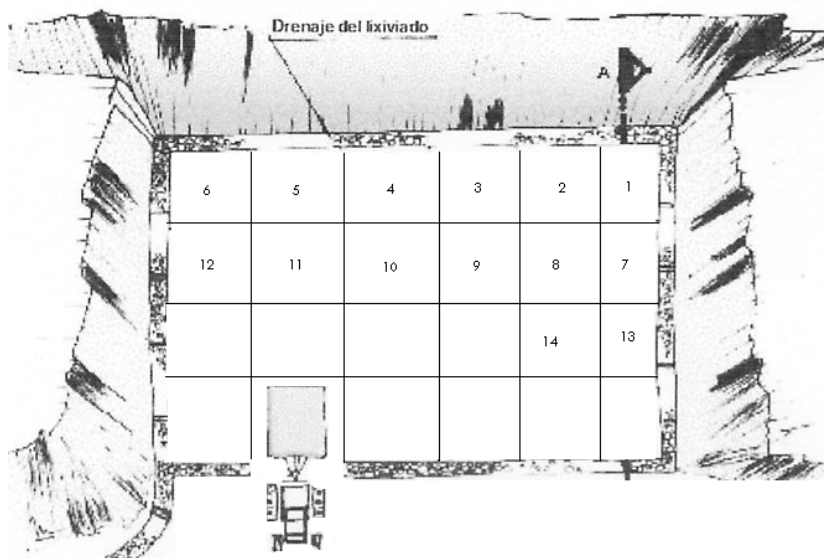
Es importante señalar en el terreno el área que ocupará la celda diaria, para no sobrepasar las dimensiones que fueron diseñadas.

Ilustración No. 20. Descarga de desechos sólidos



(Fuente: Jaramillo, Jorge. 2002. *Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales*. Antioquia, OPS/CEPIS. 303 págs. Página 189)

Ilustración No. 21. Avance de la construcción del relleno



(Fuente: Jaramillo, Jorge. 2002. *Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales*. Antioquia, OPS/CEPIS. 303 págs. Página 174.)

C. Compostaje

El método para compostaje a utilizar es en pilas, de forma aerobia, con una altura máxima de 1.5 m, ancho menor o igual a la altura, el largo de la pila dependerá de la cantidad de materia orgánica obtenida por día.

1. Descripción del proceso: El proceso de compostaje se lleva a cabo en cuatro etapas.

La primera, pre-fermentación, dura aproximadamente 4 - 5 días y en ella los microorganismos se multiplican rápidamente, la temperatura sufre un aumento y esto hace que se produzcan ácidos orgánicos que disminuyen el pH. Esta fase equivale al grado 1 de madurez.

La segunda etapa o fermentación principal, se alcanza cuando la temperatura dentro de la pila asciende aproximadamente entre 50 °C a 60 °C, esto es producto de la actividad microbiológica. Los microorganismos transforman el nitrógeno en amoníaco y el pH del medio se hace alcalino. Cuando la pila alcanza una temperatura de 60 °C, aparecen otros tipos de bacterias, que se encargan de descomponer las ceras, proteínas y hemicelulosas, esta etapa puede durar entre 2 a 4 semanas. Es importante controlar el porcentaje de humedad (50 % a 60 %) para que sean buenas las condiciones de biodegradación. Representa el grado 2-3 de madurez.

Cuando la temperatura desciende inicia la etapa de enfriamiento. El pH disminuye ligeramente y se lleva a cabo la maduración. La pila se mantiene a temperatura ambiente y el proceso de biodegradación se desarrolla más despacio, por lo que tarda dos meses aproximadamente. Grado cuatro ó cinco de madurez.

Ilustración No. 22. Diagrama de bloques del proceso de compostaje

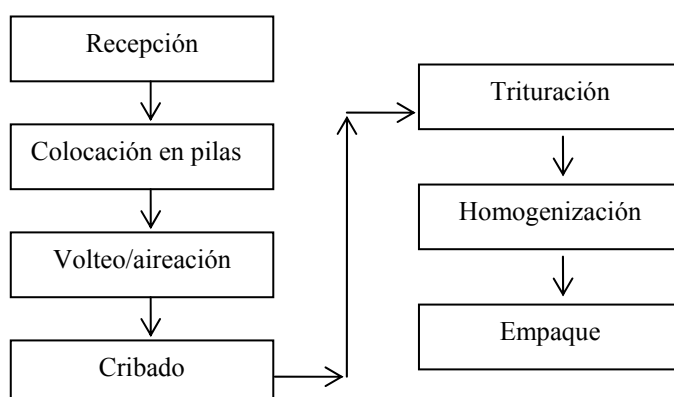
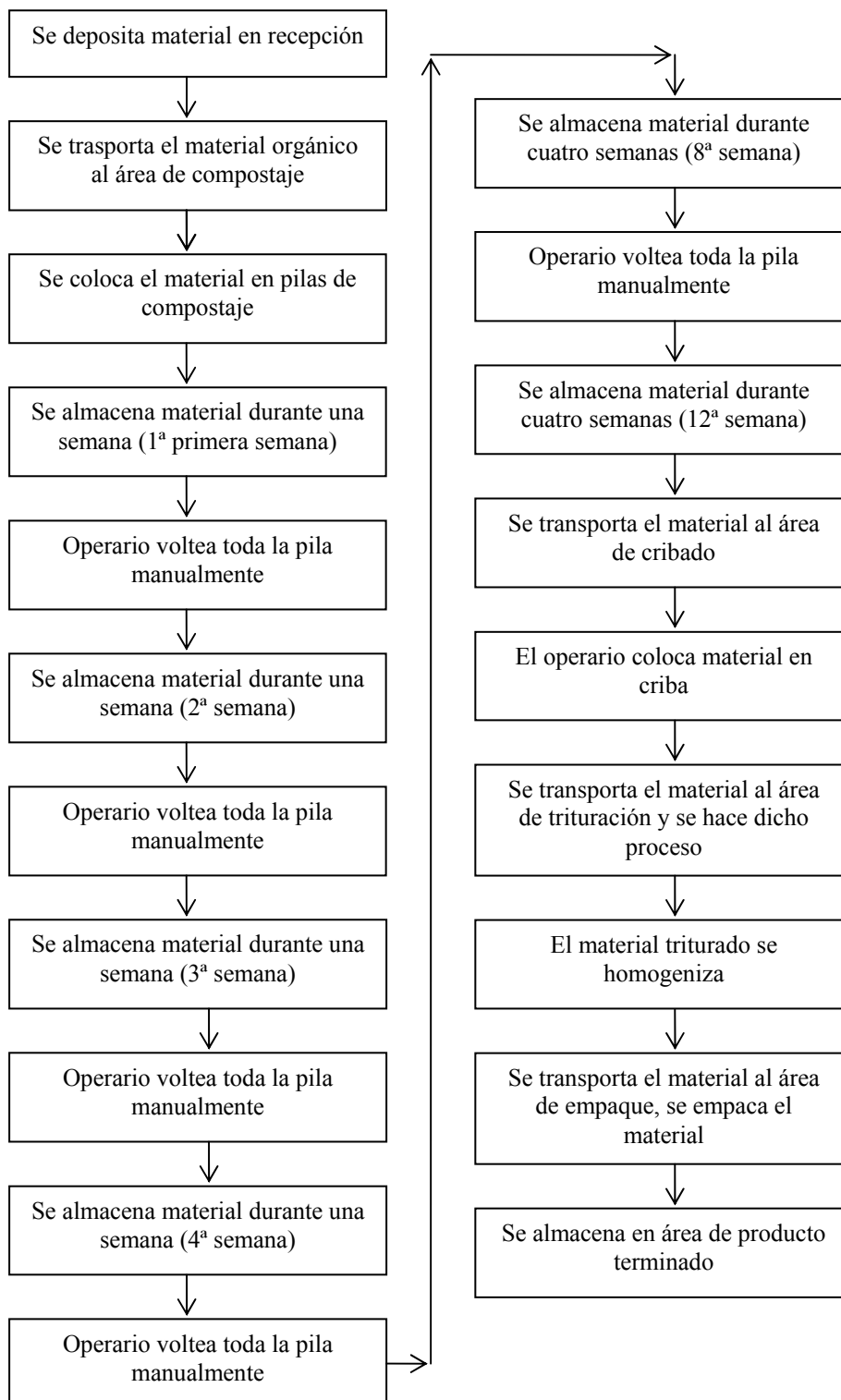


