



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**ALTERNATIVAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE LOS DESECHOS SÓLIDOS DEL
RELLENO SANITARIO DE TECNOLOGÍA APROPIADA DE AMSA**

Beverly Karold Henry Allen

Asesorado por el Ing. Jaime Domingo Carranza González, MSc.

Guatemala, noviembre de 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ALTERNATIVAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE LOS DESECHOS SÓLIDOS DEL
RELLENO SANITARIO DE TECNOLOGÍA APROPIADA DE AMSA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

BEVERLY KAROLD HENRY ALLEN

ASESORADO POR EL ING. JAIME DOMINGO CARRANZA GONZÁLEZ, MSc

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Telma Maricela Cano Morales
EXAMINADORA	Inga. Casta Petrona Zeceña Zeceña
EXAMINADOR	Ing. Víctor Herbert De León Morales
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ALTERNATIVAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE LOS DESECHOS SÓLIDOS DEL RELLENO SANITARIO DE TECNOLOGÍA APROPIADA DE AMSA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha mayo de 2009.



Beverly Karold Henry Allen

Guatemala, 30 de marzo de 2011

Ingeniero Williams Álvarez
Director Escuela de Ingeniería Química
Universidad de San Carlos de Guatemala
Su Despacho
Presente

Estimado Ing. Williams Álvarez:

Por este medio le saludo y me dirijo a usted para comunicarle que he revisado el Informe Final de Trabajo de Graduación de la estudiante **Beverly Karold Henry Allen** quien se identifica con número de carné **200312695**, y el cual se titula "**Alternativas para el Aprovechamiento de los Desechos Sólidos del Relleno Sanitario con Tecnología Apropiada de AMSA**". Según mi criterio y conocimientos, lo he dado como APROBADO, por mi parte como asesor.

Para los usos correspondientes que a la interesada convengan, firmo la presente.

Atentamente,



Ing. Jaime Domingo Carranza González
Colegiado No. 440



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, 27 de Octubre de 2011
Ref.EIQ.TG.239.2011

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

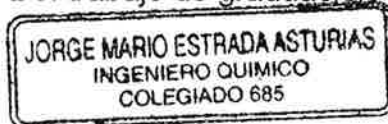
Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el **Acta TG- 105-2010-B-IF** le informo que reunidos los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del informe final del trabajo de graduación, para optar al título de **INGENIERA QUÍMICA** a la estudiante universitaria, **Beverly Karold Henry Allen**, identificada con carné No. **2003-12695**, titulado: **"ALTERNATIVAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE LOS DESECHOS SÓLIDOS DEL RELLENO SANITARIO DE TECNOLOGÍA APROPIADA DE AMSA"**, el cual ha sido asesorado por el **Ingeniero Químico Jaime Domingo Carranza González**

Habiendo encontrado el referido informe final **satisfactorio**, se procede a recomendarle autorice a la estudiante **HENRY ALLEN**, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Ing. Jorge Mario Estrada Asturias:
RESPONSABLE
Tribunal que revisó el informe final
Del trabajo de graduación



C.c.: archivo





El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de la estudiante, **BEVERLY KAROLD HENRY ALLEN** titulado: **"ALTERNATIVAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE LOS DESECHOS SÓLIDOS DEL RELLENO SANITARIO DE TECNOLOGÍA APROPIADA DE AMSA"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía; C.Dr.

DIRECTOR

Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, noviembre de 2011

Cc: Archivo
WGAM/ale



DTG. 533.2011

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **ALTERNATIVAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE LOS DESECHOS SÓLIDOS DEL RELLENO SANITARIO DE TECNOLOGÍA APROPIADA DE AMSA**, presentado por la estudiante universitaria **Beverly Karold Henry Allen**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, 28 de noviembre de 2011.

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por haberme dado todos estos años de vida, que el día de hoy hacen posible este triunfo. Por no haberme soltado nunca de su mano y haber sido esa roca que me ha sostenido y la luz que me ha guiado en mi caminar.

Mis padres

Edgar Rolando Henry Duncan y Nidia Janet Allen Rowe de Henry, por su amor, consejos y comprensión incondicionales en todo momento. Porque han estado allí cuando más los he necesitado, y por no dejarme desmayar cuando las pruebas más difíciles se me han presentado.

Mis hermanas

Borgy y Brittany, porque siempre han estado allí para mí, brindándome su mano amiga y siendo mi compañía; por ser las mejores hermanas que Dios me ha podido dar, siendo cada una a su modo, una parte importante y especial en mi vida; porque hemos compartido momentos de alegría y tristeza juntas, y por esos momentos de complicidad que sólo ustedes han sabido reconocer y valorar.

Mi novio, Alain

Por su amor, apoyo y palabras de aliento. Porque has sabido entrar en mi corazón y darle más sentido a mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

Mi familia

A mis abuelos, abuelas, tíos y tías, primos y sobrinos, por haber sido un rayito de luz en mi vida. Por ocupar un lugar especial en mi corazón y haber estado allí cuando lo he necesitado.

Mis amigas y amigos

Que han sido varios a lo largo de mi vida, porque todos y cada uno han puesto una porción de alegría en su momento y han estado a mi lado para compartir tantas experiencias.

La Universidad de San Carlos de Guatemala

Por haber sido la Casa de Estudios que me abrió las puertas y me acogió durante los años de mi carrera y en la cual obtuve tantos aprendizajes que ayudaron a mi formación integral como persona y profesional.

Mi asesor y mi revisor

Ing. Jaime Carranza e Ing. Jorge Mario Estrada, quienes me brindaron su apoyo y conocimientos en la realización de este trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
LISTA DE SÍMBOLOS	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN	XXI
OBJETIVOS	XXIII
INTRODUCCIÓN	XXV
1. ANTECEDENTES.....	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1. Manejo de residuos sólidos.....	3
2.1.1. Sistemas de manejo de residuos sólidos.....	3
2.1.2. Riesgos asociados al manejo de los residuos sólidos	3
2.2. Disposición final.....	6
2.3. Rellenos sanitarios.....	7
2.3.1. Tipos de rellenos	9
2.3.2. Clasificación de los rellenos sanitarios	11
2.3.3. Criterios ambientales en rellenos sanitarios	13
2.3.4. Zonas de exclusión	15
2.3.5. Actividad biológica dentro del relleno sanitario	15
2.3.6. Lixiviados o líquidos percolados	18
2.3.7. Producción de biogás	19
2.3.7.1. Control del biogás.....	21
2.3.8. Impactos ambientales de los rellenos sanitarios.....	22
2.3.8.1. Medidas de mitigación	23

3. DISEÑO METODOLÓGICO.....	27
3.1. Variables	27
3.2. Delimitación del campo de estudio	27
3.3. Recursos humanos disponibles	28
3.4. Recursos materiales disponibles	28
3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa	29
3.6. Período de observación.....	31
3.7. Recolección y ordenamiento de la información.....	31
3.8. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	34
3.9. Análisis estadístico	37
3.9.1. Teoría de muestreo.....	37
3.9.1.1. Muestreo al azar	37
3.9.2. Análisis de error	38
3.9.2.1. Análisis de varianza	38
3.9.2.2. Prueba de <i>Tukey</i>	38
3.9.2.3. Incertezas de los datos	38
3.9.2.4. Error porcentual	39
4. RESULTADOS	41
4.1. Alternativas para el aprovechamiento de los desechos sólidos	55
5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	57
CONCLUSIONES	65
RECOMENDACIONES	67
BIBLIOGRAFÍA.....	69
APÉNDICES	71
ANEXOS	137

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Relleno sanitario con manejo inadecuado	5
2. Cuadro comparativo de las diferentes alternativas de depósito	7
3. Principales factores involucrados en la selección de sitios para rellenos sanitarios	15
4. Composición de líquidos percolados en un relleno sanitario con desechos domésticos	19
5. Composición del biogás	21
6. Flujograma de trabajo	30
7. Caracterización de camiones	41
8. Clasificación de camiones	42
9. Destino de camiones	43
10. Caracterización de desechos sólidos	45
11. Caracterización de desechos sólidos domiciliarios	46
12. Caracterización de desechos sólidos industriales	47
13. Caracterización de desechos de mercado	48
14. Caracterización de desechos provenientes de Alternativas ecológicas	49
15. Porcentaje de humedad por tipo de basura	51
16. Concentración de materia orgánica biodegradable por tipo de basura	51
17. Concentración de carbono por tipo de basura	52
18. Concentración de nitrógeno por tipo de basura	52
19. Concentración de fósforo por tipo de basura	53
20. Poder calorífico por tipo de basura	53

21. Situación actual del relleno sanitario	54
--	----

TABLAS

I. Variables dependientes, independientes y variables respuesta.....	27
II. Control de camiones	31
III. Peso de camiones (Kg)	32
IV. Peso de materiales (Lb)	33
V. Densidad de la basura	34
VI. Humedad	35
VII. Materia orgánica biodegradable y carbono.....	35
VIII. Nitrógeno total.....	36
IX. Fósforo total	36
X. Poder calorífico	37
XI. Incertezas	38
XII. Porcentajes de error.....	39
XIII. Caracterización de camiones	41
XIV. Clasificación de camiones	42
XV. Destino de camiones.....	43
XVI. Caracterización de desechos sólidos	44
XVII. Caracterización de desechos sólidos domiciliarios.....	45
XVIII. Caracterización de desechos sólidos industriales	46
XIX. Caracterización de desechos sólidos de mercado.....	47
XX. Caracterización de desechos sólidos provenientes de alternativas ecológicas	48
XXI. Densidad de los desechos sólidos	49
XXII. Propiedades fisicoquímicas de los desechos sólidos	50
XXIII. Situación actual del relleno sanitario	54

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
ρ	Densidad
P_T	Fósforo total
N_T	Nitrógeno total
C_p	Poder Calorífico

GLOSARIO

AMSA	Autoridad para el manejo sustentable de la cuenca y del lago de Amatitlán.
AE	Alternativas Ecológicas.
Aerobio	Son microorganismos que no pueden vivir si no están en presencia de oxígeno del aire.
Ambiente	Conjunto de elementos naturales o inducidos por el hombre que interactúan en un espacio y tiempo determinados.
Anaerobio	Son microorganismos capaces de vivir en medios que carecen de oxígeno del aire.
Aprovechamiento	Utilización de los elementos naturales, en forma que resulte eficiente, socialmente útil y procure su preservación y la del hombre.
Basura	Desecho de cualquier naturaleza (desperdicios domésticos, cenizas, papel, cartón, vidrio, latas, envases desechables, restos de flores y plantas, polvo, etc.) y todo aquello que queremos desaparecer de nuestra vista porque ensucia o da la impresión de suciedad o de impurezas.

Biogás	Fluido aeriforme de origen biológico que se produce por la descomposición de materias orgánicas biodegradables. El gas metano es un ejemplo de este biogás, que se produce con la putrefacción de la basura en tiraderos y rellenos sanitarios.
Biodegradable	Susceptible a pudrirse o descomponerse como materia orgánica. En caso de la basura, la que tiene esta característica es la de origen biológico u orgánico, la que en algún momento ha tenido vida.
Caracterización	Método que permite conocer la composición de los residuos sólidos, permitiendo diseñar una mejor gestión integral, logrando a su vez una optimización de los recursos disponibles para tales efectos.
Combustible	Es aquel que arde en presencia de oxígeno por acción de una chispa.
Compostaje	Es un método de disposición de residuos orgánicos biodegradables para la producción de mejores suelos.

Composta o compost

Producto negro ligero, con un 15 por ciento máximo de humedad, sin restos y por lo general de forma granulada y fina. Es también un producto húmico y cálcico, fertilizante y oxigenador de suelos. La composta es comparable al estiércol, sus contenidos mínimos en una dosis de 10 toneladas por hectárea, aportaran 85 kilogramos de nitrógeno, 50 kilogramos de ácido fosfórico y 72 kilogramos de potasa, independientemente de su contenido en materia orgánica biodegradable, magnesio, hierro y otros microelementos cuyas aportaciones a través del abonado por composta son muy significativas.

Consumismo

Deseo desmedido de poseer bienes materiales con la creencia de que estos permitirán identificarse con determinado nivel de vida; pero debido a los rápidos avances tecnológicos y a la agilidad comercial de la sociedad, el valor de dichos bienes es tan fugaz que al poco tiempo surge la ineludible necesidad de cambiarlos por otros nuevos.

Contaminación

La presencia en el ambiente de uno o más contaminantes, o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico.

Contaminante	Es toda materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos y formas que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición y condición natural.
Contaminación del aire	Puede ser de diversos tipos: gaseosa, de polvo, de microbios y de radiaciones ionizantes. El conjunto de éstas es el llamado smog o neblumo.
Contaminación gaseosa	Está constituida principalmente por hidrocarburos no quemados, óxidos de nitrógeno, de azufre, ácidos, peróxidos, anhídrido sulfuroso y cloruro y bromuro de plomo, provenientes de los antidetonantes (como automóviles).
Contaminación por polvo	Es el polvillo que se encuentra en suspensión en el aire, el cual, cuando no es excesivo es inocuo. Este polvo se forma en las ciudades, junto con los contaminantes gaseosos.
Contaminación por microbios	Los microbios se adhieren al polvillo y sólo hay una muy pequeña parte de gérmenes, tanto patógenos como saprofitos, que permanecen por mucho tiempo en el aire, puesto que éste no les puede ofrecer medios de nutrición, y la desecación y las radiaciones solares determinan su destrucción.

Contaminación radiactiva	Ha tenido lugar hasta después de la explosión de bombas atómicas.
Costo directo	La cantidad que hay que pagar para la obtención de un producto.
Densidad	Cantidad en peso de basura (masa) contenida en un determinado volumen.
Desecho	Es cualquier producto inservible o inutilizado que su poseedor destina al abandono o del cual quiere desprenderse.
Desecho sólido	Todo aquel cuerpo firme no útil después de una actividad o proceso humano. También llamado residuo sólido.
Desechos sólidos comunes	Objetos y materiales descartados, provenientes de las actividades humanas durante el proceso de consumo, transformación y producción, que no representan riesgo para la salud humana.
Desechos sólidos especiales	Desechos sólidos que debido a la cantidad, concentración o características físicas o químicas requieren manejo especial.

**Desechos sólidos
peligrosos**

Objetos y materiales descartados, provenientes de un proceso de distribución, transformación, producción o consumo y que por su característica física y química son un riesgo para la salud humana y la preservación del medio ambiente.

**Desechos sólidos
peligrosos hospitalarios**

Objetos y materiales descartados, provenientes de la actividad realizada en el tratamiento preventivo, curativo e investigación de enfermedades y que por su característica física y química son un riesgo para la salud humana y la preservación del medio ambiente.

**Desechos sólidos
peligrosos industriales**

Objetos y materiales descartados, provenientes de la actividad industrial y que por su característica física y química son un riesgo para la salud humana y la preservación del medio ambiente.

Desequilibrio ecológico

La alteración de las relaciones de interdependencia entre los elementos naturales que conforman el ambiente, que afecta negativamente la existencia, transformación y desarrollo del hombre y demás seres vivos.

Desperdicio	Es todo residuo sólido o semisólido de origen animal o vegetal sujeto a la putrefacción, proveniente de la manipulación, preparación y consumo de alimentos.
Despilfarro	Derroche, malgastar, gasto excesivo. En el caso de los residuos sólidos, la práctica de enterrar y olvidar es un despilfarro de materiales que pueden ser reciclados y de energía que puede ser aprovechada.
Ecología	Estudio de los organismos con su ambiente. Ciencia del intercambio de energía y de la interdependencia de la vida de las plantas y animales.
Equilibrio ecológico	La relación de interdependencia entre los elementos que conforman el ambiente que hace posible la existencia, transformación y desarrollo del hombre y demás seres vivos.
Gas metano	Se produce en los pantanos y por la putrefacción de las materias orgánica biodegradables. En el caso de los tiraderos al aire libre, es una de las causas por las que siempre están en combustión. El gas metano es altamente inflamable, da una llama luminosa y muy calorífica, por ello puede usarse como combustible y carburante para motores.

Generación	Cantidad de desechos originados por una determinada fuente en un intervalo de tiempo dado.
Guajero o pepenador	Trabaja generalmente en tiraderos, basureros al aire libre y en rellenos sanitarios. Se ocupa de pepenar o espulgar los residuos sólidos para separar los objetos y materiales reutilizables o reciclables, que posteriormente vende a intermediarios.
Humedad	Cantidad de agua que la basura contiene en el momento de ser extraída.
Humus	Materia orgánica biodegradable presente en el suelo; procede de la descomposición progresiva de los restos vegetales y animales que se depositan en el suelo, y que van siendo mineralizados por la acción de hongos y bacterias.
Impacto ambiental	Modificación del ambiente ocasionada por la acción del hombre o de la naturaleza.
Incineración	Es el proceso de secado y quemado técnico de la basura en el horno incinerador.
Inflamable	Es aquel que puede arder espontáneamente en condiciones normales.

Inorgánico	Son los residuos que permanecen en su estado y forma por largo tiempo.
Lixiviado	Son los líquidos que al fermentarse la basura orgánica biodegradable se depositan en las partes inferiores. Cuando los residuos orgánico biodegradables pierden líquido éste se va escurriendo y expulsa todos los solubles contenidos en ellos.
Materia orgánica biodegradable	Está formada por los componentes de los animales o vegetales; compuestos nitrogenados; lípidos; ácidos orgánico biodegradables; polímeros y compuestos fenólicos y elementos minerales y consiste en un material dinámico (termodinámicamente inestable), que puede llegar a estabilizarse en función de los parámetros ambientales (temperatura, pH, humedad, contenido iónico, poblaciones de micro-organismos, etc.).
Patógeno	Es aquel que por sus características y composición pueden ser reservorio o vehículo de infección.
Pirolisis	Llamada también piroescisión o separación de una sustancia en otras más sencillas, lograda mediante calor.

Planta de selección	Es el área en donde se separan los diferentes materiales que componen la basura, para ser clasificados en orgánico biodegradables, reciclables y rechazos.
Planta de compostaje	Es el sitio en donde se manejan por medios mecánicos, manuales o en celdas los residuos orgánico biodegradables para convertirlos en compost.
Planta recicladora	Es el lugar en donde por medio de un proceso industrial, los materiales de desecho seleccionados, son transformados en nuevos productos.
Poder calorífico	Es la cantidad de energía que la unidad de masa de materia puede desprender al producirse una reacción química de oxidación; expresa la energía máxima que puede liberar la unión química entre un combustible y el comburente.
Radiactivo	Es aquel que emite radiaciones electromagnéticas más grandes que las radiaciones naturales.
Reciclar	Es el proceso mediante el cual los residuos son transformados en materia prima para la fabricación de nuevos productos.

Región ecológica	La unidad del territorio nacional que comparte características ecológicas comunes.
Residuos	Cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización control o tratamiento, cuya calidad no permita usarlo nuevamente en el proceso que lo generó.
Recolección	Recoger la basura pasando por ella de casa en casa, o a sitios preestablecidos, donde se deposita en un camión o vehículo de recolecta para su transporte a los sitios de disposición final.
Relleno sanitario	Procedimiento, para la disposición final de los desechos sólidos en el suelo, consistente en esparcir y compactar los residuos a su tamaño mínimo y cubrirlo con tierra, para que la biodegradación de la basura se lleve a cabo anaeróbicamente; debe prever la extracción del biogás que se produce, y su forma de eliminación o aprovechamiento.
Residuos sólidos urbanos	Se caracterizan por ser materiales que han perdido valor o utilidad para sus propietarios, y se convierten en un estorbo; son clasificados de acuerdo a su origen de generación como

	domiciliarios, comerciales e industriales.
Residuos sólidos orgánico biodegradables domiciliarios	Son los desperdicios de la comida, desechos de la cocina y del jardín, que tienen un origen biológico. Se les llama también biodegradables porque se pueden someter a tratamientos biológicos que generen otros productos como compost, abonos naturales, humus, alimento para animales, etc.
Recurso natural	El elemento natural susceptible de ser aprovechado en beneficio del hombre.
Tiradero	Lugar donde se va a tirar la basura, generalmente en la periferia de la ciudad, en barrancas o depresiones que se rellenan, sin técnica o control alguno.
Tiradero al aire libre	La basura es recolectada y transportada en camiones al tiradero, allí los guajeros separan y clasifican la basura. La materia orgánica biodegradable se pudre y es consumida por insectos y por ratas principalmente. La materia orgánica biodegradable es separada para su recuperación.
Tóxico	Es aquel que por sus características físicas o químicas puede causar daño o la muerte a los seres vivos o provocar contaminación.

Tratamiento

Proceso de transformación física, química o biológica de los desechos sólidos para modificar sus características o aprovechar su potencial, y en el cual se puede generar un nuevo desecho sólido, de características diferentes.

WTE

Waste to energy (de residuos a energía).

RESUMEN

El presente trabajo de graduación tuvo por finalidad la búsqueda de opciones para el aprovechamiento de los desechos sólidos en el relleno sanitario con tecnología apropiada administrado por AMSA, para lograr más tiempo de vida útil del mismo, a través de la realización un estudio de tipo exploratorio.

Para la realización de este proyecto, se investigó en campo la situación actual del relleno sanitario, lo cual se refiere a la cantidad de desechos sólidos que ingresan diariamente al relleno, correspondiente a 882 000 kilogramos, de lo cual se recicla el 6,08 por ciento, y la clasificación de los mismos en función de 3 procedencias de la basura: industrial, domiciliar y de mercado; para los diferentes tipos de desechos (papel, cartón, madera, material orgánico biodegradable, plástico, aluminio, vidrio, etc.). Posteriormente, se tomaron muestras al azar a las cuales se les realizó análisis fisicoquímicos con el fin de evaluar la composición y propiedades de los distintos materiales.

La caracterización de los desechos sólidos mostró un mayor porcentaje en contenido de desechos orgánico biodegradables (30,29 por ciento), seguido de plástico (12,54 por ciento), textil (9,52 por ciento), cartón (8,98 por ciento), madera (5,41 por ciento). Las proporciones de los demás materiales eran menores al 5 por ciento.

A partir de los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, se obtuvo que si es factible el aprovechamiento de los desechos sólidos,

mayormente aplicado a fuentes de energía. De este modo, el porcentaje de desechos reciclados, podría incrementarse en más del 50 por ciento.

OBJETIVOS

General

Proponer alternativas para el aprovechamiento de los desechos sólidos del relleno sanitario de tecnología apropiada de AMSA para la optimización de la vida útil del mismo.

Específicos

1. Clasificar los desechos sólidos existentes en el relleno sanitario de AMSA según los tipos de materiales y cantidades que ingresan.
2. Realizar análisis fisicoquímicos que permitan conocer las composiciones y propiedades de cada tipo de desecho.
3. Evaluar composición y características de los desechos sólidos conforme a criterios de tratamiento.
4. Plantear alternativas que promuevan el aprovechamiento de los desechos sólidos, enfocadas a distintas aplicaciones de tratamiento.

INTRODUCCIÓN

La generación de desechos sólidos es parte indisoluble de las actividades que realiza el hombre. Dentro de las etapas del ciclo de vida de los desechos sólidos, resultan esenciales el tratamiento eficiente y manejo seguro que garanticen un mayor nivel de protección ambiental.

La labor de gestión ambiental en materia desechos sólidos se ha venido desarrollando a lo largo de los años, pero no hay dudas que subsisten numerosos puntos de contacto que determinan la posibilidad de brindar un tratamiento integral, lo cual depende de la cantidad y composición de los residuos así como de los métodos adoptados para su manejo.

Es por ello que se hace necesario realizar ciertas acciones con la finalidad de prevenir y/o minimizar los impactos ambientales que pueden ocasionar los desechos sólidos, contribuyendo a la vez al logro del principal objetivo de la presente investigación, siendo éste el aumento de la vida útil del relleno sanitario con tecnología apropiada de AMSA, a partir del consecuente aprovechamiento de dichos desechos en beneficio del hombre y de la naturaleza, pudiendo así, dar un nuevo valor a los desechos sólidos por medio de su reuso o reciclaje, de acuerdo con sus características físicas o químicas, tales como densidad, composición, humedad y poder calorífico.

Los métodos estándares de análisis de residuos sólidos desarrollados en los países industrializados son bastante complicados y podrían estar fuera de alcance por la carencia de recursos físicos y humanos de las ciudades

medianas y pequeñas como la nuestra, haciendo necesaria la búsqueda de alternativas que hagan factible dicho proceso.

1. ANTECEDENTES

La vida útil del relleno sanitario de tecnología apropiada AMSA está llegando a su fin.

La inadecuada infraestructura para el tratamiento de desechos, y las alternativas respecto a la evaluación y empleo de estos recursos es escasa, no contemplando opciones y tecnologías limpias a futuro que satisfagan una estrategia o necesidad a seguir, como en el caso de la incineración con aprovechamiento energético, en donde residuos municipales no reciclables, lodos de plantas de tratamiento y otros desechos combustibles pueden ser aprovechados mediante dicho tratamiento.

Para ello, se conoce que algunos métodos comúnmente utilizados a nivel mundial son:

- La incineración
- La pirolisis
- El reciclaje
- El compostaje
- La gasificación
- Tecnología residuo cero
- El tratamiento mecánico biológico

Por medio del aprovechamiento de los residuos sólidos, a través de la recuperación selectiva de sustancias en ellos contenidas o la transformación en otras, se vislumbra una solución que puede contribuir a aliviar los problemas

resultantes de la gestión deficiente de los RSU, disminuyendo las dificultades y costos de eliminación, evitando una mayor contaminación del ambiente y ayudando a la conservación de los recursos naturales.

Tratar de devolver, en la medida de lo posible al consumo de la sociedad, las sustancias y energía contenidas en los residuos, y tender a que el hombre tome de la naturaleza solamente las cantidades de materias primas que necesita, es la forma más auténtica de preservar el medio ambiente, del cual los recursos naturales son una parte.

Finalmente, habrá que devolver a la naturaleza los residuos que inevitablemente queden, de la forma más congruente con la ecología.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Manejo de residuos sólidos

Es el conjunto de procedimientos y políticas que conforman el sistema de manejo de los residuos sólidos. La meta es realizar una gestión que sea ambiental y económicamente adecuada.¹

2.1.1. Sistema de manejo de residuos sólidos

Básicamente el sistema de manejo de los residuos se compone de cuatro sub sistemas:

- a. Generación
- b. Transporte
- c. Tratamiento y disposición
- d. Control y supervisión

2.1.2. Riesgo asociado al manejo de los residuos sólidos

Gestión negativa:

- a. Enfermedades provocadas por vectores sanitarios: existen varios vectores sanitarios de gran importancia epidemiológica cuya aparición y permanencia pueden estar relacionados en forma directa con la ejecución inadecuada de alguna de las etapas en el manejo de los residuos sólidos.

¹ Ingeniería industrial y medio ambiente. Residuos sólidos [en línea].
<http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/residuos.html>

- b. 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.
- c. Contaminación atmosférica: el material particulado, el ruido y el olor representan las principales causas de contaminación atmosférica.
- d. 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.
- e. Problemas paisajísticos y riesgo: la acumulación en lugares no aptos de residuos trae consigo un impacto paisajístico negativo, además de tener en algunos casos asociado un importante riesgo ambiental, pudiéndose producir accidentes, tales como explosiones o derrumbes.
- f. Salud mental: existen numerosos estudios que confirman el deterioro anímico y mental de las personas directamente afectadas.²

² Ingeniería industrial y medio ambiente. Residuos sólidos [en línea].
<http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/residuos.html>

Figura 1. **Relleno sanitario con manejo inadecuado**



Fuente:[http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/residuos.html#Rellenos sanitarios](http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/residuos.html#Rellenos%20sanitarios).
19/04/2010.

Gestión positiva:

- a. 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. Por ejemplo puede recuperarse el material orgánico biodegradable a través del compostaje.
- b. 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.

- c. 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 (biogás).³

2.2. Disposición final

Después que el residuo ha sido tratado este se encuentra listo para su disposición. La forma y tipo del residuo determina en gran parte donde la disposición será permitida. Un limitado grupo de residuos puede ser dispuesto por inyección a pozos profundos y en descargas submarinas a océanos, muchos residuos gaseosos y particulados son dispuestos en la atmósfera.

Los residuos sólidos comúnmente son depositados en:

- Basural
- Botaderos
- Botaderos controlados
- Vertederos
- Rellenos sanitarios
- Depósitos de seguridad⁴

³ Ingeniería industrial y medio ambiente. Residuos sólidos [en línea].
<http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/residuos.html>

⁴ Ingeniería industrial y medio ambiente. Residuos sólidos [en línea].
<http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/residuos.html>

Figura 2. **Cuadro comparativo de las diferentes alternativas de depósito**

Clasificación	Control	Diseño	Información del residuo	Limites	Impermeabilización y recubrimiento	Existencia de protección
Basural	No	No	No	No	No	No
Botadero	No	No	No	No	No	No
Botadero controlado	No -- Si	No	No -- Si	Si	No	No
Vertedero	Si	No -- Si	No -- Si	Si	No -- Si	No -- Si
Relleno sanitario	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Deposito de seguridad	Si	Si	Si	Si	Si	Si

Fuente: [http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/residuos.html#Disposición final](http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/residuos.html#Disposición%20final). 19/04/2010.

2.3. Rellenos sanitarios

Un relleno sanitario es una obra de ingeniería destinada a la disposición final de los residuos sólidos domésticos, los cuales se disponen en el suelo, en condiciones controladas que minimizan los efectos adversos sobre el medio ambiente y el riesgo para la salud de la población.

La obra de ingeniería consiste en preparar un terreno, colocar los residuos extenderlos en capas delgadas, compactarlos para reducir su volumen y cubrirlos al final de cada día de trabajo con una capa de tierra de espesor adecuado.

Un relleno sanitario planificado y ambiental de las basuras domésticas ofrece, una vez terminada su vida útil, excelentes perspectivas de una nueva

puesta en valor del sitio gracias a su eventual utilización en usos distintos al relleno sanitario; como ser actividades silvoagropecuarias en el largo plazo.

El relleno sanitario es un sistema de tratamiento y, a la vez disposición final de residuos sólidos en donde se establecen condiciones para que la actividad microbiana sea de tipo anaeróbico (ausencia de oxígeno). Este tipo de método es el más recomendado para realizar la disposición final en países como el nuestro, pues se adapta muy bien a la composición y cantidad de residuos sólidos urbanos producidos; aseveración que, por lo demás, se encuentra muy bien documentada en la bibliografía.

La definición más aceptada de relleno sanitario es la dada por la sociedad de ingenieros civiles (ASCE): relleno sanitario es una técnica para la disposición de residuos sólidos en el suelo sin causar perjuicio al medio ambiente y sin causar molestias o peligro para la salud y seguridad pública, método este, que utiliza principios de ingeniería para confinar la basura en un área lo menor posible, reduciendo su volumen al mínimo practicable, para cubrir los residuos así depositados con una capa de tierra con la frecuencia necesaria, por lo menos al final de cada jornada.⁵

Requerimientos generales de los rellenos sanitarios

- El sitio debe tener espacio necesario para almacenar los residuos generados por el área en el plazo definido por el diseño.
- El sitio es diseñado, localizado y propuesto para ser operado de forma que la salud, las condiciones ambientales y el bienestar sea garantizado.

⁵ DEFFIS, Armando. La basura es la solución. p.101.

- El sitio es localizado de manera de minimizar la incompatibilidad con las características de los alrededores y de minimizar el efecto en los avalúos de estos terrenos.
- El plan de operación del sitio se diseña para minimizar el riesgo de fuego, derrames y otros accidentes operacionales en los alrededores.
- El diseño del plan de acceso al sitio se debe hacer de forma de minimizar el impacto en los flujos.⁶

2.3.1. Tipos de rellenos

El parámetro básico de diseño de un relleno es el volumen. Este depende del área cubierta, la profundidad a la cual los residuos son depositados, y el radio de material de cobertura y residuo. Debido a que la tasa de generación de residuos es usualmente definida en unidades másicas un parámetro adicional que influencia la capacidad del relleno es la densidad *in situ* de la basura y el material de cobertura.

Generalmente todo diseño de relleno incluye algunas obras comunes. Zonas *buffer* y pantallas perimetrales son necesarias para aislar el relleno de los vecinos y el sitio. Son necesarios cercos perimetrales para evitar el acceso no autorizado al sitio, se requiere un cuidadoso mantenimiento del frente de trabajo. Durante tiempos inclementes podría ser necesario contar con tractores para asistir a los camiones. El barro y suciedad que se adhieren al camión por su operación en el sitio debe ser retirado del mismo antes que abandone el recinto del relleno.

⁶ DEFFIS, Armando. La basura es la solución. p. 103.

Método de trinchera o zanja

Este método se utiliza en regiones planas y consiste en excavar periódicamente zanjas de dos a tres metros de profundidad, con el apoyo de una retroexcavadora o tractor oruga. Incluso existen experiencias de excavación de trincheras de hasta 7 metros de profundidad para relleno sanitario. La tierra se extrae se coloca a un lado de la zanja para utilizarla como material de cobertura. Los desechos sólidos se depositan y acomodan dentro de la trinchera para luego compactarlos y cubrirlos con tierra.

La excavación de zanjas exige condiciones favorables tanto en lo que respecta a la profundidad del nivel freático como al tipo de suelo. Los terrenos con nivel freático alto o muy próximo a la superficie no son apropiados por el riesgo de contaminar el acuífero. Los terrenos rocosos tampoco lo son debido a las dificultades de excavación.⁷

Método de área

En áreas relativamente planas, donde no sea posible excavar fosas o trincheras para enterrar las basuras, estas pueden depositarse directamente sobre el suelo original, elevando el nivel algunos metros. En estos casos, el material de cobertura deberá ser importado de otros sitios o, de ser posible, extraído de la capa superficial.

En ambas condiciones, las primeras celdas se construyen estableciendo una pendiente suave para evitar deslizamientos y lograr una mayor estabilidad a medida que se eleva el terreno.

⁷ TCHOBANOGLOUS, George. Gestión integral de residuos sólidos. p. 421.

Se adapta también para rellenar depresiones naturales o canteras abandonadas de algunos metros de profundidad. El material de cobertura se excava en las laderas del terreno, o en su defecto se debe procurar lo más cerca posible para evitar el encarecimiento de los costos de transporte. La operación de descarga y construcción de las celdas debe iniciarse desde el fondo hacia arriba.⁸

2.3.2. Clasificación de rellenos sanitarios

Clasificación según clase de residuo depositado

- Tradicional con residuos sólidos urbanos seleccionados: no acepta ningún tipo de residuo de origen industrial, ni tampoco lodos.
- Tradicional con residuos sólidos urbanos no seleccionados: acepta además de los residuos típicos urbanos, industriales no peligrosos y lodos previamente acondicionados.
- Rellenos para residuos triturados: recibe exclusivamente residuos triturados, aumenta vida útil del relleno y disminuye el material de cobertura.
- Rellenos de seguridad: recibe residuos que por sus características deben ser confinados con estrictas medidas de seguridad.

⁸ TCHOBANOGLOUS, George. Gestión integral de residuos sólidos. p. 422.

- Relleno para residuos específicos: son rellenos que se construyen para recibir residuos específicos (cenizas, escoria, borras, etc.).
- Rellenos para residuos de construcción: son rellenos que se hacen con materiales inertes y que son residuos de la construcción de viviendas u otra.⁹

Clasificación según las características del terreno utilizado

- En áreas planas o llanuras: más que relleno es una depositación en una superficie. Las celdas no tienen una pared o una ladera donde apoyarse, es conveniente construir pendientes adecuadas utilizando pretilas de apoyo para evitar deslizamientos. No es conveniente hacer este tipo de relleno en zonas con alto riesgo de inundación.
- En quebrada: se debe acondicionar el terreno estableciendo niveles aterrizados, de manera de brindar una base adecuada que sustente las celdas. Se deben realizar las obras necesarias para captar las aguas que normalmente escurren por la quebrada y entregarlas a su cauce aguas abajo del relleno.
- En depresiones: se debe cuidar el ingreso de aguas a la depresión, tanto provenientes de la superficie o de las paredes por agua infiltrada. La acumulación normal del relleno. La forma de construir el relleno dependerá del manejo que se dé al biogás o a los líquidos percolados.

⁹ TCHOBANOGLOUS, George. Gestión integral de residuos sólidos. p. 419.

- En laderas de cerros: normalmente se hacen partiendo de la base del cerro y se va ganando altura apoyándose en las laderas del cerro. Es similar al relleno de quebrada. Se deben aterrizar las laderas del cerro aprovechando la tierra sacada para la cobertura y tener cuidado de captar aguas lluvias para que no ingresen al relleno.
- En ciénagas, pantanos o marismas: método muy poco usado por lo difícil de llevar a cabo la operación, sin generar condiciones insalubres. Es necesario aislar un sector, drenar el agua y una vez seco proceder al relleno. Se requiere equipamiento especializado y mano de obra.¹⁰

2.3.3. Criterios ambientales en rellenos sanitarios

Los problemas sanitarios causados por la disposición de los residuos sólidos en el suelo se deben a la reacción de las basuras con el agua y a la producción de gases, riesgo de incendios y explosiones.

Los residuos sólidos están compuestos físicamente por un 40 a 50 por ciento de agua, vegetales, animales, plásticos, desechos combustibles, vidrios, etc. Químicamente están compuestos por sustancias orgánica biodegradables, compuestos minerales y residuos sólidos peligrosos.

Las sustancias líquidas y los sólidos disueltos y suspendidos tienden a percolar por la masa de residuos sólidos y posteriormente en el suelo. Este está constituido por materia sólida, aire y agua. A partir de determinada profundidad se encuentra el nivel freático donde el agua se mueve a baja velocidad de alta a

¹⁰ Ingeniería industrial y medio ambiente. Residuos sólidos [en línea].
<http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/residuos.html>

baja presión horizontalmente y en dirección vertical por efecto de la gravedad, por ascensión capilar entre los granos del suelo.

Las sustancias contaminantes del lixiviado al percolar a través del suelo, adquieren gran agilidad al llegar al nivel freático y puede contaminar el agua de los manantiales, las subterráneas por las fisuras y otras fallas de las rocas y suelos impermeables, a la vez de causar un efecto negativo en la calidad del suelo.

La percolación de los contaminantes depende de la permeabilidad del suelo y está dada por el coeficiente K que en arenas es de 10^{-1} a 10^{-3} centímetros por segundo y en suelos arcillosos es de 10^{-8} centímetros por segundo. El terreno ideal sería con un K de 10^{-7} centímetros por segundo y que tenga un nivel freático de más de 3 metros.

Todo lo anterior lleva a tener en cuenta el microclima dentro del cual se tiene la lluvia que influye en los fenómenos biológicos y químicos, con el transporte de contaminantes, problemas en vías de acceso y del trabajo en si del relleno sanitario, por lo tanto el relleno debe ser drenado superficialmente por la periferia y el fondo del relleno. El viento también causa molestias, llevando los olores y el polvo a las vecindades¹¹

¹¹ Ingeniería industrial y medio ambiente. Residuos sólidos [en línea].
<http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/residuos.html>

Figura 3. **Principales factores involucrados en la selección de sitios para rellenos sanitarios**

Criterios	Detalle
Factibilidad técnica	<ol style="list-style-type: none"> 1. Volumen y morfología sitio adecuada 2. Distancia a centro generador 3. Fuera de zonas de exclusión
Riesgo ambiental	<ol style="list-style-type: none"> 1. Contaminación de aguas subterráneas 2. Calidad del aire 3. Transporte de materiales
Aspectos económicos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Efectos en aspectos de propiedades 2. Costos de construcción y operación 3. Impacto en la industria local 4. Planes de compensación
Aspectos sociales	<ol style="list-style-type: none"> 1. Equidad en la selección del sitio 2. Efecto en la imagen de la comunidad 3. Paisaje y estética 4. Alteración de actuales y futuros usos de suelos
Aspectos políticos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Elecciones locales 2. Intereses de inversión de grupos locales 3. Responsabilidades de manejo del sitio 4. Control local

Fuente: [http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/residuos.html#Rellenos sanitarios](http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/residuos.html#Rellenos%20sanitarios).
19/04/2020.

2.3.4. Zonas de exclusión

Se entenderá zona de exclusión cualquier zona, que por alguna característica, tanto humana, social, ecológica, política o económica no pueda ser considerada para la habilitación de un relleno sanitario. Los casos más típicos son los siguientes:

- Distancias mínimas : la distancia mínima del sitio de disposición a la residencia más cercana, pozo de suministro de agua, fuente de agua

potable, hotel, restaurante, procesador de alimentos, colegios, iglesias o parques públicos debe ser a lo mínimo de 300 metros (o el equivalente indicado por la regulación).

- Distancias a aeropuertos: la distancia entre el aeropuerto comercial y el punto seleccionado es importante si en el relleno sanitario van a recibirse residuos de alimentos (tanto domiciliarios como de algún proceso industrial), pues estos pueden atraer pájaros en un radio de varios kilómetros. Si la operación del residuo es apropiada el problema puede ser aminorado. Se recomiendan distancias de 8 kilómetros., sin embargo, este valor puede ser reducido si es justificado.
- Distancias a cursos de agua superficial: la distancia entre la carga de los residuos y el curso de agua superficial más cercano debe ser a lo mínimo de 100 metros (o el equivalente a la regulación correspondiente). Este parámetro dependerá fundamentalmente de las condiciones hidrogeológicas del sitio.
- Distancias a áreas inestables: el sitio seleccionado debe estar a un mínimo de 100 metros de áreas inestables (por ejemplo área de derrumbes) para asegurar la estabilidad estructural del sitio.
- Distancias a áreas de exclusión: el sitio debe estar localizado fuera de los límites de cualquiera área de exclusión delimitada por la autoridad correspondiente.¹²

¹² TCHOBANOGLIOUS, George. Gestión integral de residuos sólidos. p. 424.