Ilustración No. 23. Diagrama de proceso del compostaje



D. Análisis económico

1. **Costo de infraestructura:** Debido a que ya se tiene construida la planta clasificadora, el terreno destinado para el relleno sanitario y la planta para compostaje, los costos de infraestructura serán los costos necesarios para los inmuebles en la planta clasificadora, muebles de oficina, teléfonos, archivos, etc. Para compostaje deben ser también costos de inmueble debido a que ya ya existe la criba, el homogenizador, la trituradora, además de los materiales de construcción del relleno sanitario. Así mismo, existe maquinas como son la compactadora, retroexcavadora.

En el cuadro No. 12, se pueden observar un estimado de costos para la construcción del relleno sanitario. Los costos incluyen todo el material que se va a utilizar durante todo el llenado del relleno sanitario. Los cuadros de cálculo se pueden ver en el anexo F, página No. 66. La infraestructura necesaria tanto para la planta clasificadora como para el área de compostaje, se pueden observar en el cuadro No. 13 y No. 14.

Cuadro No. 12. Costos para materiales de construcción del relleno sanitario

Material	Costo (Q)
Grava	499,312.50
Malla galvanizada	650.00
Geotextil	154,076.40
Geomembrana	514,050.00
Madera de pino	532.00
TOTAL	1,168,620.90

Cuadro No. 13. Inmuebles para planta clasificadora

Planta clasificadora			
	Unidades	Costo por unidad (Q)	Costo total (Q)
Computadoras	2	7,000.00	14,000.00
Fax	1	1,000.00	1,000.00
Escritorios	3	800.00	2,400.00
Fotocopiadora	1	3,000.00	3,000.00
Sillas	4	250.00	1,000.00
Basureros	3	40.00	120.00
Archivo	4	200.00	800.00
Teléfono	3	200.00	600.00
TOTAL			22,920.00

Cuadro No. 14. Infraestructura para área de compostaje

Compostaje			
	Unidades	Costo por unidad (Q)	Costo total (Q)
Palas	10	50.00	500.00
Teléfono	2	200.00	400.00
Computadora	2	7,000.00	14,000.00
Escritorio	3	800.00	2,400.00
Basureros	3	40.00	120.00
Fax	1	1,000.00	1,000.00
Fotocopiadora	1	3,000.00	3,000.00
Sillas	4	250.00	1,000.00
Archivos	2	200.00	400.00
TOTAL			22,820.00

Los costos de infraestructura tendrán un valor aproximado de Q 1,214,360.90 , como se puede observar en el cuadro No. 15.

Cuadro No. 15. Inversión inicial de infraestructura

Área	Inversión (Q)
Planta clasificadora	22,920.00
Relleno sanitario	1,168,620.90
Compostaje	22,820.00
TOTAL	1,214,360.90

2. **Costo de personal:** El costo de personal se hizo en base a salarios mensuales. Se estima el personal necesario para cada proceso y el valor aproximado de la mano de obra en la planta clasificadora, en el relleno sanitario, en el proceso de compostaje y personal administrativo.

En las siguientes cuadros No. 17, 18, 19 y 20 (págs. No. 43, 43, 44 y 44 respectivamente), se estiman los costos por trabajador o salario neto, y la columna de total con prestaciones, son los salarios que se deben contemplar ya que estos son los salarios con las prestaciones que se les darán a cada empleado. Las prestaciones que se darán son se pueden observar en el cuadro No. 16.

Cuadro No. 16. Prestaciones consideradas

Prestación	Porcentaje
IGSS	10.67 %
IRTRA	1.00 %
INTECAP	1.00 %
Aguinaldo	8.33 %
Bono 14	8.33 %
Pasivo	8.33 %
Otros	8.33 %
TOTAL	45.99 %

Cuadro No. 17. Personal para planta clasificadora

Puesto	Cantidad	Costo mensual (Q)	Total mensual (Q)	Total con prestaciones mensual (Q)
Supervisor	1	5,000.00	5,000.00	7,299.50
Operarios en banda separadora	24	1,300.00	31,200.00	45,548.88
Operarios receptores de desechos sólidos en la entrada de la planta	3	1,300.00	3,900.00	5,693.61
Operarios que rompen bolsas	4	1,300.00	5,200.00	7,591.48
Encargados de manejo de tolvas	3	1,300.00	3,900.00	5,693.61
Limpieza	2	1,300.00	2,600.00	3,795.74
Mantenimiento de equipo	1	4,000.00	4,000.00	5,839.60
TOTAL	38	15,500.00	55,800.00	81,462.42

La operación del relleno sanitario, va a estar encargada de un supervisor, dos personas encargadas de operar en la máquina compactadora, y tres albañiles que son los encargados para la construcción de las chimeneas y drenajes.

Cuadro No. 18. Personal para relleno sanitario

Puesto	Cantidad	Costo mensual (Q)	Total mensual (Q)	Total con prestaciones mensual (Q)
Supervisor	1	5,000.00	5,000.00	7,299.50
Máquina compactadora	2	2,500.00	5,000.00	7,299.50
Albañiles	3	1,300.00	3,900.00	5,693.61
TOTAL	6	8,800.00	13,900.00	20,292.61

El proceso de compostaje es un proceso manual, por lo que se necesita de un supervisor, quien va a ser el encargado de verificar que todos los parámetros de control estén en el rango adecuado. En la recepción de desechos sólidos, se hace una separación de posibles materiales no orgánicos. Se necesitará una persona en la trituradora y una en la operación de cribado. Para el proceso de volteo se necesitan ocho personas las cuales deben colocar las pilas en el terreno y hacer el volteo para cada una de ellas.