2.3.5. Actividad biológica dentro del relleno sanitario

La actividad biológica dentro de un relleno sanitario se presenta en dos etapas relativamente bien definidas:

- Fase aeróbica: inicialmente, parte del material orgánico biodegradable presente en las basuras es metabolizado aeróbicamente (mientras exista disponible oxígeno libre), produciéndose un fuerte aumento en la temperatura. Los productos que caracterizan esta etapa son el dióxido de carbono, agua, nitritos y nitratos.
- Fase anaeróbica: a medida que el oxígeno disponible se va agotando, los organismos facultativos y anaeróbicos empiezan a predominar y proceden con la descomposición de la materia orgánica biodegradable, pero más lentamente que la primera etapa. Los productos que caracterizan esta etapa son el dióxido de carbono, ácidos orgánico biodegradables, nitrógeno, amoníaco, hidrógeno, metano, compuestos sulfurados (responsables del mal olor) y sulfitos de fierro, manganeso e hidrógeno.

Además, algunos de estos productos producen reacciones químicas dentro y fuera del relleno. En consecuencia, otras reacciones similares se llevan a cabo, como resultado de la interacción de algunos subproductos de descomposición, entre ellos mismos o con las basuras con que entran en contactos. Muchos de estos productos, en la eventualidad de emerger libremente del relleno, como gases o líquidos, podrían provocar serios trastornos ambientales.¹³

¹³ DEFFIS, Armando. La basura es la solución. p. 93.

2.3.6. Lixiviados o líquidos percolados

Los residuos, especialmente lo orgánico biodegradable, al ser compactados por maquinaria pasada liberan agua y líquidos orgánico biodegradables, contenidos en su interior, el que escurre preferencialmente hacia la base de la celda. La basura, que actúa en cierta medida como una esponja, recupera lentamente parte de estos líquidos al cesar la presión de la maquinaria, pero parte de él permanece en la base de la celda. Por otra parte, la descomposición anaeróbica rápidamente comienza actuar en un relleno sanitario, produciendo cambios en la materia orgánica biodegradable, primero de sólidos a líquido y luego de líquido a gas, pero es la fase de licuefacción la que ayuda a incrementar el contenido de líquido en el relleno, y a la vez su potencial contaminante.

En ese momento se puede considerar que las basuras están completamente saturadas y cualquier agua, ya sea subterránea o superficial, que se infiltre en el relleno, lixiviara a través de los desechos arrastrando consigo sólidos en suspensión, y compuestos orgánico biodegradables en solución. Esta mezcla heterogénea, de un elevado potencial contaminante, es lo que se denomina lixiviados o líquidos percolados.¹⁴

¹⁴ Ingeniería industrial y medio ambiente. Residuos sólidos [en línea].
<http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/residuos.html>

Figura 4. **Composición de líquidos percolados de un relleno sanitario con desechos domésticos**

Componentes	Rango (mg/l)
Cloruros	100 - 400
Cobre	0 - 9
Fierro	50 - 600
Flúor	0 - 1
Cadmio	0 - 17
Cromo (VI)	2
Plomo	2
Sodio	200 - 2000
Sulfatos	100 - 1500
Nitratos	5 - 40
Dureza (CaCO ₃)	300 - 10000
DBO	2000 - 30000
DQO	3000 - 45000
pH	5.3 - 8.5

Fuente: <http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/residuos.html#Rellenos> sanitarios. 19/04/2010.

2.3.7. Producción de biogás

Cuando los residuos se descomponen en condiciones anaeróbicas, se generan gases como subproductos naturales de esta descomposición. En un relleno sanitario, la cantidad de gases producida y su composición depende del tipo de residuo orgánico biodegradable, de su estado y de las condiciones del medio que pueden favorecer o desfavorecer el proceso de descomposición.

La descomposición de la materia orgánica biodegradable en los rellenos sanitarios, que se realiza por la actividad microbiana anaeróbica, genera diversos subproductos, entre ellos el biogás. Por lo tanto, condiciones

favorables de medio para la supervivencia de los microorganismos anaeróbicos pueden desarrollarse a temperaturas de entre 10 y 60 grados centígrados, teniendo un óptimo entre 30 y 40 grados centígrados (fase mesofílica) y otro entre 50 y 60 grados centígrados (fase termofílica). El pH entre 6,5 y 8,5 permite un buen desarrollo de los microorganismos teniendo un óptimo entre 7 y 7,2.

Por lo general, los componentes principales del biogás son el metano (CH_4) y el dióxido de carbono (CO_2), en proporciones aproximadamente iguales, constituyendo normalmente más del 97 por ciento del mismo. Ambos gases son incoloros e inodoros, por lo que son otros gases, como el ácido sulfhídrico y el amoníaco los que le otorgan el olor característico al biogás y permiten su detección por medio del olfato.

El gas metano se produce en los rellenos en concentraciones dentro del rango de combustión, lo que confiere al biogás ciertas características de peligrosidad por riesgos de incendio o explosión y por lo mismo, la necesidad de mantener un control sobre él.¹⁵

¹⁵ Ingeniería industrial y medio ambiente. Residuos sólidos [en línea]. <http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/residuos.html>

Figura 5. Componentes del biogás

Elemento gas	Simbología
Metano	CH ₄
Dióxido de carbono	CO ₂
Acido sulfhídrico	H ₂ S
Amoniacó	NH ₃
otros	

Fuente: <http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/residuos.html#Rellenos>
sanitarios. 19/04/2010.

2.3.7.1. Control del biogás

En los rellenos sanitarios de área, se utilizan varios niveles de celdas para dar disposición a los residuos, por lo que es probable que se tenga una producción continua de biogás después de algunos años, cuando se alcancen unos tres niveles de celdas.

Por esta razón resulta conveniente instalar chimeneas de drenaje, distante 20 a 25 metros entre sí, en realidad esta última distancia debe ser obtenida a través de estudios en el terreno, lo que permite determinar lo que se denomina radio de influencia (distancia desde el centro de la chimenea que es influenciada por el drenaje).

Cuando los rellenos sanitarios son construidos en depresiones, ya sean naturales o artificiales resulta conveniente hacer un drenaje perimetral con el fin de evitar la migración lateral, este puede ser continuo o constituido por chimeneas colocadas a menores distancias que las ubicadas al interior del relleno. El gas de los drenes puede ser quemado en el mismo relleno o ser extraído para almacenarlo en gasómetros y luego enviarlo al consumo domiciliario o industrial.¹⁶

2.3.8. Impactos ambientales de los rellenos sanitarios

Los impactos ambientales que sufre el medio ambiente a través del desarrollo de las tres etapas de un relleno sanitario son de diferentes características y tal vez lo más relevante y que trascienden mayormente son aquellas que se producen en la etapa de operación y construcción del relleno. Los efectos de los variados impactos pueden verse incrementado o disminuidos por las condiciones climáticas del lugar y por el tamaño de la obra.

Impactos ambientales en la etapa de habilitación:

- Remoción capa superficial de suelos (alteración vegetación y fauna)
- Movimientos de tierra
- Intercepción y desviación de aguas lluvias superficiales
- Interferencia al tránsito (efectos barreras)
- Alteración permeabilidad propia del terreno
- Alteración paisaje
- Fuente de trabajo (corto plazo)

¹⁶ Ingeniería industrial y medio ambiente. Residuos sólidos [en línea].
<http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/residuos.html>

- Actividades propias de una faena de obras civiles: ruido, polvo, tránsito, movimiento de maquinaria pesada.

Impactos ambientales en la etapa de operación y construcción del relleno:

- Impactos por incremento del movimiento.
- Contaminación atmosférica; olores, ruidos, material particulado, biogás
- Contaminación de aguas; líquidos percolados.
- Contaminación y alteración del suelo; diseminación de papeles, plástico, materias livianas, extracción de tierra para ser utilizada como material de cobertura.
- Impacto paisajístico; cambio en la topografía del terreno, modificación en la actividad normal del área.
- Impacto social; fuente de trabajo, efecto NIMBY (nadie lo quiere), incremento actividad vial.

Impactos ambientales en la etapa de clausura:

- Impacto paisajístico; recuperación vegetación, recuperación fauna.
- Impacto social; integración de áreas a la comunidad, disminuye fuente de trabajo. ¹⁷

2.3.8.1. Medidas de mitigación

Las medidas de mitigación empleadas para reducir los impactos ambientales negativos de un relleno sanitario dependen de una serie de factores, entre los cuales destacan: las características del proyecto, tecnología usada, localización, condiciones de operación (tamaño, clima), etc., no obstante

¹⁷ Ingeniería industrial y medio ambiente. Residuos sólidos [en línea].
<http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/residuos.html>

es posible identificar los impactos más frecuentes generados por este tipo de faena y las medidas que normalmente se emplean para su mitigación.

Olores:

- Utilización de pantallas vegetales, (árboles, arbustos)
- Tratamiento de los líquidos percolados
- Quema del biogás cuando hay metano suficiente

Ruidos:

- Pantallas vegetales
- Utilizar equipos de baja emisión de ruidos

Alteración del suelo:

- Adecuada impermeabilización del relleno sanitario, para evitar filtraciones
- Vegetación para evitar erosión relleno para evitar nivelar zonas con asentamiento diferencial o pendientes fuertes.

Diseminación de materiales:

- Configurar barreras para evitar que el viento incida sobre el frente de trabajo
- Utilizar mallas interceptoras
- Desprender residuos de camiones antes que abandonen el relleno

Material particulado:

- Riego de camino y de la tierra acumulada para el recubrimiento
- Pantallas vegetales en el perímetro del relleno

Control de vectores:

- Mantener aislado sanitariamente el recinto mediante la formación de un cordón sanitario que impida la infestación del relleno por roedores y el paso de especies animales desde y hacia el recinto.
- Realizar fumigaciones y desratizaciones como mínimo, cada 6 meses. Los elementos químicos que se empleen en esta actividad, deben estar acordes con la legislación.

Incremento movimiento vehicular:

- Tratar de que la recolección se haga en horas diferidas
- En caso de vehículos de estaciones de transferencia tratar que estos lleguen en forma secuencial.

Líquidos percolados:

- Almacenamiento en depósitos cerrados
- Recirculación
- Tratamiento físico químico y/o biológico

Biogás:

- Extracción con fines de utilización
- Quema controlada.¹⁸

¹⁸ Ingeniería industrial y medio ambiente. Residuos sólidos [en línea].
<http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/residuos.html>

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Tabla I. Variables dependientes e independientes

Variables dependientes	Variables independientes	Indicador
Densidad (Kg/m ³)	Peso (Kg) Volumen (m ³)	<ul style="list-style-type: none">• Clasificación de camiones• Clasificación de basura según tipo• Pesaje desechos• Selección de muestras• Análisis fisicoquímicos
Humedad (%)	Peso inicial (g)	
Materia orgánica biodegradable y carbono (%)	Peso (g)	
Nitrógeno	Peso (g)	
Fósforo (mg/Kg)	Peso (g)	
Poder calorífico (J/g)	Peso (g)	

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación de campo de estudio

- Problemática de los desechos sólidos para la salud
- Problemática de los desechos sólidos para el medio ambiente
- Problemática de los desechos sólidos para la economía
- Manejo de desechos sólidos

- Clasificación de desechos sólidos
 - Generación
 - Almacenamiento
 - Recolección
 - Tratamiento
 - Disposición final
- Caracterización de desechos sólidos (por clasificación manual)
- Composición fisicoquímica de desechos sólidos

3.3. Recursos humanos disponibles

- Asesor de tesis: Ing. Jaime Domingo Carranza González
- Laboratoristas AMSA: Inga. Pamela Camarero, Licda. Ana Beatriz Suárez
- Estudiante tesista: Beverly Karold Henry Allen
- Clasificadores AMSA

3.4. Recursos materiales disponibles

- Balanzas
- Calorímetro
- Horno
- Desecadora
- Mufla
- Campana
- Compactador de muestras
- Energía eléctrica
- Computadora

- Cristalería de laboratorio
- Bata
- Bolsas plásticas para toma de muestras
- Tijeras
- Papel Kraft
- Guantes
- Piceta
- Marcadores
- Bandejas
- Reactivos para análisis de composición de desechos sólidos

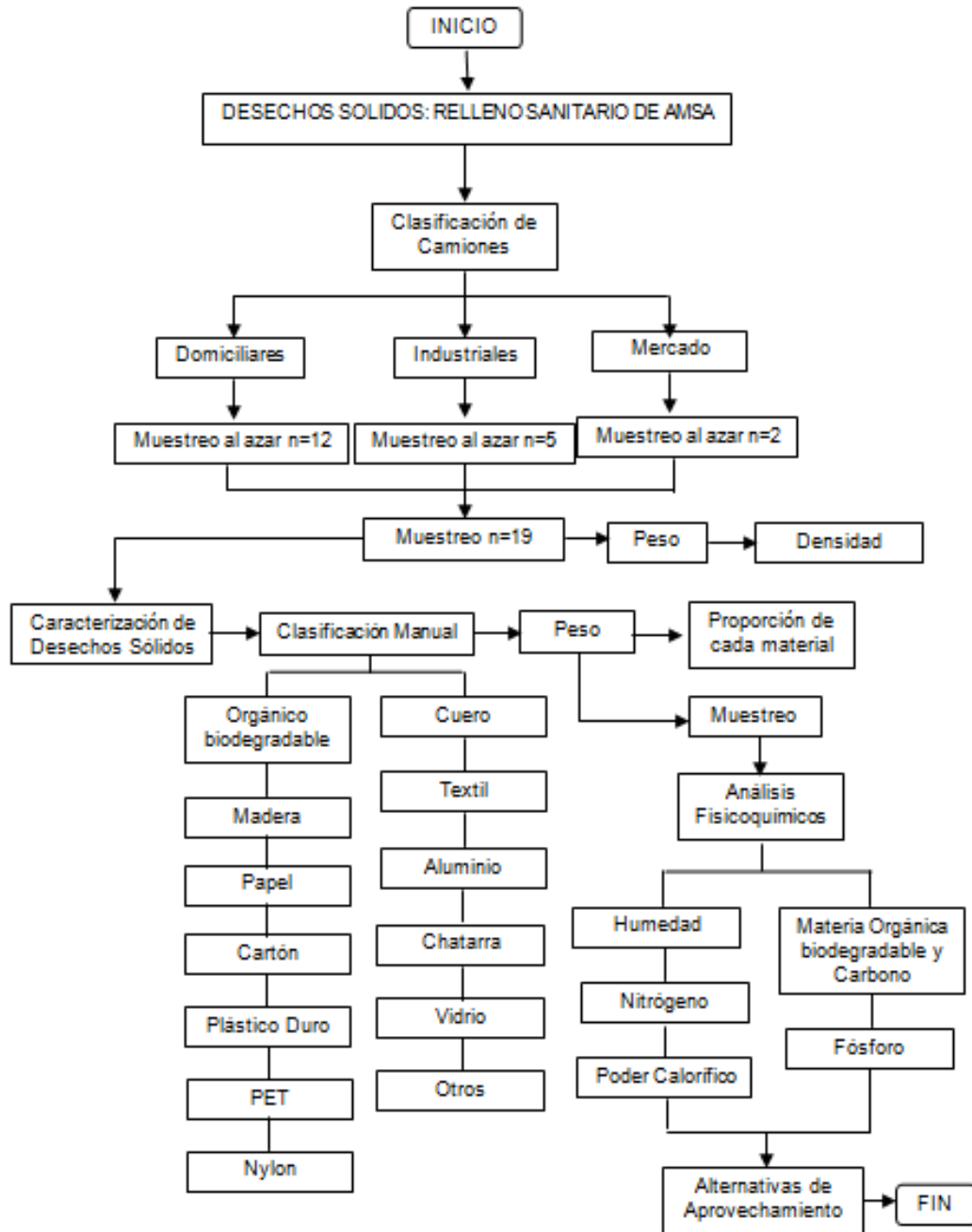
3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

Se realizó un control de los camiones que ingresaban al Relleno Sanitario según el tipo de basura, procedencia municipal, tipo y peso del vehículo y su destino (AMSA o Alternativas Ecológicas).

Dichos camiones fueron pesados en la báscula de la institución para conocer la cantidad de basura que estos traían. De ellos, se muestrearon al azar 19 camiones: 12 domiciliarios, 5 industriales y 2 de mercado, ya que estos representaban la proporción de cada tipo existente.

Luego, se realizó la clasificación y pesaje de la basura según el tipo, así como el muestreo respectivo para efectuar los análisis fisicoquímicos.

Figura 6. **Flujograma de trabajo**



Fuente: elaboración propia.

3.6. Período de observación

La recolección de datos y realización del presente estudio se llevo a cabo en el Relleno Sanitario de Tecnología Apropiaada de AMSA del 06 de septiembre al 05 de noviembre del 2010.

3.7. Recolección y ordenamiento de la información

- Caracterización de desechos
Gestión realizada conforme a clasificación en tres diferentes grupos de basura: domiciliar, industrial y de mercado.

Tabla II. **Control de camiones**

FECHA: 04/10/2010 – 08/10/2010

No.	HORA INGRESO	VEHÍCULO			PROCEDENCIA: NOMBRE EMPRESA / TIPO BASURA	PROCEDENCIA MUNICIPAL	ENTRA A	
		PLACA	PILOTO	PICKUP CAMDM CAMDR			AE	AMSA
1	09:27	105BFS	José R.	DR	Domiciliar	Villa Nueva		X
2	09:38	093BGF	Luis H.	DM	Mercado	Villa Nueva		X
3	10:15	830BHP	Adam V.	DR	Industrial	Villa Nueva		X
4	11:35	900BLF	Pedro S.	DM	Domiciliar	Amatitlán	X	
5	12:50	256BKK	Samuel O.	DM	Domiciliar	Palín		X

Fuente: relleno Sanitario de Tecnología Apropiaada de AMSA.

Nota: se hizo el control de todos los camiones que llegan a AMSA (150 en total) y de ellos se muestrearon n = 19 camiones: 12 domiciliarios, 5 industriales y 2 de mercado para la caracterización.

Tabla III. **Peso de camiones (kg)**

Fecha: 04/10/2010 – 08/10/2010

No.	Fecha	Hora	Placa	Tipo	Peso Bruto	Tara	Peso Neto
1	11/10/2010	09:27	105BFS	Domiciliar	11 820	7 120	4 700
2	11/10/2010	09:38	093BGF	Mercado	7 940	3 985	3 955
3	11/10/2010	10:15	830BHP	Industrial	11 120	7 090	4 030
4	11/10/2010	11:35	900BLF	Domiciliar	15 980	10 400	5 580
5	11/10/2010	12:50	256BKK	Domiciliar	16 540	9 165	7 375

Fuente: relleno Sanitario de Tecnología Apropriada de AMSA.

Nota: se caracterizaron de 2 a 4 camiones/día para completar los 19, obteniendo el peso de los mismos en la báscula y tomando en cuenta que estos tienen una capacidad entre 38 755 metros cúbicos– 58 680 metros cúbicos (según sea el caso), se obtuvo la densidad de la basura.

Tabla IV. **Peso de materiales (Kg)**

Fecha: 11/10/2010 – 22/10/2010

Ca mión	Materia Orgánica	Madera	Papel	Cartón	PET	Plástico Duro	Nylon	Cuero	Textil	Alumini o	Chatarra	Vidrio	Otros
1	358,00	0,00	1,43	12,87	0,00	0,00	0,00	0,00	33,40	0,00	0,00	0,00	71,40
2	3 109,09	0,00	25,23	227,04	23,87	3,18	4,77	0,00	0,00	0,00	0,00	13,64	125,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	1 429,55	0,00	2	468,34	0,00	0,00	0,00	0,00	9,09
4	1 681,82	159,09	150,5	451,70	332,38	44,32	66,48	0,00	431,82	409,09	386,36	250,0	1 152,28
5	3 350,00	43,00	278,7	836,25	1 237,50	165,00	247,50	0,00	112,27	0,00	40,91	50,00	735,91

Fuente: relleno Sanitario de Tecnología Apropriada de AMSA

Nota: el control de peso se realizó en bolsas y/o costales de 25 libras, 50 libras y 100 libras. Se tomó una muestra de aproximadamente 1 Kilogramo de los materiales a los que se les realizó análisis fisicoquímicos para determinar sus propiedades.

3.8. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

- Datos originales

Tabla V. **Densidad de la basura**

Fecha: 11/10/2010 – 22/10/2010

TIPO DE BASURA	DENSIDAD (Kg/m3)								
	DOMICILIAR	177,05	182,95	241,8	180,21	173,68	177,5	171,3	183,28
INDUSTRIAL	177,05	170,65	188,96	172,61	270,49				
MERCADO	189,29	176,35							

Fuente: relleno Sanitario de Tecnología Apropriada de AMSA.

Nota: según el número de camiones muestreados de cada tipo de basura, fue el número de datos de densidad obtenidos.

Tabla VI. **Humedad**

Fecha: 25/10/2010

No.	Muestra	Tipo de Basura	Tara(g)	Peso inicial (g)	Peso final (g)		
1	S-10 44	Cartón	69,78	83,98	81,99	70,76	71,94
2	S-10 45	Nylon	37,37	55,06	47,16	45,87	45,52
3	S-10 46	Papel	33,60	52,47	49,04	40,32	42,47
4	S-10 47	Textil	61,20	106,36	87,07	77,58	69,95
5	S-10 48	Madera	44,01	73,85	65,13	68,48	67,40

Fuente: división de Control, Calidad Ambiental y Manejo de Lagos AMSA.