Cuadro No. 19. Personal para compostaje

Puesto	Cantidad	Costo mensual (Q)	Total mensual (Q)	Total con prestaciones mensual (Q)
Supervisor	1	5,000.00	5,000.00	7,299.50
Receptores	3	1,300.00	3,900.00	5,693.61
Volteadores	8	1,300.00	10,400.00	15,182.96
Trituradora	1	1,300.00	1,300.00	1,897.87
Cribado	1	1,300.00	1,300.00	1,897.87
TOTAL	14	10,200.00	21,900.00	31,971.81

Cuadro No. 20. Personal para área administrativa

Puesto	Cantidad	Costo mensual (Q)	Total mensual (Q)	Total con prestaciones mensual (Q)
Jefe de operaciones	1	8,000.00	8,000.00	11,679.20
Secretaria	2	1,700.00	3,400.00	4,963.66
Mercadeo-Ventas	1	2,500.00	2,500.00	3,649.75
Contador-Compras	1	2,500.00	2,500.00	3,649.75
TOTAL	5	14,700.00	16,400.00	23,942.36

Cuadro No. 21. Costo total de personal

Personal	Costo mensual (Q)
Planta clasificadora	81,462.42
Relleno sanitario	20,292.61
Compostaje	31,971.81
Administración	23,942.36
TOTAL	157,669.20

Teniendo en cuenta los costos anteriormente mencionados, se estima un costo total de personal de Q 157,669.20 mensuales.

3. **Costo de operación:** El costo de operación en la planta clasificadora, se debe a los motores con los que funcionan las bandas, las lámparas que siempre estarán encendidas durante el proceso, la papelería que se gastará para el área administrativa y el material utilizado en los baños.

Cuadro No. 22. Costo de operación para planta clasificadora

Servicio	Capacidad (kW-h)	Cantidad	Horas	kW-día	Costo por kW (Q)	Costo diario (Q)	Costo mensual (Q)
Motor	2.24	2	8	35.84	1.13	40.57	1,217.13
	2.24	2	8	35.84	1.13	40.57	1,217.13
	3.75	2	8	60.00	1.13	67.92	2,037.60
Iluminación	0.04	60	8	19.20	1.13	21.73	652.03
Bomba agua	2.24	1	4	8.96	1.13	10.14	304.28
Papelería							500.00
Baños							350.00
TOTAL							6,278.17

Se debe tomar en cuenta el gasto de combustible en el relleno sanitario, ya que se trabajará con una máquina retroexcavadora y una compactadora. Se estima que se gasten diariamente 75.6 L, como se puede ver en el cuadro No. 23 (Pág No. 45)

Cuadro No. 23. Costo de operación para relleno sanitario

Combustible	Gal/día	L/día	Costo por galón (Q)	Costo por litro (Q)	Costo diario (Q)	Costo mensual (Q)
Retroexcavadora	20	75.6	20.00	5.29	400.00	12,000.00
Compactadora	20	75.6	20.00	5.29	400.00	12,000.00
TOTAL	40	151.2	40.00	10.58	800.00	24,000.00

Cuadro No. 24. Costo de operación para compostaje

Compostaje							
Servicio	Capacidad (kW-h)	Cantidad	Horas	kW-día	Costo por kW (Q)	Costo diario (Q)	Costo mensual (Q)
Criba	2.24	1	8	17.92	1.13	20.29	608.56
Trituradora	2.24	1	8	17.92	1.13	20.29	608.56
Iluminación	0.04	20	8	6.40	1.13	7.24	217.34
Bomba agua	2.24	1	4	8.96	1.13	10.14	304.28
Papelería							500.00
Baños							350.00
TOTAL							2,588.75

Entonces, el costo de operación de la planta clasificadora, el relleno sanitario y el compostaje, es aproximadamente Q 32,866.92 como se puede ver en el cuadro No. 25.

Cuadro No. 25. Costo de operación total

Operación	Costo mensual (Q)
Planta clasificadora	6,278.17
Relleno sanitario	24,000.00
Compostaje	2,588.75
TOTAL	32,866.92

El material reciclable obtenido en la planta clasificadora será vendido, en el cuadro No. 26 se estima un precio un precio de venta, esto ayudará a generar ingresos. Cabe mencionar que debido a que es un estimado de precio, se asume que todo el material reciclable está en buenas condiciones para su venta, por lo que puede ser un factor importante para la estimación del análisis económico.

Cuadro No. 26. Estimación del material reciclable para la venta

Material reciclable	Porcentaje (%)	Masa diaria (kg)	Masa mensual (kg)	Costo por kg (Q)	Costo total mensual (Q)
Aluminio	2	750	15,000.00	5.00	75,000.00
Papel y cartón	5	1,875.00	37,500.00	0.25	9,375.00
Plástico	10	3,750.00	75,000.00	1.25	93,750.00
Vidrio	4	1,500.00	30,000.00	0.11	3,300.00
Metal	2	750	15,000.00	0.22	3,300.00
TOTAL					184,725.00

Debido a que los trabajadores están operando con materiales como vidrio, latas, etc, pueden sufrir daños físicos durante su operación, es por ello que se requiere un equipo de seguridad, como se puede ver en el cuadro No. 27. El costo mensual para la planta clasificadora, relleno sanitario y compostaje asciende aproximadamente a Q 1819.73, utilizando dos pares de botas, guantes (cuero y lona) y dos protectores por año, 1 mascarilla por semana.

Cuadro No.27. Equipo de seguridad

	Material	Cantidad anual	Cantidad mensual	Costo por unidad (Q)	Total mensual (Q)
Planta clasificadora	Botas	72		53.00	318.00
	Guantes	72		16.00	96.00
	Lentes de protección	72		18.00	108.00
	Mascarillas		144	1.10	158.40
	Protector para cuerpo	72		35.00	210.00
Relleno sanitario	Mascarillas		24	1.10	26.40
	Botas	12		53.00	636.00
Compostaje	Botas	28		53.00	123.67
	Mascarilla		56	1.10	61.60
	Protector para cuerpo	28		35.00	81.67
TOTAL					1,819.73

Entonces, el costo del tratamiento de desechos sólidos en la ciudad de Quetzaltenango es aproximadamente Q 200,355.85, tomando en cuenta costo de personal, costo de operación, costo de mantenimiento de equipo y equipo de seguridad mensual (ver cuadro No. 28), pero si se obtiene un valor del material reciclado en la planta clasificadora de Q 184,725.00 (ver cuadro No. 26, pág No. 46) y se tiene el ingreso que tiene la municipalidad, que es la tasa de recolección de basura que es Q 4.00 por vivienda, lo que genera un ingreso de Q 80,000.00 ya que son 20,000 viviendas que utilizan el servicio, la diferencia neta sería Q 64,369.15 (ver cuadro No. 29, pág. No. 47), esto significa que aún teniendo todos los gastos anteriormente mencionados, la municipalidad ingresaría esa cantidad mensualmente.

Cuadro No. 28. Costo de tratamiento de desechos sólidos

Descripción		Costo mensual (Q)
Inversión inicial	Infraestructura relleno sanitario	1,168,620.90
	Infraestructura área de compostaje	22,820.00
	Infraestructura planta clasificadora	22,920.00
	Chapeado de terreno para relleno sanitario	5,000.00
	Puesta en marcha del proyecto	179,466.14
	TOTAL	1,398,827.04
Costos fijos	Sueldos en planta clasificadora	81,462.42
	Sueldos en relleno sanitario	20,292.61
	Sueldos en compostaje	31,971.81
	Sueldos de administración	23,942.36
	Mantenimiento de equipo	8,000.00
	TOTAL	165,669.20
Costos variables	Costo de operación en planta clasificadora	6,278.17
	Costo de operación en relleno sanitario	24,000.00
	Costo de operación en compostaje	2,588.75
	Equipo de seguridad en planta clasificadora	890.40
	Equipo de seguridad en relleno sanitario	662.40
	Equipo de seguridad en compostaje	266.93
	TOTAL	34,686.65

Cuadro No. 29. Diferencia neta

Descripción	Costo mensual (Q)	Costo anual (Q)
Total costos fijos y variables	- 200,355.85	- 2,404,270.22
Ventas de materiales reciclables	184,725.00	2,216,700.00
Aumento tarifa	80,000.00	960,000.00
TOTAL NETO	64,369.15	772,429.78

4. **Criterios de evaluación del proyecto:** Se utilizaron dos métodos para determinar si el proyecto era rentable, los criterios evaluados fueron TIR (tasa interna de retorno) y VAN (valor neto actual). Para poder obtenerlos, se hizo un flujo de caja para 10 años, como se puede observar el cuadro No. 30, 31 y 32.