Nota: se evaluaron 8 muestras de diferentes tipos de basura y 3 corridas para cada una, en este y los posteriores análisis.

Tabla VII. **Materia orgánica biodegradable y carbono**

Fecha: 27/10/2010

No.	Muestra	Tipo de Basura	Peso (g)	Volumen gastado (ml)
1	S-10 44	Cartón	0,0964	2,50
2	S-10 45	Nylon	0,1029	24,80
3	S-10 46	Papel	0,1032	38,20
4	S-10 47	Textil	0,1034	4,60
5	S-10 48	Madera	0,1025	7,10

Fuente: división de Control, Calidad Ambiental y Manejo de Lagos AMSA.

Tabla VIII. **Nitrógeno total**

Fecha: 29/10/2010

No.	Muestra	Tipo de Basura	Tara (g)	Peso (g)	NT (mg/Kg)
1	S-10 44	Cartón	22,24	0,1070	785,04
2	S-10 45	Nylon	21,33	0,1092	1025,64
3	S-10 46	Papel	21,30	0,1094	1535,64
4	S-10 47	Textil	20,76	0,1107	3288,16
5	S-10 48	Madera	23,48	0,1021	1023,56

Fuente: división de Control, Calidad Ambiental y Manejo de Lagos AMSA.

Tabla IX. **Fósforo total**

Fecha: 02/11/2010

No.	Muestra	Tipo de Basura	Tara (g)	Peso (g)	Volumen (ml)	PT (mg)
1	S-10 44	Cartón	35,52	10,158	0,6	80,70
2	S-10 45	Nylon	32,95	10,413	0,7	7,83
3	S-10 46	Papel	38,96	10,230	0,9	22,12
4	S-10 47	Textil	46,43	10,192	1,6	145,86
5	S-10 48	Madera	31,64	10,491	1,2	0,53

Fuente: división de Control, Calidad Ambiental y Manejo de Lagos AMSA.

Tabla X. **Poder calorífico**

Fecha: 04/11/2010

No.	Muestra	Tipo de Basura	Tara (g)	Peso (g)	H (J/g)
1	S-10 44	Cartón	30,46	15,098	12,206
2	S-10 45	Nylon	29,37	11,493	45,942
3	S-10 46	Papel	29,38	11,026	8,399
4	S-10 47	Textil	29,43	12,402	14,344
5	S-10 48	Madera	32,36	11,583	19,245

Fuente: división de Control, Calidad Ambiental y Manejo de Lagos AMSA.

3.9. Análisis estadístico

3.9.1. Teoría de muestreo

3.9.1.1. Muestreo al azar

Se tuvieron N=150 camiones. Se analizó una muestra n=19 camiones, tomando en cuenta la selección de camiones domiciliarios, industriales y de mercado. En base a la proporción que se tiene de estos, se muestrearon 12 camiones domiciliarios, 5 industriales y 2 de mercado.

3.9.2. Análisis de error

3.9.2.1. Análisis de varianza

No se realizó análisis de varianza debido a que el estudio es de tipo exploratorio, es decir, se pretende diagnosticar el estado actual del relleno sanitario para proponer alternativas que favorezcan la optimización de su vida útil. Por lo mismo, no se tiene una hipótesis que comprobar.

3.9.2.2. Prueba de *Tukey*

No es aplicable ya que deriva del análisis de varianza.

3.9.2.3. Incertezas de los datos

Se deben a incertezas de los instrumentos de medición utilizados y del observador al realizar las mediciones.

Tabla XI. **Incertezas**

Instrumento	Incerteza
Balanza	+/- 0,0005 g
Pipeta 10 ml	+/- 0,05 ml
Bureta 50 ml	+/- 0,05 ml

Fuente: datos calculados.

3.9.2.4. Error porcentual

$$\% \text{ error} = \frac{\text{dato teórico} - \text{dato real}}{\text{dato teórico}} * 100 \quad (1)$$

Tabla XII. **Porcentajes de error**

Material	Poder calorífico (teórico, KJ/Kg)	Poder calorífico (real, KJ/Kg)	Error (%)
Cartón	16,700	12,206	26,91
Nylon	42,000	45,942	9,38
Papel	16,700	8,399	49,71
Textil	21,000	14,344	31,70
Madera	16,700	19,245	15,24
PET	42,000	40,098	4,53

Fuente: datos calculados.

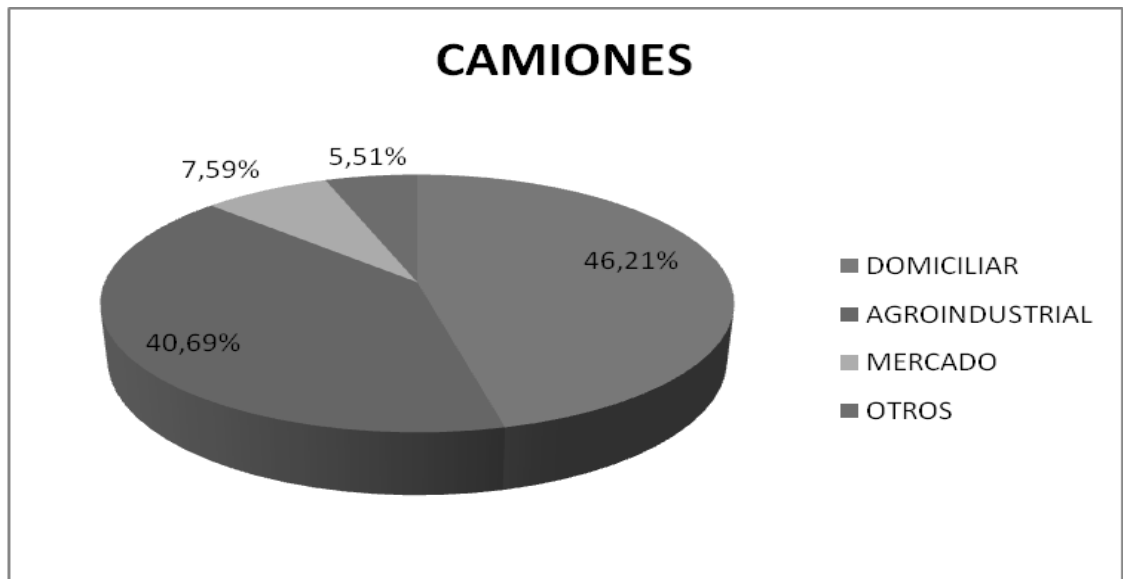
4. RESULTADOS

Tabla XIII. **Caracterización de camiones**

FECHA	TIPO	PORCENTAJE (%)
04/10/2010 – 08/10/2010	Domiciliares	46,21
	De mercado	7,59
	Agroindustriales	41,00
	Otros	5,51

Fuente: datos calculados.

Figura 7. **Caracterización de camiones**



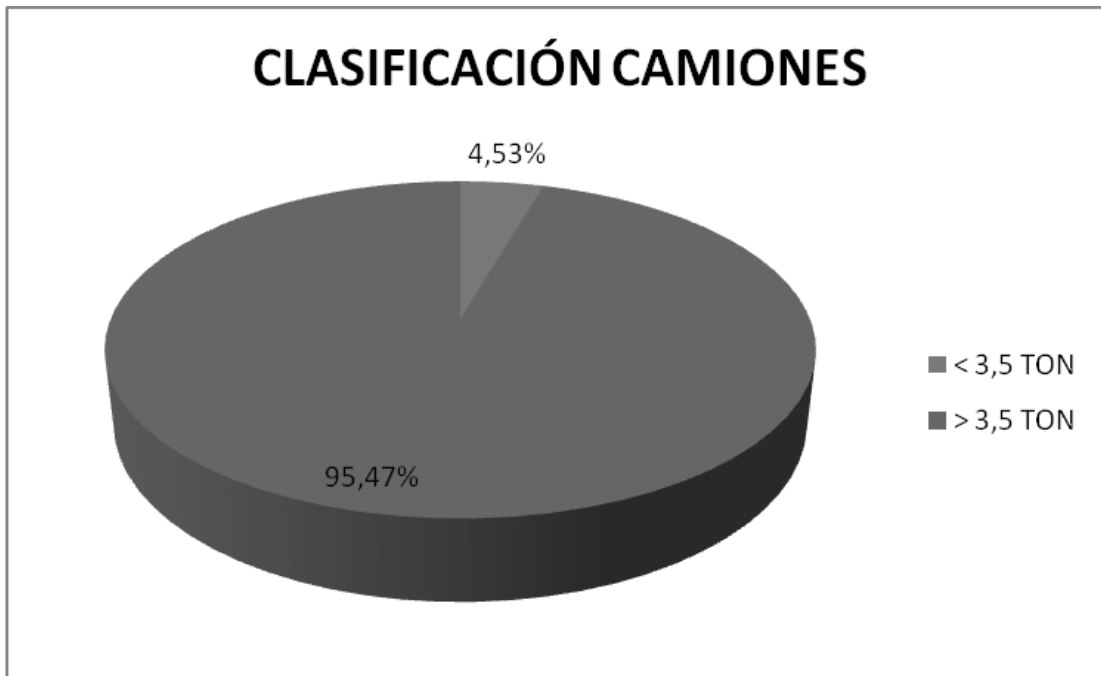
Fuente: datos calculados.

Tabla XIV. **Clasificación de camiones**

FECHA	CAPACIDAD	PORCENTAJE (%)
04/10/ 2010 – 08/10/2010	< 3,5 Ton	4,53
	> 3,5 Ton	95,47

Fuente: datos calculados.

Figura 8. **Clasificación de camiones**



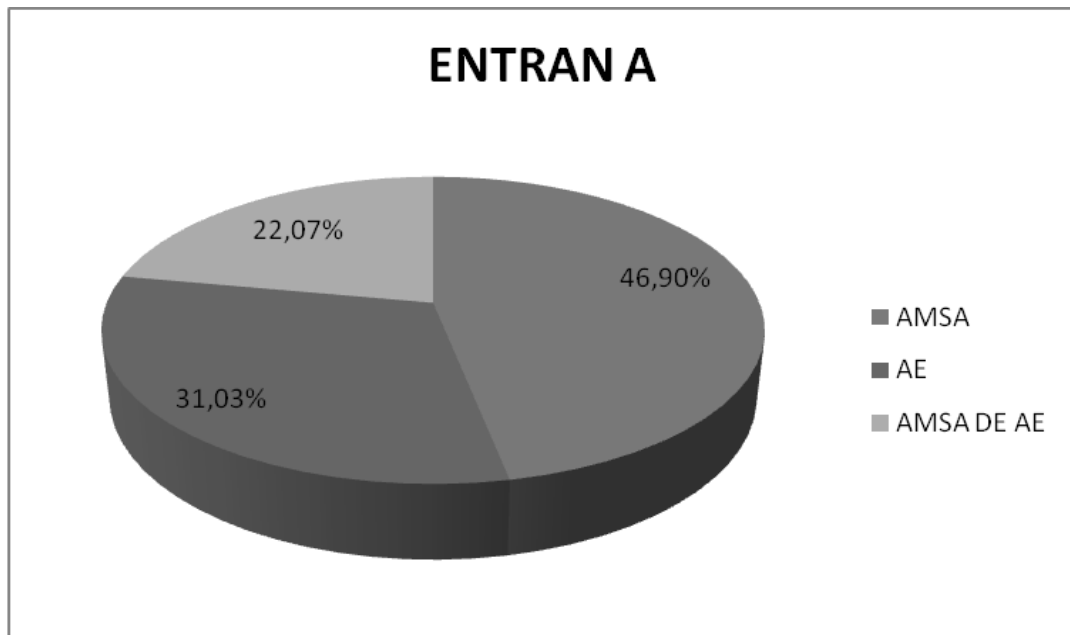
Fuente: datos calculados.

Tabla XV. **Destino de camiones**

FECHA	DESTINO	PORCENTAJE (%)	PESO PROMEDIO (Kg)
04/10/2010 – 08/10/2010	Disposición final	46,90	5400
	Planta de clasificación	31,03	5400
	Residuos de la planta de clasificación	22,07	16500

Fuente: datos calculados.

Figura 9. **Destino de camiones**



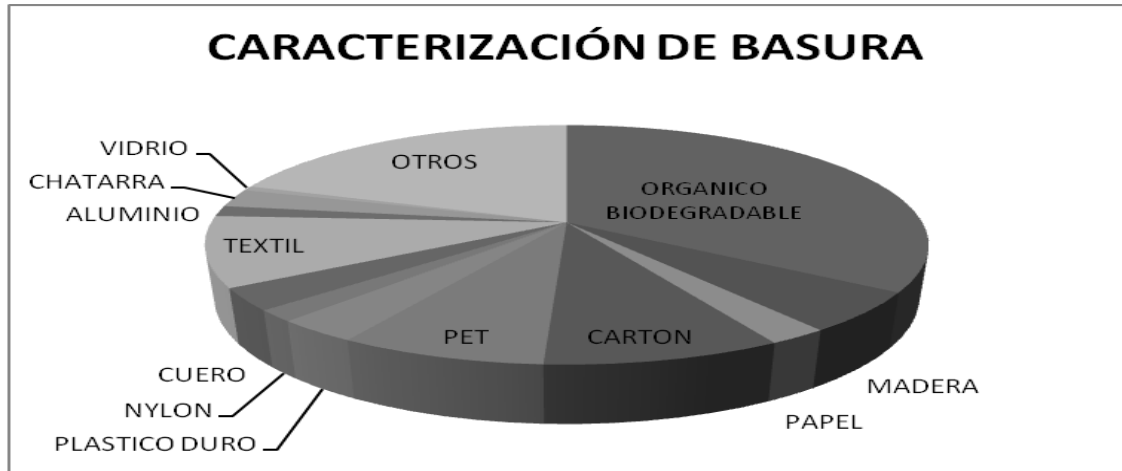
Fuente: datos calculados.

Tabla XVI. **Caracterización de desechos sólidos**

FECHA	TIPO DE MATERIAL	PORCENTAJE(%)
11/10/2010 – 22/10/2010	Orgánico biodegradable	34,20
	Madera	5,41
	Papel	2,26
	Cartón	8,98
	PET	7,80
	Plástico duro	3,18
	Nylon	1,56
	Cuero	2,99
	Textil	9,52
	Aluminio	1,41
	Chatarra	2,45
	Vidrio	0,59
	Otros	19,65

Fuente: datos calculados.

Figura 10. **Caracterización de desechos sólidos**



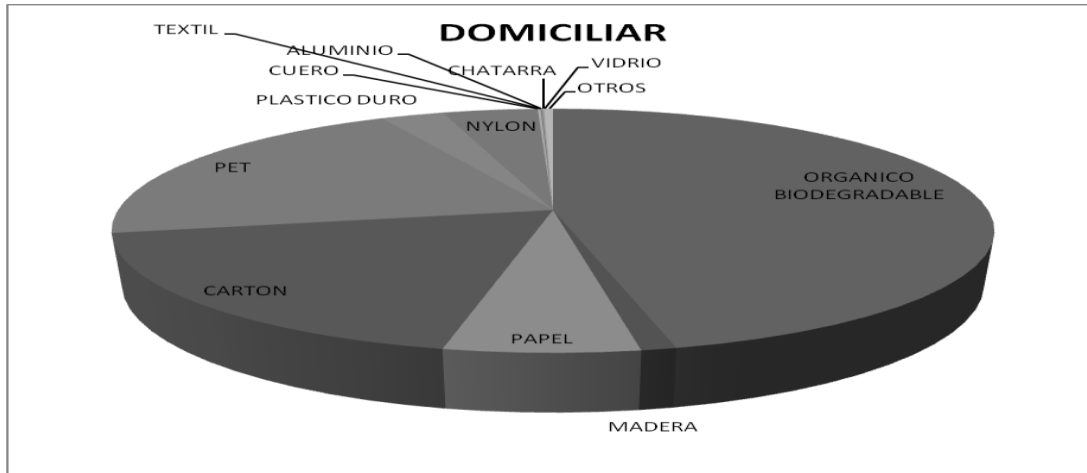
Fuente: datos calculados.

Tabla XVII. **Caracterización de desechos sólidos domiciliarios**

FECHA	TIPO DE MATERIAL	PORCENTAJE(%)
11/10/2010 – 22/10/2010	Orgánico biodegradable	46,193
	Madera	1,104
	Papel	6,100
	Cartón	18,600
	PET	20,507
	Plástico duro	2,734
	Nylon	4,101
	Cuero	0,000
	Textil	0,132
	Aluminio	0,042
	Chatarra	0,089
	Vidrio	0,018
	Otros	0,380

Fuente: datos calculados.

Figura 11. **Caracterización de desechos sólidos domiciliarios**



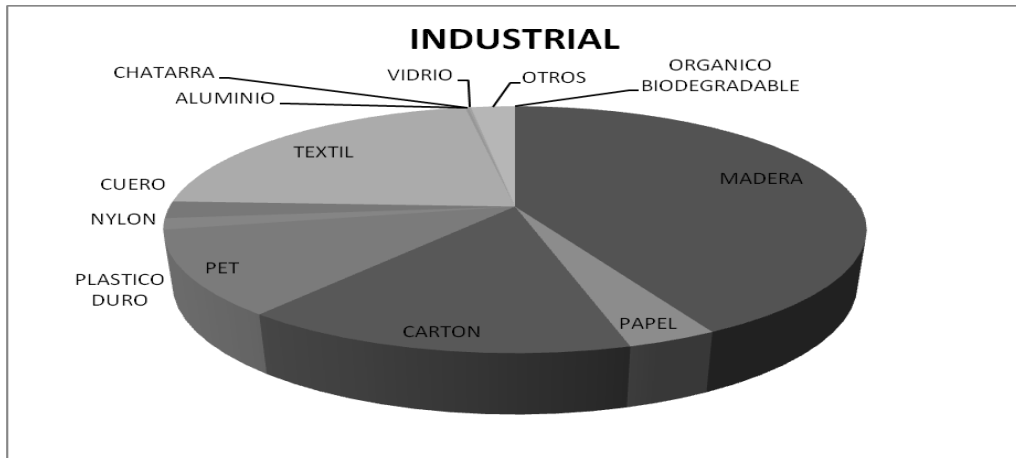
Fuente: datos calculados.

Tabla XVIII. **Caracterización de desechos sólidos industriales**

FECHA	TIPO DE MATERIAL	PORCENTAJE(%)
11/10/2010 – 22/10/2010	Orgánico biodegradable	0,000
	Madera	42,083
	Papel	3,505
	Cartón	15,315
	PET	11,094
	Plástico duro	1,479
	Nylon	2,219
	Cuero	0,000
	Textil	21,571
	Aluminio	0,000
	Chatarra	0,168
	Vidrio	0,140
	Otros	2,426

Fuente: datos calculados.

Figura 12. **Caracterización de desechos sólidos industriales**



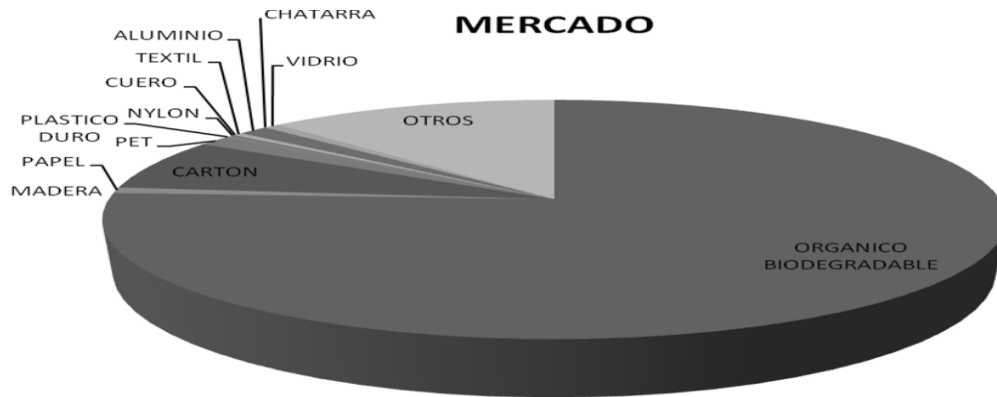
Fuente: datos calculados.

Tabla XIX. **Caracterización de desechos sólidos de mercado**

FECHA	TIPO DE MATERIAL	PORCENTAJE(%)
11/10/2010 – 22/10/2010	Orgánico biodegradable	75,871
	Madera	0,000
	Papel	0,773
	Cartón	6,956
	PET	1,373
	Plástico duro	0,183
	Nylon	0,275
	Cuero	0,000
	Textil	0,390
	Aluminio	1,274
	Chatarra	0,000
	Vidrio	0,664
	Otros	12,242

Fuente: datos calculados.