Los valores de depreciación de obtuvieron por el método SMARC (sistema modificado acelerado de recuperación de costos), estos valores se pueden observar en el anexo G (Pág. No. 48).

Cuadro No. 30. Flujo de caja desde año cero a año tres

Costo	Año			
	0	1	2	3
Ingresos (Q)		3,176,700.00	3,176,700.00	3,176,700.00
Costos variables (Q)		416,239.82	432,889.41	450,204.99
Costos fijos (Q)		1,988,030.40	2,067,551.62	2,150,253.68
Depreciación (Q)		8,543.20	13,799.20	8,503.20
Utilidad sin impuesto (Q)		763,886.58	662,459.77	567,738.13
Utilidad neta (Q)		763,886.58	662,459.77	567,738.13
Inversión inicial (Q)	1,398,827.04			
Flujo de caja (Q)	(1,398,827.04)	772,429.78	676,258.97	576,241.33

Cuadro No. 31. Flujo de caja desde año cuatro a año siete

Costo	Año			
	4	5	6	7
Ingresos (Q)	3,176,700.00	3,176,700.00	3,176,700.00	3,176,700.00
Costos variables (Q)	468,213.19	486,941.72	506,419.39	526,676.16
Costos fijos (Q)	2,236,263.83	2,325,714.38	2,418,742.96	2,515,492.67
Depreciación (Q)	5,261.60	4,976.80	2,844.80	714.40
Utilidad sin impuesto (Q)	466,961.38	359,067.10	248,692.86	133,816.76
Utilidad neta (Q)	466,961.38	359,067.10	248,692.86	133,816.76
Inversión inicial (Q)	-	-	-	-
Flujo de caja (Q)	472,222.98	364,043.90	251,537.66	134,531.16

Cuadro No. 32. Flujo de caja desde año ocho a año diez

Costo	Año		
	8	9	10
Ingresos (Q)	3,176,700.00	3,176,700.00	3,176,700.00
Costos variables (Q)	547,743.21	569,652.94	592,439.05
Costos fijos (Q)	2,616,112.38	2,720,756.88	2,829,587.15
Depreciación (Q)	356.80	-	-
Utilidad sin impuesto (Q)	12,487.61	(113,709.81)	(245,326.21)
Utilidad neta (Q)	12,487.61	(113,709.81)	(245,326.21)
Inversión inicial (Q)	-	-	-
Flujo de caja (Q)	12,844.41	(113,709.81)	(245,326.21)

Cuadro No. 33. Valores de TIR y VAN

TIR	36.80%
Interés VAN	4.50%
VAN	Q 1,219,240.33

Cuadro No. 34. Tiempo de recuperación de la inversión

Tiempo (Año)	Valor (Q)
0	-1,398,827.04
1	-626,397.26
2	49,861.71
3	626,103.04
4	1,098,326.03
5	1,462,369.93
6	1,713,907.59
7	1,848,438.75
8	1,861,283.16
9	1,747,573.35
10	1,502,247.14

VIII. DISCUSIÓN

El sistema de tratamiento de desechos sólidos está diseñado de acuerdo a la generación de basura del presente año, para ello solamente se adecuó el sistema actual al sistema que se quiere proyectar, o sea, el mismo equipo de transporte y la misma cantidad de desechos sólidos generados en la ciudad.

El diseño contempla: la generación, la recolección y el transporte, la clasificación de material, que puede ir a tres diferentes procesos, reciclaje, compostaje u obtención de abono orgánico; y disposición final o relleno sanitario, como se puede observar en la ilustración No. 5 (pág. No.28).

Hay que tomar en cuenta que los desechos sólidos que no pasan por la planta clasificadora van directamente al relleno sanitario.

A. Planta clasificadora

La planta clasificadora solamente cuenta con el 25 % de capacidad para separar los desechos sólidos urbanos generados en la ciudad, y a partir de ello, se determinó la cantidad de material reciclable que se puede obtener, ver ilustración No. 7 (pág. No.29).

En la planta clasificadora se hará el proceso de separación, cuyo orden se basa en los porcentajes de material encontrado en los residuos sólidos urbanos en países en vías de desarrollo debido a que la municipalidad de Quetzaltenango no tiene ningún dato sobre la composición de la basura generada. La cantidad clasificada de material dependerá de su composición real.

Para el proceso, ilustración No. 8 (pág. No.29), los operarios que reciben los desechos sólidos, deben inspeccionar el contenido de la bolsa previo a colocarlos en la banda transportadora. Si determinan que en su interior sólo hay materiales no reciclables, deben permanecer dentro de la bolsa para facilitar su manejo. Por ejemplo: si una bolsa sólo contiene papel higiénico usado, no se debe romper sobre la banda transportadora.

El orden de clasificación se basa en los porcentajes de cada material reciclable dentro de la basura y en el riesgo de su manipulación. Es decir que se separan primero los metales, aluminio y el vidrio porque se haya en pequeñas cantidades y de no ser retirados en las primeras etapas, se incrementa el riesgo de heridas en los operarios de las siguientes estaciones.

El material de mayor porcentaje dentro de los desechos corresponde a la materia orgánica y por ello se deja en la banda transportadora sin manipulación, para que al llegar al final de la banda sean vertidos en la última tolva de almacenamiento.

Una vez hecha la separación, cada material tiene su respectivo depósito para almacenaje. Para el material reciclable, la evacuación del depósito se lleva a cabo por entidades interesadas en su compra.

Los materiales no reciclables y orgánicos serán transportados al terreno de disposición final, donde se vierten en el relleno sanitario y en el área de compostaje respectivamente.

B. Relleno sanitario

Un relleno sanitario debe tener las consideraciones necesarias para que el tratamiento final de los desechos sólidos urbanos sea adecuado. Dichas consideraciones contemplan que los desechos no sean una fuente de contaminación ambiental y por ello el relleno debe tener impermeabilización, drenajes, chimeneas y coberturas.

El tipo de relleno a utilizar será una combinación de método de área y método trinchera, el método de área debido a que el terreno es plano y no es necesario hacer excavaciones y el de trinchera debido a que tiene taludes que fueron adaptadas para el terreno.

Como ya se mencionó, la impermeabilización sirve para controlar el movimiento de lixiviados y de gases de vertedero, que se logra con un sistema de multicapas.

La capa de geomembrana sirve para impermeabilizar el terreno, hecha de PEAD que mientras sea más grueso mejor funcionalidad. Seguida de esta capa, va la capa de grava que sirve como drenaje interno dentro del sistema de multicapas. Encima de ésta sigue la capa de geotextil no tejido, que se utilizada como filtro y separador de capas.

La construcción de drenajes periféricos sirve para captar el lixiviado infiltrado en la capa de grava en la base del relleno sanitario. Son zanjas en el perímetro del terreno, excavadas a un nivel inferior al del impermeabilizante que se rellenan con grava y cubren con un filtro, para que solamente pasen los lixiviados. Al igual que en el impermeabilizante, se utiliza polipropileno. También se utilizan pantallas, cada 5 a 10 m, para que la grava esté bien distribuida dentro del drenaje periférico. Es importante que las zanjas sean cubiertas por un material no permeable, para que no haya filtración en el suelo.

La construcción del sistema de drenaje interno, va dentro de la capa de grava (en el sistema de multicapas de impermeabilización) y sirve para dirigir el lixiviado hacia los drenajes periféricos. Están hechos de tubería de PVC perforada al que deberá colocarse un geotextil que permita únicamente el paso de lixiviado y no partículas sólidas que puedan obstaculizar el paso del fluido.

Para evitar incendios y la proliferación de malos olores se instalarán respiraderos y chimeneas. La utilización de malla galvanizada, madera de pino y grava es para minimizar los costos de construcción sin disminuir la funcionalidad de los dispositivos. Una vez recolectados los gases, pueden ser

quemados al adaptar un quemador en el tubo de concreto en el extremo de la chimenea para eliminar los olores producidos.

Las celdas tendrán una altura de 1.5 m, y se colocarán dos celdas diarias con un área cuadrada de 8.1 m por lado, para facilitar el manejo de su construcción. Una vez colocada la celda, se compactará el material lo mejor posible con un camión compactador, para disminuir el volumen de celda. Cada celda deberá ser cubierta para que estén aisladas entre sí y para evitar infiltraciones. Los cálculos del tamaño de celda y vida útil del relleno sanitario se pueden ver en el anexo C, pág. No. 59.

Se determinó el tiempo de vida para varias capacidades de separación en la planta clasificadora, ver anexos D y E (pág. No. 64 y 65 respectivamente), lo que determina que para una capacidad de 100 % la vida útil del relleno sanitario aumenta a 3.42 años.

C. Compostaje

El método que se utilizará para el proceso de compostaje es en pilas ya que es el más sencillo y el sistema de operación es fácil. La altura máxima de las pilas será 1.5 m, ya que de excederse el volteo y el manejo se puede convertir más complicado.

El porcentaje de humedad deberá ser medido frecuentemente, no debe pasar 60 % para que no se descomponga el material ni debe bajar de 50 % para que la descomposición no sea muy lenta. Si la humedad sobrepasa el límite, el volteo debe ser más frecuente, y si es inferior al límite debe agregarse agua hasta llegar al nivel óptimo de humedad.

El material orgánico se debe voltear durante las primeras cuatro semanas, una vez por semana, ya que este es el tiempo que tarda la fermentación. Para el resto del proceso, que es aproximadamente 2 meses, se realiza un volteo cada 3 - 4 semanas ya que la degradación es más lenta.

Después de tres meses, aproximadamente, se tiene el producto del compostaje, éste debe ser separado por una criba para luego ser triturado y homogenizado. Durante la homogenización se le puede agregar aditivos al abono para mejorar sus propiedades, este es el último paso para que el compostaje sea empacado.

D. Análisis económico

La inversión inicial del proyecto incluye los costos de infraestructura, tomando en cuenta los materiales de construcción del relleno sanitario, los inmuebles que serán utilizados para planta clasificadora y compostaje, que ascienden a un total de Q 1,213,960.90, esto junto con un costo de chapeado del terreno para el relleno sanitario de Q 5,000.00 y un costo de puesta en marcha del proyecto de un 15 % del total de la inversión inicial de Q 179,466.14.

Los costos fijos son los que son independientes de la cantidad de producción y se basan en los sueldos para todos los trabajadores involucrados en el proyecto junto con un costo de mantenimiento de equipo, para motores, lámparas, camiones, los cuales ascienden a una suma mensual de Q 165,669.20. Mientras que los costos variables son los que varían con la cantidad de producción, como son los costos de operación y el equipo de seguridad, en este proyecto estos costos mensuales son aproximadamente Q 34,686.65.

Para que el proyecto genere ingresos mensuales adicionales a los de la venta de materiales reciclables que en este caso es Q 184,725.00, se propone aumentar a Q 4.00 la tarifa de recolección de basura, lo que equivale a Q 80,000.00 ya que la municipalidad tiene una cobertura de recolección de 20,000 viviendas. Si se descuentan los costos fijos y variables a estos ingresos se obtiene una diferencia neta de Q 64,369.15 mensualmente (como se puede observar en el cuadro No. 29, página No. 47).

Se calculó un flujo de caja para 10 años, en el cual se incrementó un 4 % anual en los costos fijos y variables, este valor es la tasa de inflación para la ciudad de Quetzaltenango para el presente año, eso se hizo para que fuera lo más cercano a la realidad.

Para el cálculo de depreciación se utilizó el método de SMARC (sistema modificado acelerado de recuperación de costos) el cual asume que no hay valor de salvamento para los activos. La depreciación corresponde a cada año y solamente se hizo para los activos que se necesitan comprar, o sea, la infraestructura total. (Ver anexo G, página No. 48).

Debido a que las municipalidades no pagan impuestos, no se tomó en cuenta para hacer el flujo de caja.

Los criterios de evaluación de proyectos TIR (Tasa Interna de Retorno) y VAN (Valor Actual Neto) son positivos, lo que indica que el proyecto es rentable. Para TIR el valor es 36.80 % lo que significa que se va a obtener ese porcentaje de ganancias sobre la inversión para el proyecto, mientras que el valor obtenido del VAN es Q 1,219,240.33, lo que significa que el proyecto dará de más si se deja el dinero a plazo fijo en una cuenta de ahorro para una tasa bancaria de 4.50 %.

El tiempo de recuperación de la inversión es de un año, lo que significa que a partir del segundo año el proyecto solamente generará utilidades.

IX. CONCLUSIONES

1. El sistema de tratamiento de desechos sólidos diseñado comprende la recolección, el transporte, separación en planta clasificadora, manejo adecuado del relleno sanitario y un proceso de compostaje.
2. El orden de separación de residuos sólidos propuesto para la planta clasificadora es metal, aluminio, vidrio, papel y cartón, plásticos, material no reciclable y materia orgánica.
3. Clasificando el 25 % de los residuos sólidos de la ciudad de Quetzaltenango, la vida útil del relleno sanitario es realmente pequeña, siendo de 0.53 años.
4. Debido a las condiciones topográficas del terreno, el relleno sanitario debe hacerse por el método combinado de área y trinchera
5. El relleno sanitario debe tener un sistema debe contar con los siguientes elementos de protección como lo son: la impermeabilización del suelo, el control de lixiviados y gases de vertedero y el buen manejo de operación de celdas. impermeabilización del relleno sanitario se hará con un sistema de multicapas de geomembrana de polietileno de alta densidad (PEAD), grava, geotextil y el suelo del terreno.
6. Las chimeneas deben ser hechas con vigas de madera de pino revestidas con malla galvanizada y rellenas de piedra para que el costo no sea elevado.
7. El proceso de compostaje tardará aproximadamente tres meses, teniendo un buen control de porcentaje de humedad, temperatura y aireación.
8. Los gastos de operación, personal y equipo de seguridad industrial serán Q 200,355.85, se obtendrá un valor de materiales reciclados aproximadamente Q 184,725.00 y con el aumento propuesto a la tarifa de recolección y transporte de basura de Q 4.00 por vivienda, se generará un ingreso de Q 64,369.15 aproximadamente, haciendo así un proyecto auto sostenible.
9. Los criterios de evaluación de proyecto fueron positivos, Tasa Interna de Retorno (TIR) con un 36.80 % y Valor Actual Neto de Q 1,219,240.33 lo que significa que es un proyecto auto sostenible.
10. El tiempo de recuperación de la inversión es de un año.