Figura 13. **Caracterización de desechos sólidos de mercado**



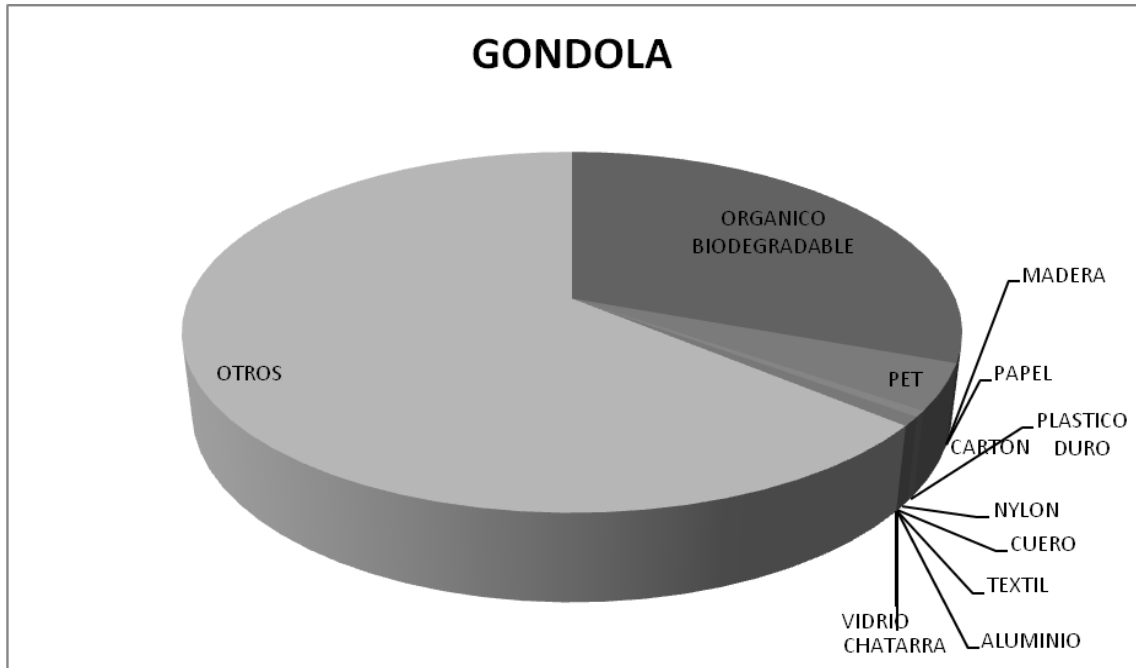
Fuente: datos calculados.

Tabla XX. **Caracterización de desechos provenientes de alternativas ecológicas**

FECHA	TIPO DE MATERIAL	PORCENTAJE(%)
11/10/2010 – 22/10/2010	Orgánico biodegradable	30,645
	Madera	0,000
	Papel	0,000
	Cartón	0,000
	PET	4,113
	Plástico duro	0,548
	Nylon	0,823
	Cuero	0,000
	Textil	0,000
	Aluminio	0,000
	Chatarra	0,000
	Vidrio	0,000
	Otros	63,871

Fuente: datos calculados.

Figura 14. **Caracterización de desechos sólidos provenientes de alternativas ecológicas**



Fuente: datos calculados.

Tabla XXI. **Densidad de los desechos sólidos**

FECHA	TIPO DE BASURA	DENSIDAD (Kg/m3)
11/10/2010 – 22/10/2010	DOMICILIAR	183,69
	INDUSTRIAL	195,95
	MERCADO	182,82

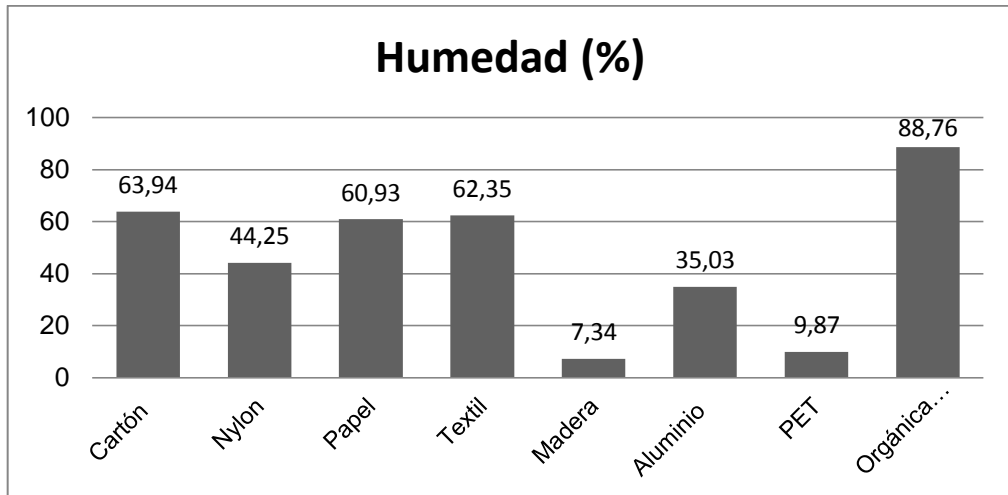
Fuente: datos calculados.

Tabla XXII. **Propiedades fisicoquímicas de los desechos sólidos**

Fecha	Hora	No.	Muestra	Tipo de Basura	Humedad (%)	Materia Orgánica Biodegradable (%)	Carbono (%)	Nitrógeno (mg/Kg)	Fósforo (mg/Kg)	Poder Calorífico (J/g)
25/10/2010 al 05/11/2010	14:07	1	S10-44	Cartón	63,94	53,35	30,94	785,04	80,70	12 206,00
	14:15	2	S10-45	Nylon	44,25	0,23	0,13	1 025,64	7,83	45 942,00
	13:15	3	S10-46	Papel	60,93	57,86	85,76	1 535,64	22,12	8 399,00
	13:54	4	S10-47	Textil	62,35	69,56	80,94	3 288,16	145,86	14 344,00
	13:30	5	S10-48	Madera	7,34	0,48	0,27	1 023,56	0,53	19 245,00
	13:57	6	S10-49	Aluminio	35,03	0,66	0,38	1 026,58	-----	-----
	13:48	7	S10-50	PET	9,87	59,10	34,27	262,66	1,301,07	40 098,00
	14:30	8	S10-51	Orgánica biodegradable	88,76	97,03	98,34	11 712,06	3,226,14	-141,00

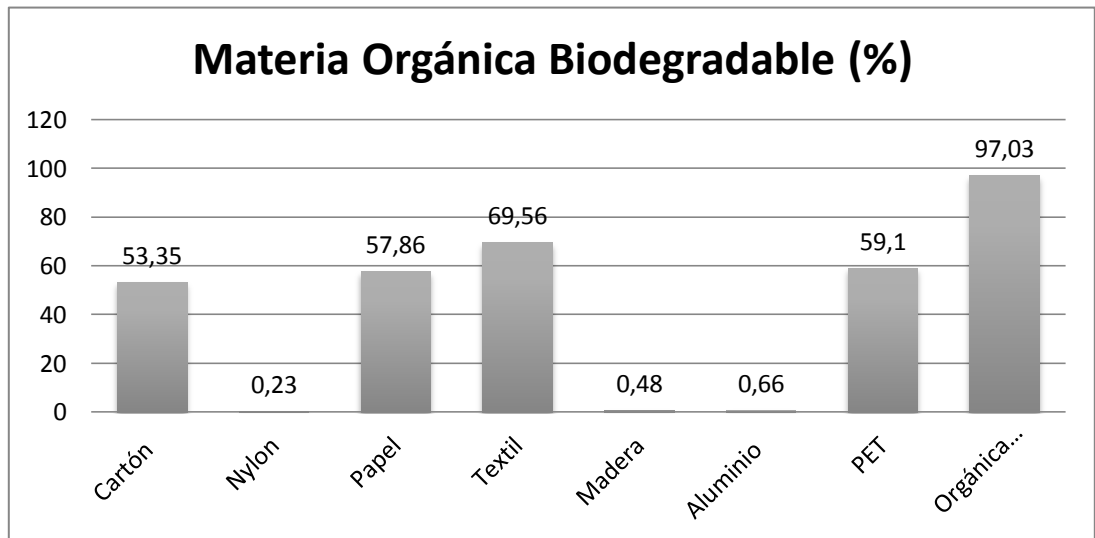
Fuente: datos calculados.

Figura 15. **Porcentaje de humedad por tipo de basura**



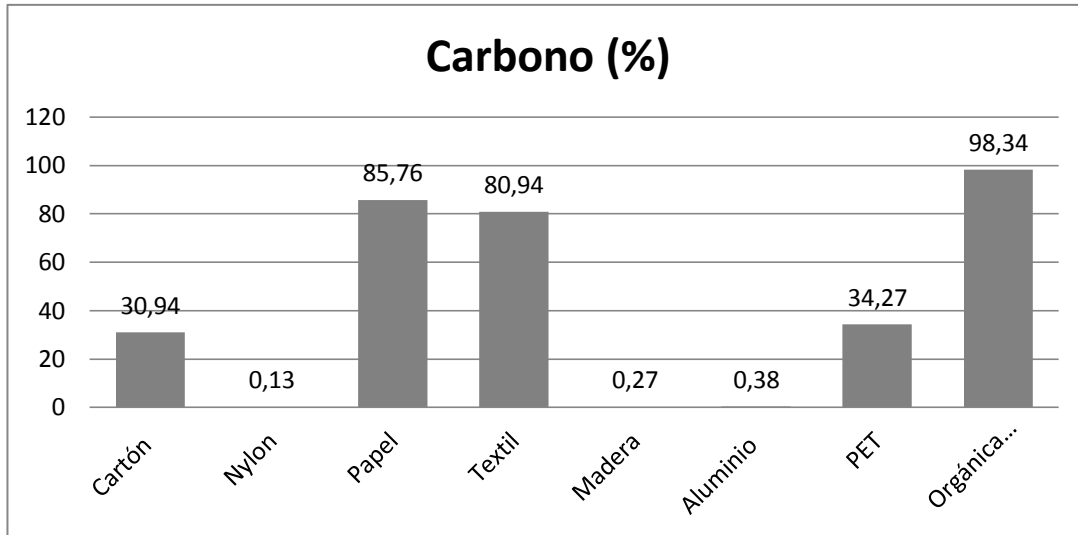
Fuente: datos calculados.

Figura 16. **Concentración de materia orgánica biodegradable por tipo de basura**



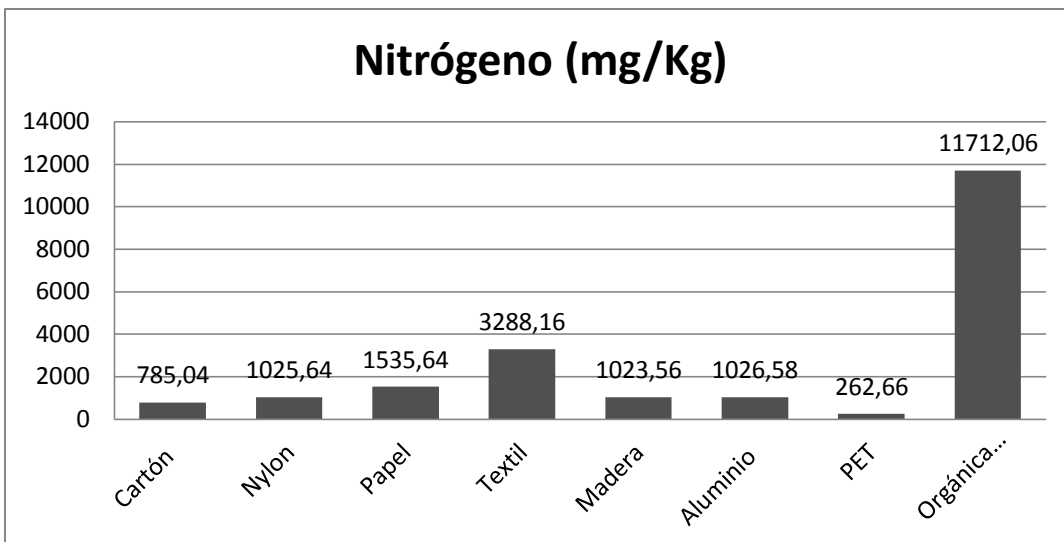
Fuente: datos calculados.

Figura 17. **Concentración de carbono por tipo de basura**



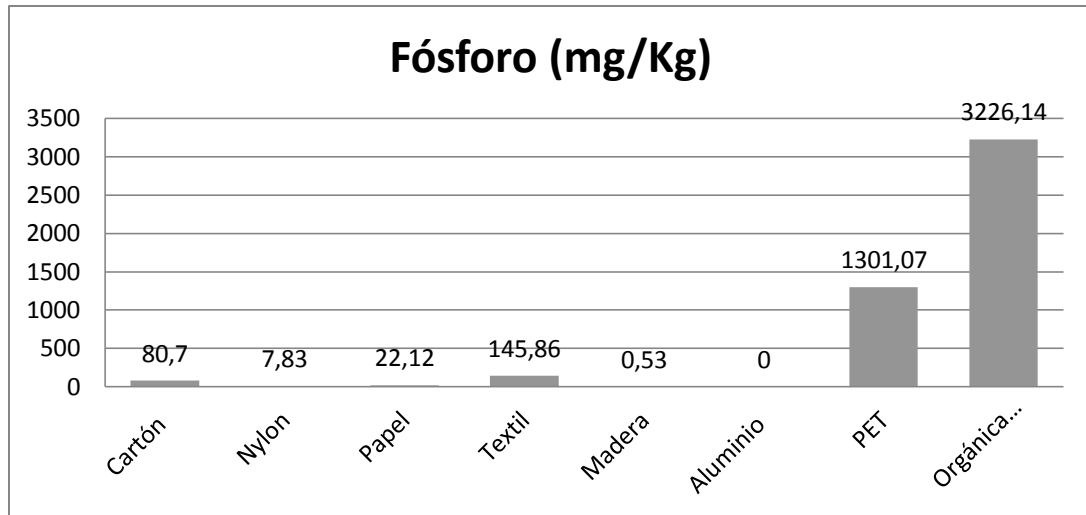
Fuente: datos calculados.

Figura 18. **Concentración de nitrógeno por tipo de basura**



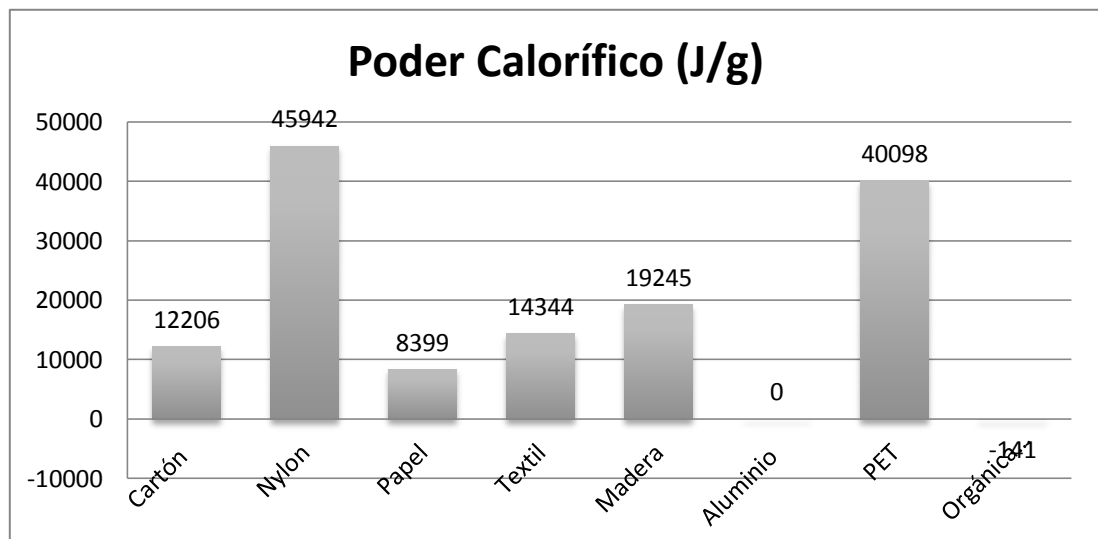
Fuente: datos calculados.

Figura 19. **Concentración de fósforo por tipo de basura**



Fuente: datos calculados.

Figura 20. **Poder calorífico por tipo de basura**



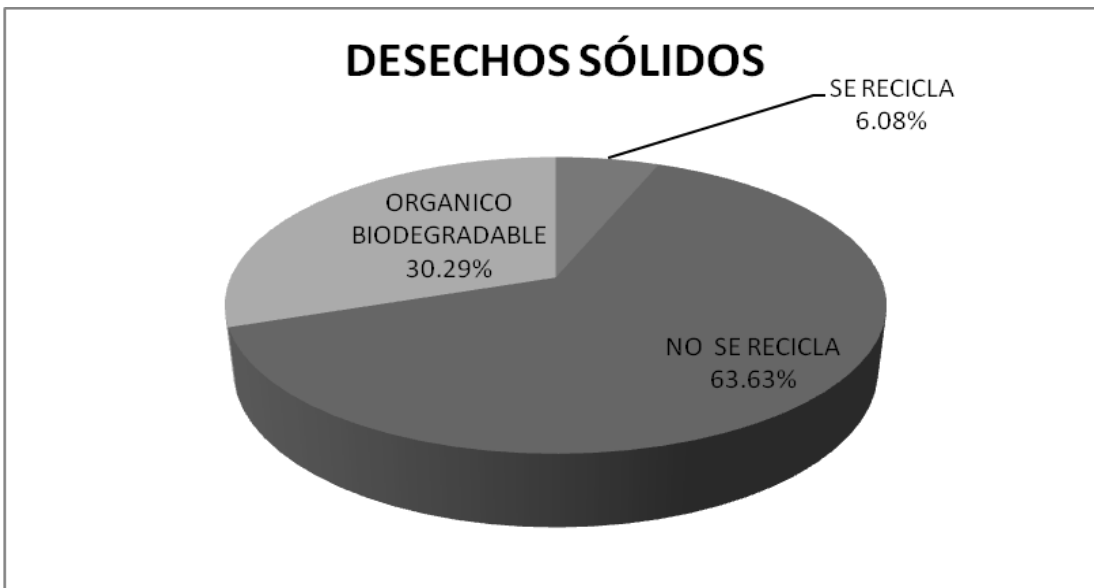
Fuente: datos calculados.

Tabla XXIII. **Situación actual del relleno sanitario**

PERIODO DE OBSERVACIÓN	DESECHOS SÓLIDOS	CANTIDAD (Kg)	ACCIÓN	PORCENTAJE (%)
06/09/2010 – 05/11/2010	Ingreso diario	882,000		
	Aprovechamiento	320,783.40	Se Recicla	6.08
			Orgánico biodegradable (compost)	30.29
Saldo	561,216.60	No se Recicla	63.63	

Fuente: datos calculados.

Figura 21. **Situación actual del relleno sanitario**



Fuente: datos calculados.

4.1. Alternativas para aprovechamiento de desechos sólidos (ver Apéndice D, p. 83)

A partir de los resultados de los análisis fisicoquímicos presentados en la tabla XXII, p. 50, las alternativas aplicables al aprovechamiento de los Desechos Sólidos en el Relleno Sanitario de Tecnología Apropriada de AMSA, corresponden al uso de estos como biocombustibles, a partir del uso de la biomasa, siendo ésta los restos orgánico biodegradables procedentes de madera, papel y cartón e incluso los restos de textiles (siempre y cuando no sean sintéticos fabricados a partir de materias plásticas).

Estos poseen los índices más altos de poder calorífico, utilizables como energía alternativa mediante densificación, y en la obtención de bioetanol y biogás correspondiente a los residuos orgánico biodegradables mediante proceso de digestión anaerobia debido a que estos contienen el contenido más alto de nitrógeno y fósforo, previo secado de los mismos ya que como puede observarse en la figura15, p. 51, estos contienen un alto contenido de humedad.

El proceso *Waste to Energy*, es un ejemplo claro de la utilización de residuos para producción de energía; este proceso se apoya en tecnologías térmicas (gasificación, despolimerización térmica, pirólisis y gasificación por plasma) y tecnologías no térmicas (digestión anaeróbica, fermentación y tratamiento mecánico biológico) para llevar a cabo la función. En este proceso pueden utilizarse igualmente los desechos de cartón, papel madera y restos orgánico biodegradables.

Los residuos plásticos (entre ellos el nylon, y el pet), pueden someterse a reciclaje químico, para la obtención de materia prima virgen o con diferentes características del desecho original, mediante la descomposición del polímero

en los componentes de partida (monómeros); así como en procesos de incineración y/o descomposición pirolítica por su alto poder calorífico como fuentes de energía, principalmente para la obtención electricidad y calor.

En general, los residuos sólidos pueden ser incinerados, o ladrillos de basura pueden ser fabricados a partir de ellos. Las llantas pueden ser pulverizadas y utilizadas como combustible alternativo al carbón, o en la producción de pavimento asfáltico, pisos o alfombras y moldeado de caucho.

Los textiles y cueros se separan por calidades (lana, algodón, fibras sintéticas) y se desguazan para su comercialización como trapos industriales, previo lavado y desinfección. Los no comercializables pasan directamente a valorización energética (incineración, gasificación, pirólisis, secado térmico).

El aluminio puede simplemente ser reciclado y reutilizado tal y como se ha hecho hasta ahora, ya que de este modo se consume menos energía que si se produjera aluminio fresco.