X. RECOMENDACIONES

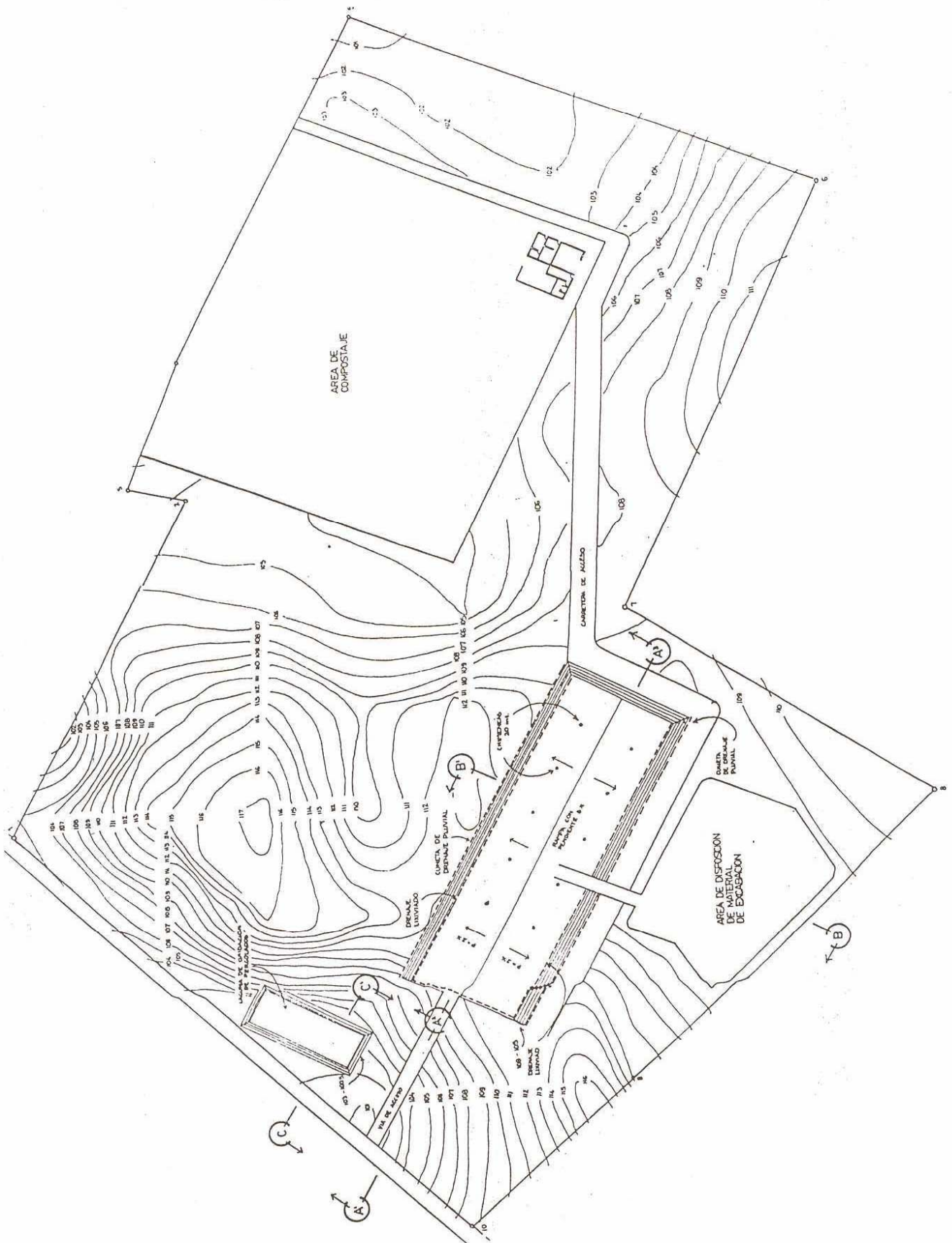
1. Implementar un programa de concientización a los habitantes de la ciudad de Quetzaltenango para hacer una clasificación de residuos sólidos en el lugar de origen.
2. Hacer una estadística de composición real de basura generada en la ciudad de Quetzaltenango para poder hacer un estudio de mercado para la venta de materiales reciclables.
3. Ampliar el área de disposición final para aumentar la vida útil del relleno sanitario o bien, utilizar el actual basurero municipal como un vertedero controlado por medio de un método de área.
4. Invertir en la construcción de otra planta clasificadora de residuos sólidos urbanos, ubicada en el terreno de disposición final, para aumentar la capacidad de clasificación.
5. Aumentar tarifa de transporte de desechos a Q 13.00, ya que actualmente cobran Q 9.00 por vivienda.
6. Invertir en la compra de otro terreno para disposición final con la utilidad obtenida del proyecto.

XI. BIBLIOGRAFÍA

1. Arreola, Saul. 1997. *Estudio y análisis de la instalación de una planta de clasificación de desechos sólidos para la obtención de materiales reciclables y abono orgánico en el municipio de esquipulas, Chiquimula*. Tesis Universidad de San Carlos de Guatemala. 108 págs.
2. Freís, Cristian. 2002. *Los problemas de la basura y una solución a los vertederos a cielo abierto*. Buenos Aires. Fecha de consulta: 19 de Julio 2005. <http://waste.ideal.es/vertedero.htm>.
3. Galdamez, Domingo. 2000. *Residuos sólidos*. Santiago de Chile. Fecha de consulta: 19 de Julio 2005. www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/residuos.html
4. Jaramillo, Jorge. 2002. *Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales*. Antioquia, OPS/CEPIS. 303 págs.
5. Nebel, B. y R. Wright. 1999. *Ciencias ambientales, ecología y desarrollo sostenible*. 6ª Edición. México D.F., Prentice-Hall. 720 págs.
6. *Perfil ambiental de Guatemala*. 2004. Universidad Rafael Landívar e Instituto de incidencia ambiental. Guatemala. 461 págs.
7. Perry, Robert y D. Green. 2001. *Manual del Ingeniero Químico*. 7ª edición. Prologuista, Storch, José. Madrid, McGraw-Hill. 4 vols.
8. Röben, Eva. 2002. *Manual de compostaje para municipios*. DED/Ilustre municipal de Loja. Loja, 68 págs.
9. Ruano, Juan. 1998. *Relleno sanitario y tren de aseo del municipio de San Miguel Petapa*. Tesis Universidad de San Carlos de Guatemala. 89 págs.
10. Seoánez, Mariano, 1999. *Residuos*. Prologuista, Luis Ramos. Madrid, Mundi-prensa. 486 págs.
11. Tchobanoglous, G., H. Theisen y S. Vigil. 1994. *Gestión integral de residuos sólidos*. México D.F., McGraw-Hill. 2 vols.
12. Tyler Miller, George. 2002. *Ciencia ambiental*. Preservemos la Tierra. 5ª edición. México D.F., Thompson. 456 págs.