Por último, los residuos pueden ser seleccionados, reciclados (produciendo artículos decorativos o simplemente artículos que pueden reutilizarse) y comercializados en una “tienda ecológica” o como ladrillos de basura, promoviendo la creación de conciencia social, disminución de costos en recolección y transporte, y reducción del volumen de basura, prolongando así la vida útil del relleno sanitario.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los residuos sólidos urbanos (RSU) presentan una composición tan variable como la distribución geográfica, la cultura, y el poder adquisitivo de las poblaciones humanas que lo generan.

Los valores de la densidad de los residuos en la actualidad oscilan entre 170- 180 kilogramos por metro cúbico. La densidad varía según las zonas geográficas; también dentro de una misma zona existen variaciones entre municipios rurales y núcleos urbanos. Incluso dentro de una misma ciudad, hay diferencias entre los barrios periféricos y la zona centro, debido a que normalmente en el casco urbano se concentran las oficinas y establecimientos comerciales que producen mayor cantidad de cartones y papeles.

La humedad en un residuo es un parámetro limitante para su estudio debido a que es conveniente evitar un volumen excesivo de lixiviados. Asimismo, es necesario eliminar esta humedad para someterlo a algún tipo de tratamiento.

La humedad de los residuos depende de las estaciones, del clima y, sobre todo, está condicionado por la cantidad de materia orgánica biodegradable que contengan.

Normalmente, en invierno se dan valores del 20 por ciento, mientras que en verano llegan hasta el 30 por ciento. Este hecho es debido a que en verano aumentan los restos vegetales, que elevan el grado de humedad.

También la humedad varía según la zona de consumo y es un parámetro importante para la compactación y el compostaje. No obstante, los índices de humedad de los residuos van disminuyendo en comparación con décadas anteriores. En residuos sin compactar, la humedad varía entre el 40 – 60 por ciento. Los desechos sólidos analizados presentan contenidos relativamente altos de humedad (dependiendo de tipo de material, tal como papel, cartón y textil) por la gran cantidad de lixiviados a que se encuentran expuestos y debido a que estos absorben con mayor facilidad.

La determinación de la materia orgánica biodegradable en los residuos es importante debido a que esta parte puede fermentar y producir gases perjudiciales. El nitrógeno puede estar presente en aguas en forma de proteínas o urea, y con ayuda de oxígeno, se transformará en amoníaco, nitritos y nitratos. El fósforo es responsable de la eutrofización, es decir, de aportes más o menos masivos de nutrientes inorgánicos biodegradables en un ecosistema o ambiente.

La relación carbono nitrógeno indica la capacidad mineralizadora anual del nitrógeno contenido en un residuo. Si se conoce el intervalo para que la transformación biológica sea óptima, se puede determinar si es conveniente que los residuos se destinen a compostaje. Los microorganismos presentes en la fermentación de los restos orgánico biodegradables necesitan del carbono para obtener energía, y del nitrógeno para la síntesis de sus propias proteínas.

Los valores óptimos de la relación, oscilan entre el 25 por ciento y el 30 por ciento para residuos frescos; para valores más bajos, hay pérdida de nitrógeno en forma de amoníaco y no se pueden utilizar para compostaje. Los valores de esta relación, después del compostaje, están entre el 10 – 25 por ciento, y el nivel óptimo es del 15 – 18 por ciento.

El poder calorífico tiende a aumentar cuando disminuye el porcentaje de humedad en los residuos en favor de los materiales combustibles. El poder calorífico de los residuos urbanos puede superar valores de 2 000 kilocalorías por kilogramo (8 368 kilojoules por kilogramo). Esta característica de los residuos es muy importante en el análisis del sistema de tratamiento de eliminación. Cuando en la composición de las basuras hay gran cantidad de materias combustibles (papel, cartón, etc.), el poder calorífico es elevado, por lo que puede ser interesante su incineración. En cambio, el poder calorífico es más pequeño cuando hay mucha materia orgánica biodegradable y humedad, en este caso, es más aconsejable el compostaje.

En los resultados se puede observar un poder calorífico alto (entre 8 000 – 20 000 joules por gramo) en los desechos de madera, papel, cartón y textil, con lo que se puede afirmar que estos son aplicables para su uso como fuentes de energía.

En residuos sin compactar se obtienen valores de 800 - 1600 kilocalorías por kilogramo. En general, esta característica es determinante para saber qué residuos son rentables para incinerar (valores superiores a 1600 kilocalorías por kilogramo).

Al relleno sanitario de tecnología apropiada de AMSA ingresan a diario aproximadamente 882 000 kilogramos de desechos sólidos, los cuales representan el 46,90 por ciento del total. El resto ingresa a una planta de clasificación y tratamiento llamada Alternativas Ecológicas. De ese 46,90 por ciento que es vertido diariamente, 30,29 por ciento es destinado a compostaje y únicamente 6,08 por ciento es reciclado (los clasificadores lo pepeñan durante el día y por la tarde lo venden); el resto (63,63 por ciento) es enterrado y se mantiene allí, acortando la vida útil del relleno por disminución del espacio.

De los desechos que llegan al relleno, 34,20 por ciento es material orgánico biodegradable pero únicamente 30,29 por ciento es utilizado eficientemente en compostaje, por lo que el otro 3,91 por ciento es enterrado. Los vapores emitidos por la descomposición del material orgánico biodegradable pueden también ser utilizados en la generación de biogás para su aprovechamiento como combustible.

Los residuos de jardinería municipal, restos orgánico biodegradables de los mercados, fracción orgánica biodegradable de los restaurantes, cafeterías, empresas agro alimentarias y en general todos los desechos de procedencia orgánica biodegradable, pueden ser tratados mediante varias técnicas de compostaje. La conversión en compost de los residuos orgánico biodegradables es una técnica conocida y de fácil aplicación, que permite tratarlos de manera racional, económica y segura y conservar los nutrientes presentes en estos residuos, aprovechándolos en agricultura. Consiste en la descomposición biológica, en condiciones controladas, aerobias y termófilas, de residuos orgánico biodegradables.

Los procesos biológicos empleados en el tratamiento de aguas residuales, tratamiento de residuos y tratamiento de suelos contaminados se derivan de procesos que se dan en la naturaleza. Los ciclos aerobios y anaerobios son ejemplos típicos. La llamada digestión anaerobia es uno de los procesos más antiguos empleados en la estabilización de lodos concentrados generados en la depuración de aguas residuales. Consiste en la descomposición de materia orgánica biodegradable en ausencia de oxígeno molecular. Posteriormente, se ha demostrado que los residuos orgánicos biodegradables diluidos también pueden ser tratados anaeróbicamente.

El proceso anaerobio es productor neto de energía renovable, biogás. Los datos de consumo de energía en plantas de digestión anaerobia varían del 20 al 40 por ciento de la energía producida. Como valor orientativo, una tonelada de fracción orgánica biodegradable de residuo urbano genera unos 130 kilowatt hora. En el relleno sanitario se tiene el equivalente a 141 toneladas de materia orgánica biodegradable al día. El biogás puede ser utilizado de muchos modos, por ejemplo como combustible para hacer energía eléctrica, térmica (aprovechamiento del calor) etc.

Según artículo publicado en Revista Domingo No. 236 del 11 de enero de 2009, se tiene estimado que la leña es la mayor fuente de energía en los hogares del país. En un estudio realizado por el INAB (Instituto Nacional de Bosques) se determinó que el 65,8 por ciento de guatemaltecos tiene a la leña como fuente de energía.

Su consumo resulta aún mayor que el de electricidad, gas corriente y propano. En un estudio de Rolando Zanotti (subgerente INAB) se determinó que cada año se consumen 19 millones 456 mil 552 metros cúbicos sólidos de leña y en este total no se ha tomado en cuenta los productos utilizados en la pequeña y mediana industria.

En el estudio de Zanotti se realiza un cálculo económico de lo que pudo representar en costos el uso de leña. Para lo cual se emplea como tamaño poblacional el dato de censo del INE del 2006. En esa oportunidad se estimó que la población era de 13 millones 677 mil 815.

Cada hogar familiar tiene un promedio de 5 integrantes, y esto brindó el dato de que en el territorio nacional existían para esa fecha 2 millones 653 mil hogares. De este total de hogares se estimó que un 60 por ciento son los que

utilizan leña (1 641 338 hogares). En el ejercicio se utilizó el precio equivalente al barril de petróleo para ese mismo año, teniendo un costo de Q380,00 (US\$ 50). Con estos datos se obtuvo que el valor económico estimado de la leña es de Q.11 054 859,00 (US\$ 1 473 981 200). Un estudio del PERFOR, realizado en el 2004, se determinó que el porcentaje de hogares que aún usan leña es de 60 por ciento.

Un 16,65 por ciento de los desechos está conformado por madera, papel y cartón. Estos materiales pueden ser reciclados o densificados para su uso como fuente de energía en la forma de leños artificiales.

La madera, papel y cartón son un combustible utilizado en muchos países, y en las basuras ocupan un espacio y se desperdicia un bien escaso. La falta de leña provoca la tala de árboles y la consiguiente deforestación, y representa un grave problema. La que se recoge como RSU proviene, fundamentalmente, de muebles viejos, restos de poda y jardinería, residuos de demolición (vigas, ventanas puertas...), restos de embalaje, etc. Puede procederse a una selección manual de aquellos elementos que tengan un valor en su forma y estado actual para su venta directa para reutilización, y el resto puede pasarse a un triturador, y, previa adición de un aglomerante, convertirlas en briquetas para su venta como combustible.

También son utilizables como primera materia para fabricación de aglomerados para la industria del mueble, por ejemplo. Es también aplicable como primera materia para la obtención de gas en plantas de transformación de biomasa.

Igualmente, los desechos textiles corresponden al 9,52 por ciento del 46,90 por ciento de los desechos que llegan, y los cuales se aprovechan en un

0,09 por ciento. Los textiles y cueros procedentes de la recogida selectiva o triaje de los RSU pueden ser separados por calidades (lana, algodón, fibras sintéticas...) y desguazados para su comercialización como trapos industriales, previo lavado y desinfección. Los no comercializables pasan directamente a valorización energética. De lo anterior se observa, que existe una cantidad grande de material que no está siendo aprovechado tanto como sería posible.

Otro tipo de desecho presente en el relleno es el plástico. Este se encuentra en un 12,54 por ciento y es uno de los materiales que se extrae para reciclaje, pero de esa proporción, lo utilizado en reciclaje es únicamente 5,7 por ciento. Asimismo, se tiene vidrio, aluminio y chatarra, pero estos se encuentran en menores proporciones (0,59 por ciento, 1,41 por ciento y 2,45 por ciento respectivamente), a los que les corresponde un reciclaje de 0,10 por ciento del total de 6,08 por ciento.

El vidrio recogido selectivamente presenta su primera utilidad mediante su envío a las fábricas para su reconversión en envases. Como alternativas tenemos la fabricación de vitrocerámicas, la mezcla del vidrio triturado con arcillas para conseguir gres, la fabricación de piezas sinterizadas, la utilización en talleres ocupacionales, la formación de piezas moldeadas, etc. Una actividad, de relativamente bajo costo de implantación y alta rentabilidad es la transformación de los vidrios en losetas de por ejemplo, 25 milímetros de lado, mediante trituración, prensado y sinterizado en horno.

Por último, se tienen desechos varios como huesos, tierra, cenizas, carbón, etc., que quedan en el relleno. Así también, neumáticos, que en conjunto conforman el 19,65 por ciento del material restante, los cuales pueden ser reciclados. Entre los posibles usos de los materiales reciclados procedentes de los neumáticos están la fabricación de asfaltos y ciertos materiales para

obras civiles. La valorización energética es una opción a considerar firmemente en aquellos casos en que no sean posibles las opciones anteriores. Existen experiencias en la utilización como combustible de los neumáticos enteros o triturados, tanto en plantas de residuos como en otro tipo de plantas industriales, (cementeras, ladrilleras, etc.).

CONCLUSIONES

1. Basado en los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, se evidencia que los desechos sólidos del relleno sanitario de tecnología apropiada de AMSA presentan propiedades y composiciones que hacen factible su tratamiento; por lo tanto, las nuevas tecnologías de tratamiento de residuos, tanto para su aprovechamiento como fuentes de energía, como las diferentes opciones de reciclaje, son aplicables para la optimización de su vida útil.
2. La densidad obtenida para los desechos sólidos del relleno sanitario (entre 170 – 180 kilogramos por metro cúbico) se encuentra por debajo del rango teórico (200 – 300 kilogramos por metro cúbico), establecido según Método Sakurai, ya que esta se encontraba compactada en bolsas y/o toneles.
3. La composición física de los desechos sólidos está caracterizada por su alto porcentaje de materia orgánica biodegradable, lo que se traduce en un mayor contenido de humedad con valores que fluctúan entre 35 y 65 por ciento; el resto es papel, cartón, vidrio, metales, plásticos y material inerte, entre otros.
4. Los valores obtenidos de fósforo, nitrógeno y materia orgánica biodegradable se encuentran dentro del rango aceptado por las especificaciones establecidas por AMSA.

5. El poder calorífico es el indicado para la aplicación de alternativas para aprovechamiento de los desechos como fuentes de energía según lo expuesto en el Método Sakurai.

6. Se determinó que el porcentaje de desechos reciclados y destinados a compost puede ser incrementado en más del 50 por ciento mediante la implementación de alternativas tales como compostaje y deshidratación y densificación para materiales de tipo orgánico biodegradable; densificación y reciclaje para la madera, cartón y papel; reciclaje para los plásticos; reutilización de segunda mano o valorización energética de cueros y materias textiles; reciclaje del aluminio; fabricación de vitrocerámicas, gres y piezas sinterizadas, la transformación de los vidrios en losetas mediante trituración, prensado y sinterizado en horno; fabricación de asfaltos, materiales para obras civiles y alfombras a partir de molienda de llantas.

RECOMENDACIONES

1. Promover una cultura de separación de los residuos sólidos porque el aprovechamiento de los mismos para los diferentes usos, se da de una mejor forma de esta manera, ya sea en el sitio de generación de los residuos (bien sea en los hogares o en las instituciones, lo que se denomina separación en la fuente), o a partir de la basura mezclada, en estaciones especializadas para tal fin.
2. Remoción de la humedad causada por el alto contenido de lixiviados presente en los materiales, para su eficiente tratamiento posterior.
3. Promover en el ámbito de gobiernos, empresas, instituciones y personas, lo que se denomina cultura de las erres, en oposición al úselo y tírelo.
4. Para lograr la mejor integración económica y social en los ciclos productivos, el papel de la ciudad, gran generadora de residuos, debe ser de participación colectiva en la gestión y toma de decisiones para el aprovechamiento industrial de los residuos sólidos.
5. Contratación o asociación con empresas de tratamiento de residuos según su tipo, para aprovechamiento de los mismos y el consecuente aumento de la vida útil del relleno sanitario.
6. Realización de estudios posteriores que se enfoquen en la evaluación de la factibilidad económica de las opciones propuestas en el presente trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

1. DEFFIS, Armando. *La basura es la solución*. México: Árbol, 1994. 277 p.
2. HERNÁNDEZ, Roberto. *Metodología de la investigación*. 2ª ed. México: McGraw- Hill, 1998. 705 p.
1. SAKURAI, Kinutoshi. *Análisis de residuos sólidos: Manual de Instrucción. Ilust. Proyecto: Programa Regional OPS/EHP/CEPIS de Mejoramiento de la Recolección, Transporte y Disposición Final de Residuos Sólidos*. Lima: Preliminar, 1981. 53 p.
2. TCHOBANOGLIOUS, George. *Gestión integral de residuos sólidos*. México: McGraw-Hill, I y II. 1000 p.
3. ESTEVEZ, Paula. *Waste to energy*. [en línea] Columbia, Octubre de 2007.[Ref.: 14 de enero de 2011]. Disponible en Web: <http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/PaulaEstevez_VersionFinal3.pdf>.
6. Higiene industrial. *Recogida y tratamiento de residuos* [en línea] <<http://www.ingenieroambiental.com/4004/Recogida%20y%20tratamiento%20de%20residuos.PDF>> [Ref.: 04 de octubre de 2010].
7. Ingeniería Ambiental y Medio Ambiente. *Residuos Sólidos* [en línea] <<http://www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/residuos.html>> [Ref.: 25 de abril de 2010].

8. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. *Poder calorífico (q) de diversas sustancias* [en línea] <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Normativa/TextosLegales/RD/2004/2267_04/Ficheros/tabla1_4.pdf> [Ref.: 14 de enero de 2011].

APÉNDICE

A. CARACTERIZACIÓN





B. APROVECHAMIENTO





C. ANÁLISIS FISCOQUÍMICOS

C.1. MUESTRAS





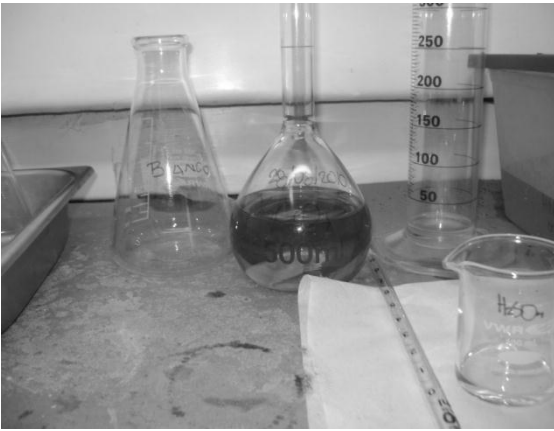
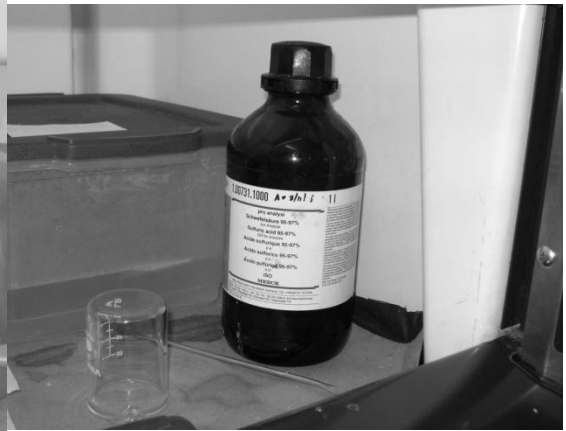
C.2. HUMEDAD





C.3. MATERIA ORGÁNICA BIODEGRADABLE Y CARBONO





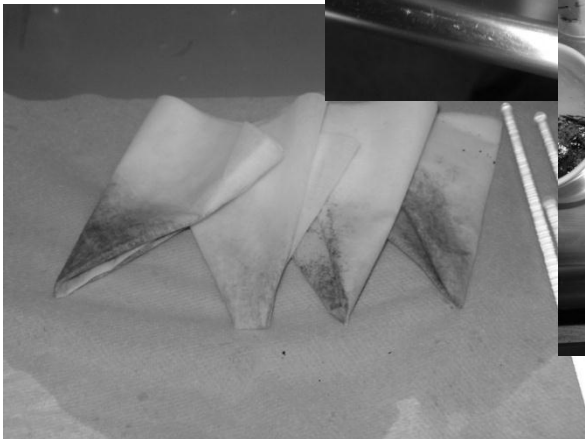
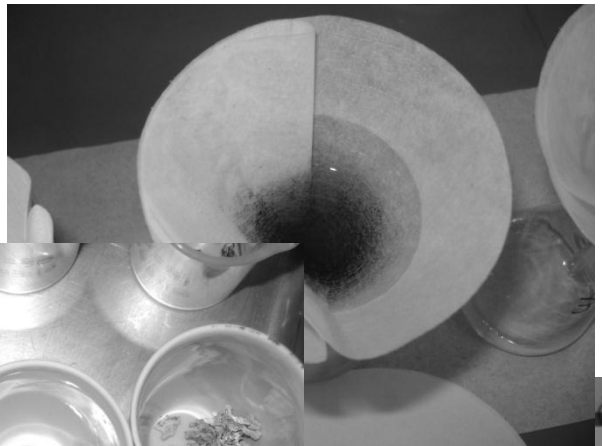
C.4. NITRÓGENO TOTAL



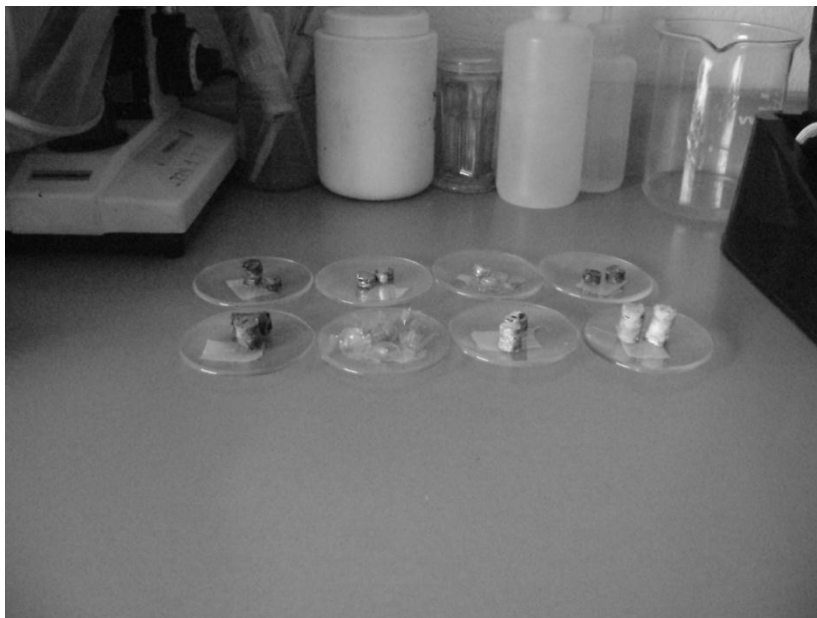


C.5. FÓSFORO TOTAL





C.6.
PODER
CALORÍFICO



D. ALTERNATIVAS PARA APROVECHAMIENTO

D.1. BIOCOMBUSTIBLES Y ENERGÍAS RENOVABLES

Los biocombustibles se producen orgánica biodegradablemente y a diferencia de los combustibles fósiles son una fuente de energía renovable.