XII. ANEXOS

A. Plano del terreno para disposición final



B. Mapa de la ciudad de Quetzaltenango



C. Cálculo de muestra para dimensiones de celdas

Cuadro No. 35. Peso específico de residuos urbanos

Tipos de residuos urbanos	Peso específico (kg/m ³)	
	Rango	Típico
En camión compactador	178-451	297
En vertedero		
Medianamente compactados	362-498	451
Bien compactados	590-742	600

Cálculo No. 1. Masa de clasificación según capacidad

$$\begin{aligned} \frac{\text{masa clasificada}}{\text{día}} &= \frac{\text{masa total recogida}}{\text{día}} \times \% \text{ capacidad} \\ &= 150,000 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \times 25 \% \\ &= 37500 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \end{aligned}$$

La masa clasificada según la capacidad de la planta clasificadora es 37500 kg/día

Cálculo No. 2. Masa no reciclable

$$\begin{aligned} \frac{\text{Masa no reciclable}}{\text{día}} &= \frac{\text{masa clasificada}}{\text{día}} \times \% \text{ masa no reciclable} \\ &= 150,000 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \times 12 \% \\ &= 4500 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \end{aligned}$$

La masa de materiales no reciclables, es 4500 kg/día.

Cálculo No. 3. Masa para depositar en el relleno sanitario

$$\frac{\text{Masa para relleno sanitario}}{\text{día}} = (100 - \text{capacidad de planta}) \% \times \frac{\text{masa total recogida}}{\text{día}} + \frac{\text{masa no reciclable}}{\text{día}}$$

$$\begin{aligned} \text{Masa para relleno sanitario} &= (100 - 25) \% \times 37,500 \frac{\text{kg}}{\text{día}} + 4,500 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \\ &= 117,000 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \end{aligned}$$

La masa total que será depositada en el relleno sanitario es 117,000 kg/día

Cálculo No. 4. Volumen de residuos sólidos bien compactados

$$\begin{aligned} \frac{\text{Volumen de R.S.U.}}{\text{día}} &= \frac{\text{masa para relleno sanitario}}{\text{día}} \times \text{densidad bien compactada} \\ &= 117,000 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \times \frac{\text{m}^3}{600 \text{ kg}} \\ &= 195 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \end{aligned}$$

Se depositarán 195 m³/día, si se compacta bien el material en el relleno sanitario.

Cálculo No. 5. Volumen de residuos sólidos urbanos por celda diaria

$$\begin{aligned} \text{Volumen por celda} &= \frac{\text{Volumen de R.S.U.}}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ día}}{2 \text{ celda}} \\ &= 195 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ día}}{2 \text{ celda}} \\ &= 97.5 \frac{\text{m}^3}{\text{celda}} \end{aligned}$$

Cada celda tendrá 97.5 m³ de residuos sólidos urbanos (R.S.U.), se colocarán dos celdas diarias.

Cálculo No. 6. Área cuadrada de celda

$$\begin{aligned} \text{Área cuadrada} &= \sqrt{\frac{\text{Volumen celda}}{\text{Altura celda}}} \\ &= \sqrt{\frac{97.5 \text{ m}^3}{1.5 \text{ m}}} \\ &= 8.1 \text{ m} \end{aligned}$$

El área de la celda será de 8.1 m de largo por 8.1 m de ancho, en ella se colocará los residuos sólidos urbanos (R.S.U.), en total serán dos celdas por día con estas mismas medidas.

Cálculo No. 7. Número de celdas por largo de terreno

$$\begin{aligned} \text{Número celdas} &= \frac{\text{largo terreno}}{\text{largo celda}} \\ &= \frac{150 \text{ m}}{8.1 \text{ m}} \\ &= 18.61 \text{ m} \end{aligned}$$

Se colocarán aproximadamente 18 celdas a lo largo del terreno.

Cálculo No. 8. Número de celdas por ancho de terreno

$$\begin{aligned} \text{Número celdas} &= \frac{\text{ancho terreno}}{\text{ancho celda}} \\ &= \frac{50 \text{ m}}{8.1 \text{ m}} \\ &= 6.20 \end{aligned}$$

Se colocarán aproximadamente seis celdas a lo ancho del terreno.

Cálculo No. 9. Número de celdas totales por nivel

$$\begin{aligned}\frac{\text{Celdas totales}}{\text{nivel}} &= \text{celdas por largo} \times \text{celdas por ancho} \\ &= 18.61 \times 6.20 \\ &= 115.38\end{aligned}$$

Se colocarán 115 celdas aproximadamente por cada nivel del relleno sanitario.

Cálculo No. 10. Número de niveles

$$\begin{aligned}\text{Número niveles} &= \frac{\text{Altura del terreno}}{\text{Altura celda}} \\ &= \frac{5 \text{ m}}{1.5 \text{ m}} \\ &= 3.33\end{aligned}$$

Serán aproximadamente tres niveles en el relleno sanitario.

Cálculo No. 11. Número de celdas totales en el relleno sanitario

$$\begin{aligned}\text{Celdas totales} &= \frac{\text{celdas}}{\text{nivel}} \times \text{número niveles} \\ &= 115.38 \frac{\text{celdas}}{\text{nivel}} \times 3.33 \text{ nivel} \\ &= 384.62 \text{ celdas}\end{aligned}$$

El número de celdas que tendrá el relleno sanitario ya terminado será aproximadamente 384 celdas.

Cálculo No. 12. Tiempo de vida por día

$$\begin{aligned}\text{Tiempo vida} &= \text{Número celdas totales} \times \frac{\text{día}}{\text{celdas}} \\ &= 384.62 \text{ celdas} \times \frac{\text{día}}{2 \text{ celdas}} \\ &= 192.31 \text{ días}\end{aligned}$$

El tiempo de vida útil que tendrá el relleno sanitario será 192 días aproximadamente, o sea, el tiempo en el que tendrá su capacidad máxima de llenado.

Cálculo No. 13. Tiempo de vida por año

$$\begin{aligned}\text{Tiempo vida en años} &= \text{Tiempo vida en días} \times \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}} \\ &= 192.32 \text{ días} \times \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}} \\ &= 0.53 \text{ años}\end{aligned}$$

Otra forma de medir el tiempo de vida, será 0.53 años

D. Vida útil del relleno sanitario con diferentes capacidades en planta clasificadora

Cuadro No. 36. Diferentes porcentajes de capacidad de clasificación

Porcentaje (%)					
Capacidad de clasificación	0.00 %	25.00 %	50.00 %	75.00 %	100.00 %
Material no clasificado	100.00 %	75.00 %	50.00 %	25.00 %	0.00 %

Cuadro No. 37. Masa de residuos sólidos urbanos (R.S.U.) para diferentes capacidades de clasificación

Residuos Sólidos Urbanos (kg/día)					
Capacidad de clasificación	0	37500	75000	112500	150000
Material no reciclable	0	4500	9000	13500	18000
Basura para relleno	150000	117000	84000	51000	18000

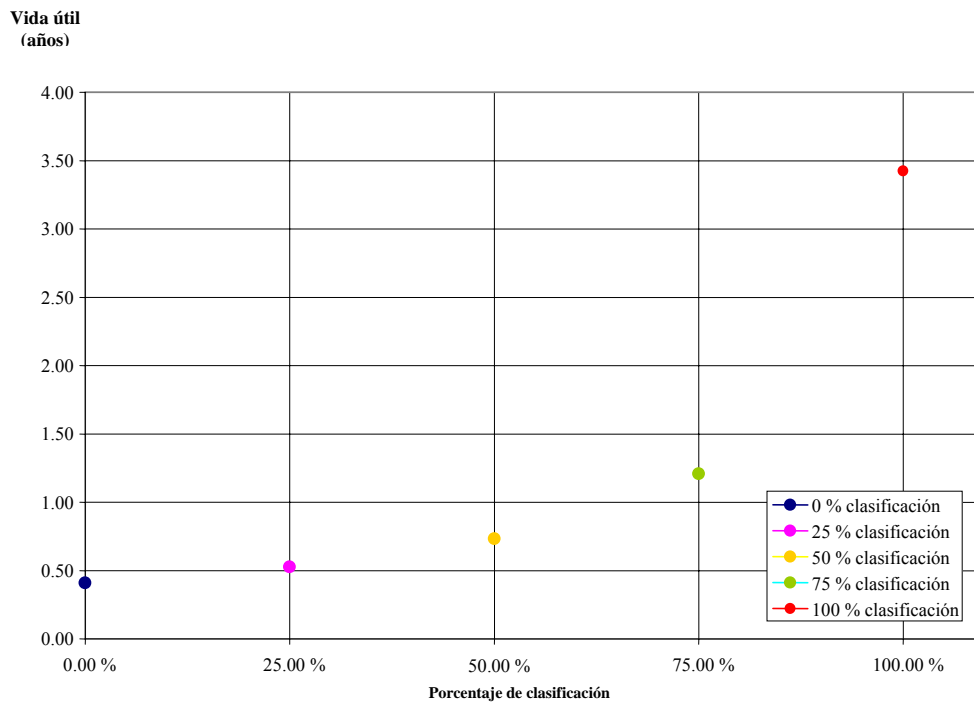
Cuadro No. 38. Características de la celda, según capacidad de clasificación

Celdas bien compactadas					
Capacidad de clasificación	0.00 %	25.00 %	50.00 %	75.00 %	100.00 %
Densidad (kg/m ³)	600	600	600	600	600
Número de celdas	2	2	2	2	2
Volumen por celda (m ³)	125.00	97.50	70.00	42.50	15.00
Altura estándar (m)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Área cuadrada (m ²)	9.1	8.1	6.8	5.3	3.2

Cuadro No. 39. Vida útil del relleno sanitario según capacidad de clasificación

Disposición de celdas en el relleno sanitario					
Número celdas por largo	16.43	18.61	21.96	28.18	47.43
Número celdas por ancho	5.48	6.20	7.32	9.39	15.81
Número celdas por nivel	90.00	115.38	160.71	264.71	750.00
Número celdas totales	300.00	384.62	535.71	882.35	2500.00
Vida útil (días)	150.00	192.31	267.86	441.18	1250.00
Vida útil (años)	0.41	0.53	0.73	1.21	3.42

E. Gráfica de vida útil vs. capacidad de separación en la planta clasificadora



F. Costos de material de construcción del relleno sanitario

Cuadro No. 40. Costos de grava

Grava	Altura (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Total (m ³)	Unidades	Costo unitario	Costo total/m ³
Impermeabilizante	0.30	150.00	50.00	2250.00	1	125.00	281,250.00
Cobertura final	0.20	150.00	50.00	1500.00	1	125.00	187,500.00
Drenaje periférico	1.00	0.60	400.00	240.00	1	125.00	30,000.00
Chimeneas	5.00	0.30	0.30	0.45	10	125.00	562.50
TOTAL							499,312.50

Cuadro No. 41. Costo de malla galvanizada

Malla galvanizada	Altura (m)	No. Lados	Lado (m)	Cantidad de chimeneas	Tamaño de malla	Mallas por chimenea	Costo unitario	Costo total/m
Chimeneas	5.00	4	0.30	10	1.50	3.33	19.50	650.00
TOTAL								650.00

Cuadro No. 42. Costo de geotextil

Geotextil	Largo (m)	Ancho (m)	Total (m ²)	Costo total/m ²
Base relleno	150	50	7500	75,825.00
Cobertura relleno	150	50	7500	75,825.00
Drenaje periférico	400	0.6	240	2,426.40
TOTAL				154,076.40

Cuadro No. 43. Costo de geomembrana

Geomembrana	Largo (m)	Ancho (m)	Total (m ²)	Costo total/m ²
Base relleno	150	50	7500	257,025.00
Cobertura relleno	150	50	7500	257,025.00
TOTAL				514,050.00

Cuadro No. 44. Costo de madera de pino

Madera	Largo (m)	Chimeneas	Cantidad por chimenea	Costo unitario	Costo total
Vigas	5	10	4	13.30	532.00

G. Depreciaciones

Cuadro No. 45. Tasa de depreciaciones según método de SMARC

Año	n = 3	n=5	n=7
1	33.33%	20.00%	14.29%
2	44.45%	32.00%	24.49%
3	14.81%	19.20%	17.49%
4	7.41%	11.52%	12.49%
5		11.52%	8.93%
6		5.76%	8.92%
7			8.93%
8			4.46%

Cuadro No. 46. Depreciación desde año un hasta año cuatro

Artículo	Monto Inicial (Q)	Años de depreciación	Cantidad año 1 (Q)	Cantidad año 2 (Q)	Cantidad año 3 (Q)	Cantidad año 4 (Q)
Escritorio	4,800.00	7	685.92	1,175.52	839.52	599.52
Silla	2,000.00	7	285.80	489.80	349.80	249.80
Computadora	28,000.00	5	5,600.00	8,960.00	5,376.00	3,225.60
Archivo	1,200.00	7	171.48	293.88	209.88	149.88
Fax	2,000.00	5	400.00	640.00	384.00	230.40
Fotocopiadora	6,000.00	5	1,200.00	1,920.00	1,152.00	691.20
Teléfonos	1,000.00	5	200.00	320.00	192.00	115.20
TOTAL			8,543.20	13,799.20	8,503.20	5,261.60

Cuadro No. 47. Depreciación desde año cinco hasta año ocho

Artículo	Monto Inicial (Q)	Años de depreciación	Cantidad año 5 (Q)	Cantidad año 6 (Q)	Cantidad año 7 (Q)	Cantidad año 8 (Q)
Escritorio	4,800.00	7	428.64	428.16	428.64	214.08
Silla	2,000.00	7	178.60	178.40	178.60	89.20
Computadora	28,000.00	5	3,225.60	1,612.80		
Archivo	1,200.00	7	107.16	107.04	107.16	53.52
Fax	2,000.00	5	230.40	115.20		
Fotocopiadora	6,000.00	5	691.20	345.60		
Teléfonos	1,000.00	5	115.20	57.60		
TOTAL			4,976.80	2,844.80	714.40	356.80