Los biocombustibles provienen de la biomasa: materia orgánica biodegradable originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía.

Para la obtención de los biocombustibles se pueden utilizar especies de uso agrícola tales como el maíz o la mandioca, ricas en carbohidratos, o plantas oleaginosas como la soja, girasol y palmas. También se pueden emplear especies forestales como el eucalipto y los pinos.

Al utilizar estos materiales se reduce el dióxido de carbono que es enviado a la atmósfera terrestre ya que estos materiales van absorbiendo el dióxido de carbono a medida que se van desarrollando, mientras que emiten una cantidad similar que los combustibles convencionales en el momento de la combustión.

En Europa y Estados Unidos ha surgido diversa normativa que exige a los proveedores mezclar biocombustibles hasta un nivel determinado. Generalmente los biocombustibles se mezclan con otros combustibles en cantidades que varían del 5 al 10 por ciento.

Según la naturaleza de la biomasa y el tipo de combustible deseado, se pueden utilizar diferentes métodos para obtener biocombustibles: procesos mecánicos (astillado, trituración, compactación), termoquímicos (combustión, pirólisis y gasificación), biotecnológicos (micro bacterianos o enzimáticos) y extractivos. Cada uno de estos procesos se inicia con la biomasa vegetal que se forma a partir del proceso de fotosíntesis, con el aporte de la energía solar que captan y transforman estos organismos.

Tabla XXIV. **Proceso de obtención de biocombustibles**

Técnicas	Fermentación	Digestión anaerobia
Productos	Etanol, Varios	Biogás, CO ₂ , CH ₄
Aplicaciones	Transporte, Industria Química	Calefacción, Electricidad

Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Biocombustibles>. 03/03/2011.

Cada técnica depende del tipo de biomasa disponible. Si se trata de un material seco puede convertirse en calor directo mediante combustión, el cual producirá vapor para generar energía eléctrica. Si contiene agua, se puede realizar la digestión anaeróbica que lo convertirá en metano y otros gases, o fermentar para producir alcohol, o convertir en hidrocarburo por reducción química. Si se aplican métodos termoquímicos es posible extraer metanol, aceites, gases, etc. El método de la digestión por el cual se obtiene biogás es el más empleado.

D.1.1. BIOMASA COMO ENERGÍA ALTERNATIVA

Puede considerarse una fuente renovable de energía:

- Emisiones de CO₂ (dióxido de carbono). En general, el uso de biomasa o de sus derivados puede considerarse neutro en términos de emisiones netas si sólo se emplea en cantidades a lo sumo iguales a la producción neta de biomasa del ecosistema que se explota. Tal es el caso de los usos tradicionales (uso de los restos de poda como leña, cocinas de bosta, etc.) si no se supera la capacidad de carga del territorio.
- Si la materia prima empleada procede de residuos. Estos combustibles ayudan al reciclaje, pero siempre hay que considerar si la producción de combustibles es el mejor uso posible para un residuo concreto.
- Si la materia prima empleada procede de cultivos, hay que considerar si éste es el mejor uso posible del suelo frente a otras alternativas (cultivos alimentarios, reforestación, etc). Esta consideración depende sobremanera de las circunstancias concretas de cada territorio.

D.1.2. BIOETANOL

El bioetanol es un alcohol que se fabrica en su mayor parte mediante un procedimiento similar al de la cerveza. A lo largo de este proceso los almidones son convertidos en azúcares, éstos sufren una fermentación que los transforma en etanol, y éste es destilado en su forma final.

Es producido principalmente a partir de caña de azúcar o maíz (el maíz es mezclado con un poco de cebada o trigo en algunos casos), cuyos hidratos de carbono son fermentados a etanol por las levaduras del género *Saccharomyces*.

La caña de azúcar representa la fuente más atractiva para la producción de etanol, debido a que los azúcares que contiene son simples y fermentables directamente por las levaduras. Sin embargo, su mayor inconveniente es que resulta cara como materia prima debido a que los cultivos como el maíz son ricos en almidón, un hidrato de carbono complejo que necesita ser primero transformado en azúcares simples. Este proceso recibe el nombre de sacarificación y, al producirse un paso más en la producción, se aumenta el coste.

La producción puede llevarse a cabo tanto a partir de residuos agrícolas, forestales, industriales o urbanos. Los desechos agrícolas y forestales, materias primas ricas en celulosa, son las que más abundan y cuya utilización tiene un menor coste. A pesar de esto, no resulta rentable en la actualidad la obtención de etanol a partir de estos residuos, debido a que la conversión de la celulosa en azúcares fermentables es un proceso complejo y costoso.

En la actualidad, los principales productores de alcohol como combustible son Brasil, Estados Unidos y Canadá. Brasil realiza la producción a partir de la caña de azúcar y lo emplea tanto como “hidro-alcohol” (95 por ciento etanol), como de un aditivo de la gasolina (24 por ciento de etanol). Estados Unidos y Canadá basan su producción en el maíz (combinado con un poco de trigo y cebada) y es el biocombustible que más se utiliza en diferentes formulaciones que van desde el 5 por ciento al 85 por ciento de etanol. Más de 5670 millones de litros aproximadamente (1500 millones de galones.) se agregan por año a la gasolina con el objetivo de optimizar el rendimiento de los vehículos y disminuir la polución atmosférica.

Procesos de obtención de bioetanol

El bioetanol se obtiene a partir de la remolacha (u otras plantas ricas en azúcares), de cereales, de alcohol vínico o de biomasa, mediante un proceso de destilación. En España la producción industrial emplea principalmente cereal como materia prima básica, con posibilidad de utilizar los excedentes de la industria remolachera transformados en jugos azucarados de bajo costo. En general, se utilizan tres familias de productos para la obtención del alcohol:

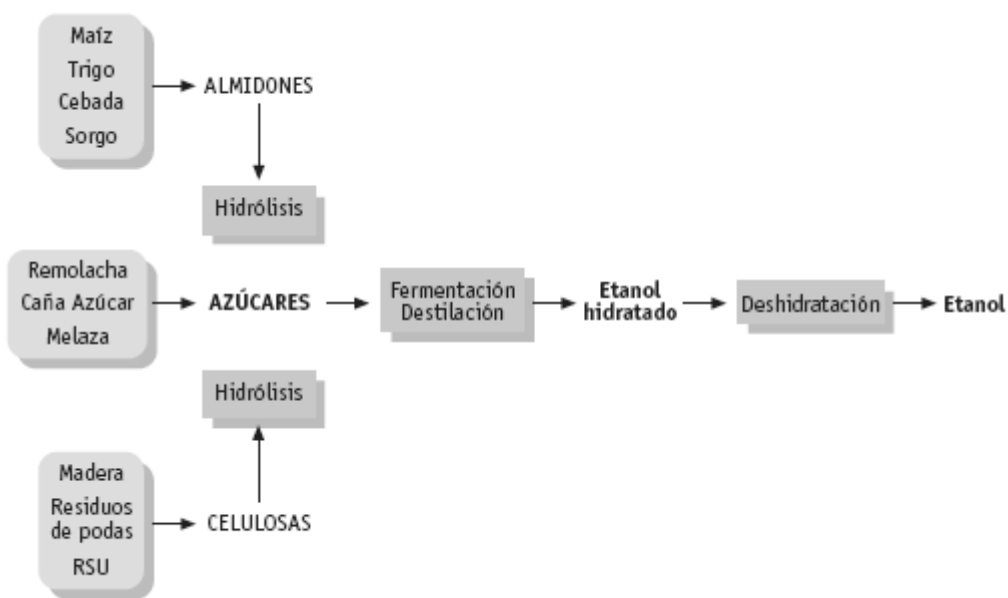
- Azúcares, procedentes de la caña o la remolacha, por ejemplo.
- Cereales, mediante la fermentación de los azúcares del almidón.
- Biomasa, por la fermentación de los azúcares contenidos en la celulosa y hemicelulosa.

El esquema general de fabricación del bioetanol (Figura 4), muestra las siguientes fases en el proceso:

- **Dilución:** Es la adición del agua para ajustar la cantidad de azúcar en la mezcla o (en última instancia) la cantidad de alcohol en el producto. Es necesaria porque la levadura, usada más adelante en el proceso de fermentación, puede morir debido a una concentración demasiado grande del alcohol.
- **Conversión:** La conversión es el proceso de convertir el almidón/celulosa en azúcares fermentables. Puede ser lograda por el uso de la malta, extractos de enzimas contenidas en la malta, o por el tratamiento del almidón (o de la celulosa) con el ácido en un proceso de hidrólisis ácida.
- **Fermentación:** La fermentación alcohólica es un proceso anaeróbico realizado por las levaduras, básicamente. De la fermentación alcohólica se obtienen un gran número de productos, entre ellos el alcohol.

- **Destilación o deshidratación:** la destilación es la operación de separar, mediante calor, los diferentes componentes líquidos de una mezcla (etanol/agua). Una forma de destilación, conocida desde la antigüedad, es la obtención de alcohol aplicando calor a una mezcla fermentada.

Figura 22. **Proceso de obtención del bioetanol**



Fuente: <http://www.miliarium.com/monografias/Biocombustibles/Bioetanol/Bioetanol.asp>.
03/03/2011.

Otra alternativa a las cosechas dedicadas a fines energéticos, son los materiales lignocelulósicos son los que ofrecen un mayor potencial para la producción de bioetanol, el uso de residuos de procesos agrícolas, forestales o industriales, con alto contenido en biomasa. Estos residuos pueden ir desde la paja de cereal a las limpieas forestales, pasando por los residuos sólidos urbanos (RSU) o las cáscaras de cereal o de arroz.

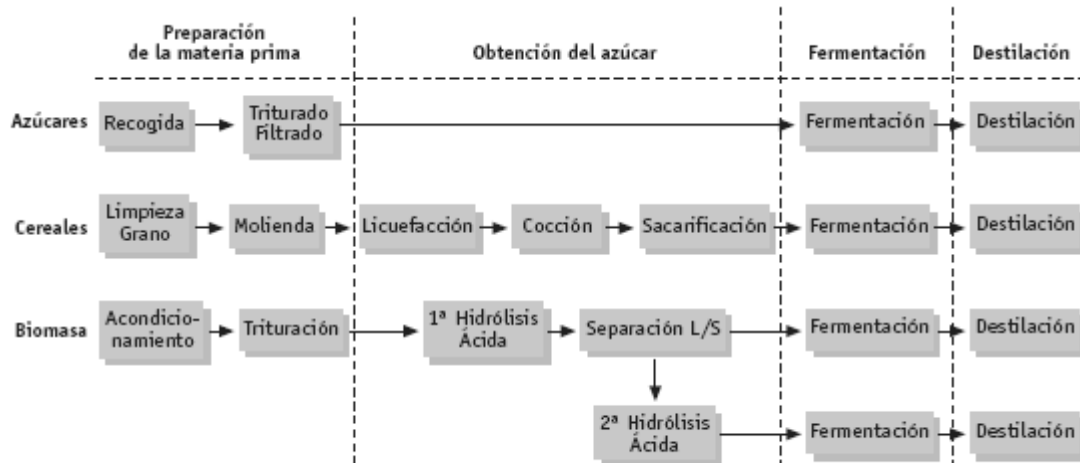
Los residuos tienen la ventaja de su bajo coste, ya que son la parte no necesaria de otros productos o procesos, salvo cuando son utilizados en la alimentación del ganado. Los RSU tienen un alto contenido en materia orgánica biodegradable, como papel o madera, que los hace una potencial fuente de materia prima, aunque debido a su diversa procedencia pueden contener otros materiales cuyo pre proceso de separación incrementa mucho el precio de la obtención del bioalcohol.

También pueden utilizarse residuos generados en algunas industrias, como la papelera, la hortofrutícola o la fracción orgánica biodegradable de residuos sólidos industriales.

Muchos de estos residuos no sólo tienen valor económico en el contexto donde se generan sino que pueden ser causa de problemas ambientales durante su eliminación.

Los residuos de biomasa contienen mezclas complejas de carbohidratos, llamados celulosa, hemicelulosa y lignina. Para obtener los azúcares de la biomasa, ésta es tratada con ácidos o enzimas que facilitan su obtención. La celulosa y hemicelulosa son hidrolizadas por enzimas o diluidas por ácidos para obtener sacarosa, que es entonces fermentada. Los principales métodos para extraer estos azúcares son tres: la hidrólisis con ácidos concentrados, la hidrólisis con ácidos diluidos y la hidrólisis enzimática. En la figura 5 se muestra las diferencias entre los procesos de obtención de bioetanol, según sea su materia prima de origen.

Figura 23. **Diferencias entre los procesos de obtención de bioetanol**



Fuente: <http://www.miliarium.com/monografias/Biocombustibles/Bioetanol/Bioetanol.asp>.

03/03/2011.

Subproductos de la obtención del bioetanol

Los subproductos generados en la producción de bioetanol, así como el volumen de los mismos, dependen en parte de la materia prima utilizada. En general se pueden agrupar en dos tipos:

- **Materiales lignocelulósicos:** tallos, bagazo, etc., correspondientes a las partes estructurales de la planta. En general se utilizan para valorización energética en cogeneración, especialmente para cubrir las necesidades energéticas de la fase de destilación del bioetanol, aunque también se puede vender el excedente a la red eléctrica (con precio primado).
- **Materiales alimenticios:** pulpa y granos de destilería de maíz desecados con solubles (DDGS), que son los restos energéticos de la planta después de la fermentación y destilación del bioetanol. Tienen

interés para el mercado de piensos animales por su riqueza en proteína y valor energético.

La caña de azúcar es la planta más aprovechable por el bagazo generado para su combustión y generación energética. La remolacha azucarera genera, por su parte, unas 0,75 toneladas de pulpa por tonelada de bioetanol producido.

La producción de bioetanol a partir de trigo o maíz genera en torno a 1,2 ton de DDGS por tonelada de bioetanol. En general, existen dos filosofías alimenticias en cuanto al empleo del DDGS. Cuando el pienso está en el 15 por ciento o menos de la dieta, el DDGS sirve como una fuente de proteína suplementaria. Cuando el pienso está en los niveles más altos (superior al 15 por ciento de la dieta de la materia seca) su papel primario es como fuente de energía. El DDGS está compuesto de grasa –en un 10-15 por ciento–, de fibra neutra detergente –en un 40-55 por ciento–, de proteína de crudo (CP) –en un 30-35 por ciento– y de ceniza en un 5 por ciento.

D.1.3. BIOGÁS

La digestión anaeróbica es un proceso por el cual el contenido orgánico biodegradable de la basura es reducido por la acción bacteriológica de microorganismos en ausencia de oxígeno. Del proceso anaeróbico resulta una mezcla de gases (biogás) cuyos principales componentes son el gas combustible metano y el gas dióxido de carbono, quedando como residuo un lodo con características de bioabono, que puede ser utilizado como mejorador del suelo en agricultura.

Para su obtención, se puede utilizar como materia prima la excreta animal, la cachaza de la caña de azúcar, los residuales de mataderos, destilerías y fábricas de levadura, la pulpa y la cáscara del café, así como la materia seca vegetal.

Son cuatro los tipos de bacterias que intervienen en la fermentación:

1. Las hidrolíticas, que producen ácido acético, compuestos monocarbonados, ácidos grasos orgánico biodegradables y otros compuestos policarbonados.
2. Las acetogénicas, productoras de hidrógeno.
3. Las homoacetogénicas, que pueden convertir una cantidad considerable de compuestos carbonados en ácido acético.
4. Las metanogénicas, productoras del gas metano, principal componente del biogás, con una proporción de 40 a 70 por ciento de metano (CH₄).

El método de digestión anaeróbica ha sido utilizado con cierta frecuencia en tratamiento de residuos provenientes de algunas industrias como la cervecera, los tambos y la cría intensiva de ganado.

Desde hace décadas, en algunos países como Holanda, Australia e Inglaterra, se aplica este tratamiento a la fracción orgánica biodegradable de los residuos sólidos domiciliarios, como resultado de la investigación y el desarrollo tecnológico. Al igual que el compost, el proceso anaeróbico exige la clasificación del resto de los residuos sólidos y también resulta una buena oportunidad para iniciar las prácticas del reciclaje de otros materiales.

El biogás obtenido puede utilizarse como combustible para otras aplicaciones que el gas de la red (gas natural) o el gas envasado (tubos y

garrafas), con la diferencia de que el biogás tiene un poder calorífico algo menor.

Los residuos sólidos pueden dejar de ser considerados como un grave problema (dinero, molestias, olores, espacio) para las empresas si buscamos una forma de valorar sus potencialidades.

La biometanización o digestión anaerobia es la utilización de un determinado tipo de bacterias que en condiciones anaerobias (sin oxígeno) degradan la materia orgánica biodegradable generando biogás.

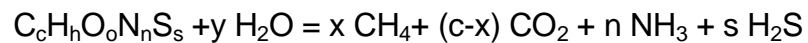
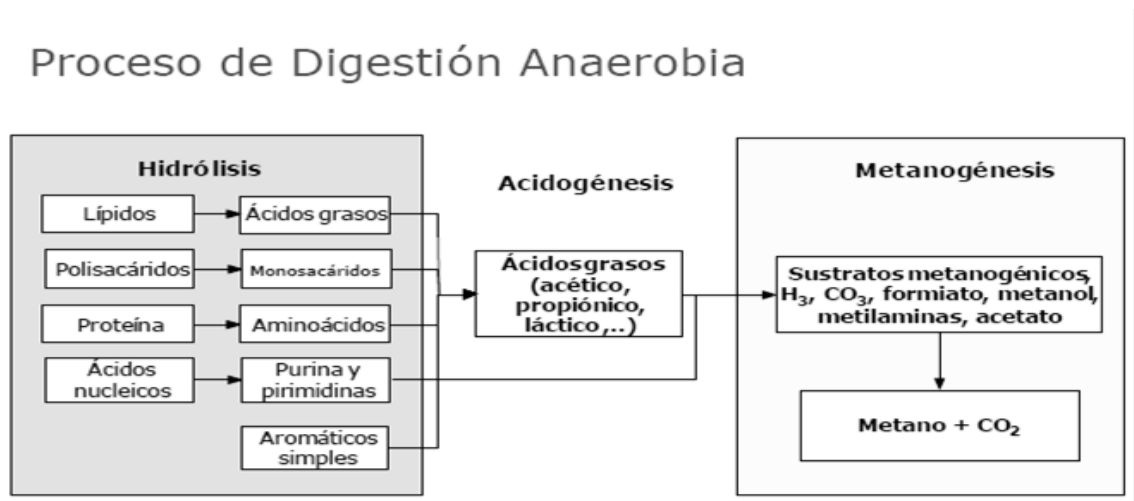


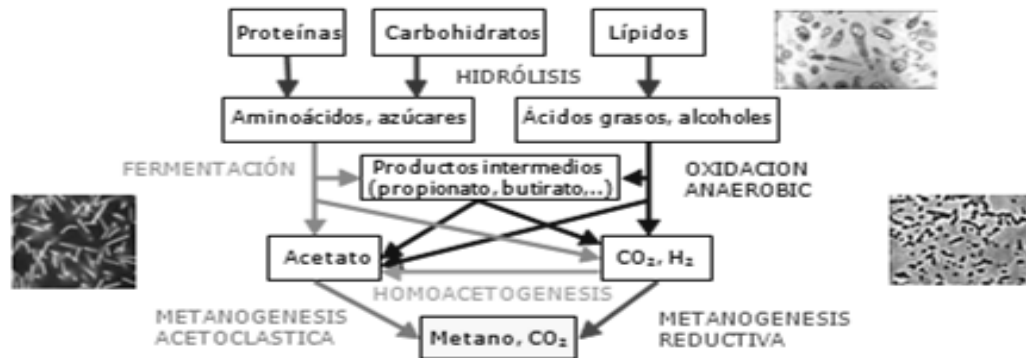
Figura 24. **Proceso de digestión anaerobia**



Fuente: http://www.navactiva.com/es/descargas/pdf/amedioa/obtencion_biogas.pdf. 03/03/2011.

Figura 25. **Microbiología de la digestión anaerobia**

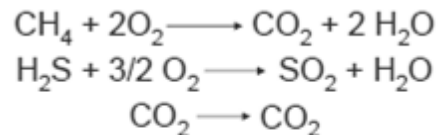
Microbiología de la digestión anaerobia



Fuente: http://www.navactiva.com/es/descargas/pdf/amedioa/obtencion_biogas.pdf. 03/03/2011.

Principios de la combustión

El biogás mezclado con aire puede ser quemado en un amplio espectro de artefactos descomponiéndose principalmente en CO₂ y H₂O. La combustión completa sin el exceso de aire y con oxígeno puro, puede representarse por las siguientes reacciones químicas:



- El requerimiento mínimo de aire sería del 21 por ciento pero esta cifra debe ser aumentada para lograr una buena combustión.
- La relación aire – gas puede ser ajustada aumentando la presión del aire, incrementando la apertura de la válvula dosificadora de gas.
- La presión para un correcto uso del gas oscila entre 7 y 20 milibar.

Composición del biogás

- Metano (CH₄): 50-80 %
- Dióxido de carbono (CO₂): 20-50 %
- Otros (H₂, agua, NH₃): 1-5 %
- H₂S, generalmente <4.000 ppm
- Poder calorífico: 5.000-6.000 kWh/m³

Composición=f(materia orgánica biodegradable, T^a, presión, tiempo de reacción, humedad, inhibidores, etc.)

Figura 26. **Componentes del biogás**

Componentes del biogas en función del substrato utilizado (Coombs, 1990)

Componente	Residuos agrícolas	Lodos de depuradora	Residuos industriales	Gas de vertedero
Metano	50-80%	50-80%	50-70%	45-65%
Dióxido de carbono	20-50%	20-50%	30-50%	34-55%
Agua	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
Hidrógeno	0-2%	0-5%	0-2%	0-1%
Sulfuro de hidrógeno	100-700ppm	0-1%	0-8%	0.5-100ppm

Fuente: http://www.navactiva.com/es/descargas/pdf/amedioa/obtencion_biogas.pdf. 03/03/2011.

Factores de los que depende la producción de biogás

- Temperatura
- Tiempo de retención
- Relación carbono / hidrógeno
- Porcentaje de sólidos
- Factor pH

Usos del biogás

El biogás puede ser:

- Quemado para calefaccionar el aire, secar, cocinar o calentar agua.
- Usado para hacer marchar un motor generador y producir calor y electricidad.

Figura 27. **Balance económico**

Alimentación a	Consumo Kcal/h.	1 m ³ de biogas puede alimentar un mínimo de
Cocina de 1 hornalla	660 a 742,5	7,4 h
Heladera de 13 pies	550 a 600	8,3 h
Lámpara a mantilla	478 a 528	10,4 h
Termotanque de 110 lt	1.375 al .650	3,3 h
Estufa infrarroja de 600 cal	3.355 a 3.487	1,57 h
Motor (por hp/hora)	2.750 a 4.400	1,25 h
Generación de electricidad 6,4 Kw/hora	5.500	1 h

Fuente: <http://www.scribd.com/doc/34464324/biogas-produccion-usos-contenidos-nomogramas-y-motor-de-diesel-a-motor-a-gas>. 03/03/2011.

Figura 28. **Usos del biogás**

¿Para qué se utiliza el biogás?

Combustible para calderas	4
Motores de cogeneración	4
Combustible de vehículos	4
Como gas natural	4

Fuente: http://www.navactiva.com/es/descargas/pdf/amedioa/obtencion_biogas.pdf. 03/03/2011.

Figura 29. **Limitaciones de uso**

Limitaciones en función del uso

	H ₂ S	CO ₂	H ₂ O
Combustible para calderas	<1000 ppm	no	no
Motores de cogeneración	<500 ppm	no	no condensación
Combustible de vehículos	↔	↔	↔
Como gas natural	↔	no	↔

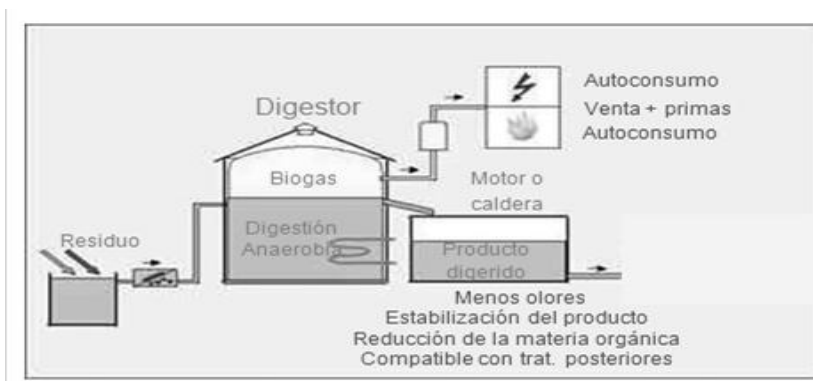
Fuente: http://www.navactiva.com/es/descargas/pdf/amedioa/obtencion_biogas.pdf.

03/03/2011.

Ventajas de la digestión anaerobia de residuos

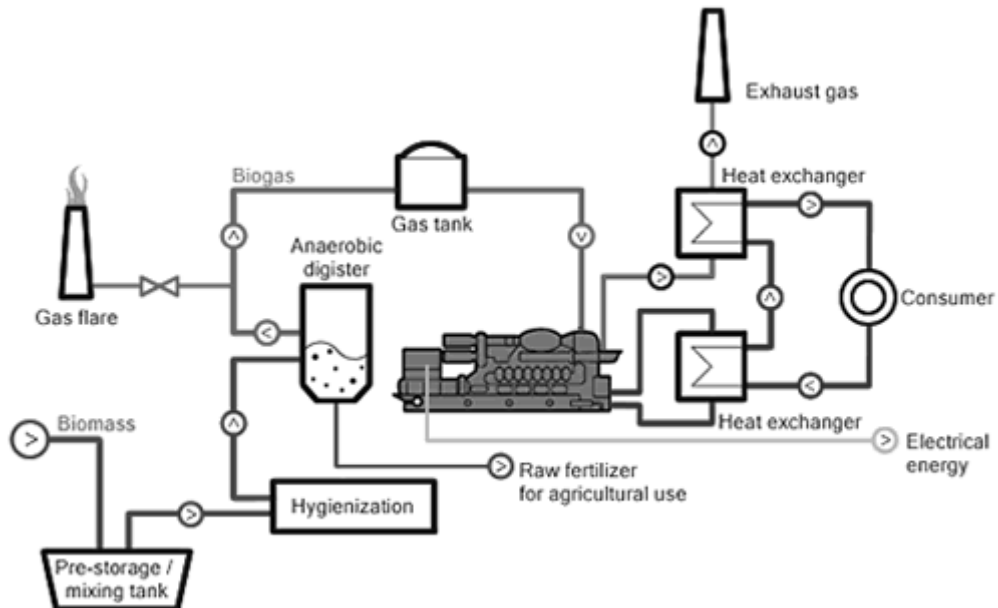
- El biogás puede ser utilizado en la propia instalación para generación de electricidad y/o calor (co-generación)
- El biogás es un biocombustible (energía renovable)
- Cumplimiento de los objetivos del protocolo de Kyoto, objetivos europeos de producción de energía renovable
- Subvenciones a innovación y demostración en aplicaciones concretas
- Subvenciones e incentivos para la inversión en instalaciones de biometanización
- Primas a la producción de electricidad
- La humedad de los residuos no es un problema
- Se pueden tratar conjuntamente varios residuos
- Reduce los problemas de olores
- Ingresos adicionales por gestión de residuos
- Sistemas simples y fáciles de gestionar

Figura 30. **Proceso de obtención de biogás**



Fuente: http://www.navactiva.com/es/descargas/pdf/amedioa/obtencion_biogas.pdf. 03/03/2011.

Figura 31. **Proceso de obtención de biogás (II)**



Fuente: <http://energiarenova.blogspot.com/2010/09/empresas-resiter-y-scandinavian-biogas.html>.
03/03/2011.

D.2. DENSIFICACIÓN DE LA BIOMASA

Todas las industrias que utilizan la madera como materia prima, tienen al final del proceso una grande cantidad de residuos, tanto en la industria como en la floresta.

En la mayoría de las veces esos residuos industriales, se constituyen en un grave problema, debido a la cantidad, dispersión y dificultad de manejo que los mismos presentan. Por otro lado, exigen grandes áreas para acopiamiento o simplemente son quemados o incinerados sin que haya aprovechamiento de la energía en ellos contenida.

Hechos semejantes acontecen en la floresta, donde los residuos de la exploración son dejados en las áreas exploradas sin cualquier aprovechamiento, causando muchas veces problemas en los tratos culturales subsiguientes.

De una manera general, tanto los residuos industriales como los forestales, comúnmente llamados de biomasa forestal, hasta recientemente no poseían cualquier utilidad.

Sin embargo, con los crecientes aumentos verificados en los precios de los combustibles de origen fósil, la biomasa forestal, debido sus características, pasó a ser encarada no como un material indeseable, más si que como una fuente de energía, principalmente por parte de las industrias que utilizan la madera como materia prima.

De entre las formas de utilizarse la biomasa forestal como fuente de energía, la densificación, compactación, o aglomeración proporciona una serie de ventajas, comparada con su utilización en el estado natural, principalmente en el tocante al acopiamiento, manoseo, aumento de la densidad y poder calorífico.

Características de la biomasa forestal como fuente de energía

Cuando se pretende utilizar la biomasa forestal, como fuente de energía, hay que conocer todas sus características, a modo de aprovechar todas las ventajas y eliminar los inconvenientes.

Las principales características que la biomasa presenta son la gran cantidad y la disponibilidad para uso inmediato.

Según evaluaciones efectuadas, los residuos forestales representan cerca del 30 por ciento del total de materia seca producida por 1 ha de floresta de eucalipto.

Los residuos de las industrias que tiene la madera como materia prima de acuerdo con estimativas efectuadas, alcanzaban 9,8 millones de metros cúbicos en 1985.

Las otras ventajas son:

- Bajo contenido de cenizas
- La biomasa es renovable y se distribuye por todo el mundo, bastando apenas un programa de forestación o reforestación

Pero a pesar de las ventajas, presenta las siguientes desventajas:

- Baja densidad
- Gran volumen
- Alto contenido de humedad
- Dimensiones heterogéneas
- Es de difícil colecta, acopiamiento y transporte

Los residuos industriales presentan mayor potencialidad para uso inmediato, debido al hecho de que estén concentrados en áreas junto a las industrias, pueden ser colectados con facilidad, tornando así una importante y económica fuente de materia prima para producción de combustible densificado.

Los residuos forestales, a pesar de ser más difíciles de colectarse, no deben ser despreciados, pues ellos podrán contribuir cuando los residuos industriales no son suficientes para satisfacer a las necesidades energéticas o

podrán diversificar las fuentes de renta de la empresa, a través de la venta del excedente energético.

Densificación de la biomasa forestal

Una manera de eliminarse los inconvenientes que la biomasa forestal presenta es a través del proceso de densificación.

Con ese procedimiento se puede lograr:

- Combustible uniforme, limpio
- Mayor densidad
- Humedad uniforme
- Poder calorífico elevado
- Quema uniforme
- Mayor rendimiento en la eficiencia de quema y liberación de calor

Procesos de densificación de biomasa

Básicamente los procesos de densificación de biomasa consisten en la aplicación de presión a una masa de partículas con o sin la adición de ligantes o tratamiento térmico.

Los procesos comerciales de densificación de biomasa son:

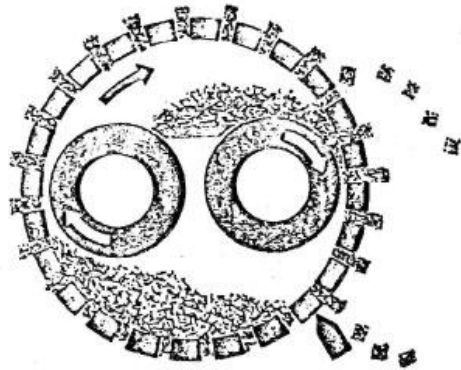
- Peletización - (usado en la manufactura de alimentos balanceados), emplea una matriz de acero perforada con un denso arreglo de orificios de 0,3 a 1,3 centímetros de diámetro (Fig. 32). La matriz gira y la presión interna de los cilindros fuerzan el pasaje de la biomasa a través de los orificios con presiones de 7,0 kilogramo por milímetro cúbico. El pellet

entonces formado es cortado por cuchillos ajustados a largura deseada. Serie Técnica IPEF, Piracicaba, v.1, n.2, p.C.1 – C.9, Jul.1980.

- Cilindros o cubos - y una modificación de la peletización, la cual producen grandes cilindros o cables de 2,5 a 5 centímetros de diámetro.
- Briquetaje - compacta la biomasa entre cilindros con cavidades, produciendo formas como el carbón briquetado. Las dimensiones varían de 15-250 milímetros de largo, con diámetro de 50 milímetros.
- Extrusión – usa una rosca para forzar la biomasa bajo alta presión contra una matriz, formando grandes cilindros de 2,5 a 10 centímetros de diámetro. Agentes ligantes como piche o parafina son frecuentemente agregados para aumentar la fuerza estructural y el poder calorífico. Material extrudado, es ampliamente disponible en los supermercados americanos, tienen una gravedad específica de 1,0. (Figura 33).

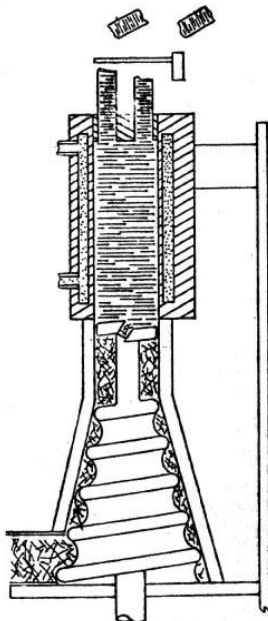
Aunque las técnicas de densificación sean anchamente practicadas, pocas informaciones sobre el mecanismo por la cual la biomasa alcanza altas densidades son disponibles.

Figura 32. **Proceso de peletización**



Fuente: REED (1978). Serie Técnica IPEF, Piracicaba, v.1, n.2, p.C.1 – C.9, Jul.1980.

Figura 33. **Proceso de extrusión**



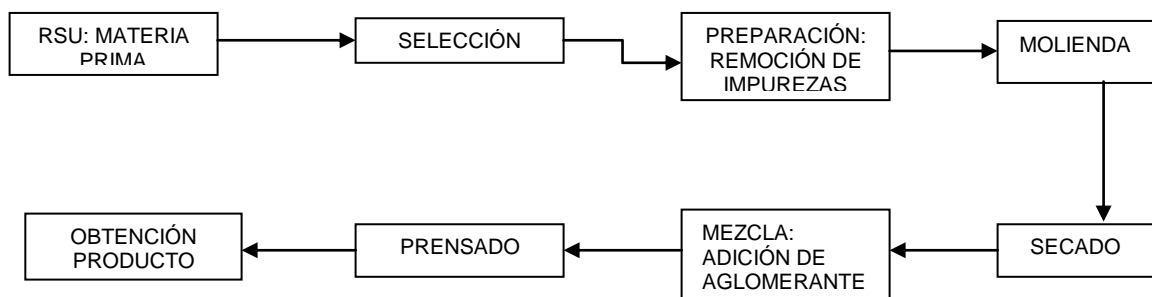
Fuente: REED (1978). Serie Técnica IPEF, Piracicaba, v.1, n.2, p.C.1 – C.9, Jul.1980.

Asimismo, existe otro método en el cual se produce un leño sintético de bajo costo y amigable al ambiente, mezclando cartón encerado especialmente procesado u otros papeles recubiertos con cera en variadas proporciones con un ligante/combustible. El ligante/combustible consiste de una cera de petróleo o una mezcla de ceras cuya naturaleza y proporciones son modificadas adecuadamente por la mezcla *in situ* con la cera parafínica ya presente en el cartón encerado. También pueden agregarse aserrín u otros rellenos de madera.

Después de una mezcla cuidadosa de los materiales, la mezcla resultante es extruida, moldeada, comprimida o conformada de otro modo, de modo que la masa resultante sea lo suficientemente sólida para mantener su forma a temperatura ambiente normal.

De una manera general, las principales diferencias entre los procesos consisten en el tamaño del material densificado, equipo utilizado, grado de molienda de materia prima, temperatura y presión utilizadas.

Figura 34. **Secuencia básica del proceso de densificación**



Fuente: elaboración propia.

Balance energético

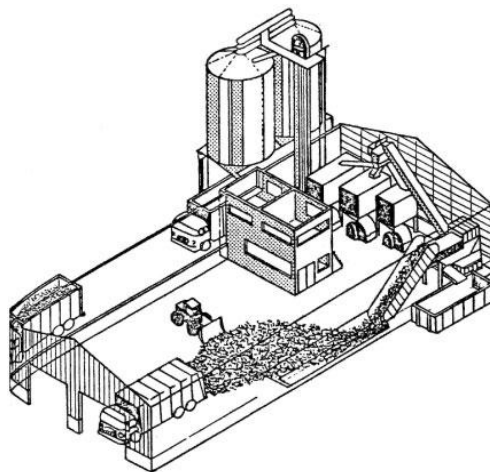
La energía requerida para la densificación dependerá del contenido de humedad, tamaño y tipo del material densificado, equipo usado, etc.

El consumo de energía oscila entre 10 a 20 por ciento del contenido energético del material. Así una materia prima que contiene 100 unidades de energía al final del proceso presenta 80 a 90 unidades, pues lo restante fue consumido por el proceso.

La mayor parte de la energía necesaria es utilizada para el secado del material.

La Tabla XXV presenta el balance de energía de una industria con capacidad de producción de 300 T. de pellet/día.

Figura 35. Unidad típica de peletización



Fuente: Reed (1978). Serie Técnica IPEF, Piracicaba, v.1, n.2, p.C.1 – C.9, Jul.1980.

Tabla XXV. **Balance de energía* para la producción de 300 t./día de pelet**

Energía contenida en la biomasa 540 T. casca (50% U)	1.076.544.000
Necesidad de energía del proceso	14.868.000
Pulverización: 6 molinos (50hp cada)	182.952.000
Peletización: (337 T. casca 20% U) 2 molinos peletizadores 600 hp	29.736.000
Total de energía para el proceso:	227.556.000
Entrada total de energía: (biomasa + proceso)	1.304.100.000
Producto: 300 t. (10% U):	1.209.600.000
Eficiencia energética del proceso:	92,7%

* En kcal

Fuente: http://www.ferrazmaquinas.com.br/esp/desinficacion_biomasa.htm. 03/03/2011.

D.3. WASTE TO ENERGY (WTE)

De residuos a energía

De residuos a energía (WTE) o la energía de los desechos (EFW) es el proceso de creación de energía en forma de electricidad o calor a partir de la incineración de los residuos sólidos. Es una forma de recuperación de energía. La mayoría de los procesos de “basura a energía” producen electricidad directamente de la combustión o producen combustibles, tales como metano, metanol, etanol o combustibles sintéticos.

Hay varias tecnologías nuevas capaces de producir energía a partir de la basura y otros combustibles sin necesidad de combustión directa. Muchas de estas tecnologías tienen el potencial de producir más energía eléctrica utilizando la misma cantidad de combustible que lo que sería necesario por combustión directa.

Esto es principalmente debido a la separación de componentes corrosivos (ceniza) del combustible convertido, por lo tanto, permite temperaturas más altas en hervidores, turbinas a gas, motores de combustión interna, celdas de combustión. Algunos son capaces de convertir eficientemente la energía en combustibles líquidos o gaseosos:

Tecnologías térmicas:

- Gasificación (produce gas combustible, hidrógeno, combustibles sintéticos)
- Despolimerización térmica (produce crudo sintético, el cual puede ser refinado)
- Pirolisis (produce combustibles de alquitrán, biooil, etc.)

- Proceso de gasificación por plasma (produce gas de síntesis incluidos hidrógeno y monóxido de carbono utilizables en celdas de combustible o para generación de electricidad para impulsar el arco de plasma, utilización en silicatos vitrificados y lingotes de metal, la sal y el azufre)

Tecnologías no térmicas

- Digestión anaeróbica (biogás rico en metano)
- Fermentación (producción de etanol, ácido láctico, hidrógeno)
- Tratamiento mecánico biológico (MBT)
 - MBT + Digestión anaeróbica
 - MBT para derivados de combustibles

D.3.1. GASIFICACIÓN

La gasificación es un proceso termoquímico en el que un sustrato carbonoso (carbón, biomasa, plástico) es transformado en un gas combustible mediante una serie de reacciones que ocurren en presencia de un agente gasificante (aire, oxígeno, vapor de agua o hidrógeno).

La composición del gas es muy dependiente de las condiciones en las que se realiza la gasificación pero suelen ser ricos en monóxido de carbono y/o hidrógeno, con contenidos menores de dióxido de carbono, metano y otros hidrocarburos. El sustrato carbonoso de origen y el agente gasificante son los parámetros que determinan el mayor o menor contenido en energía (poder calorífico) del gas.

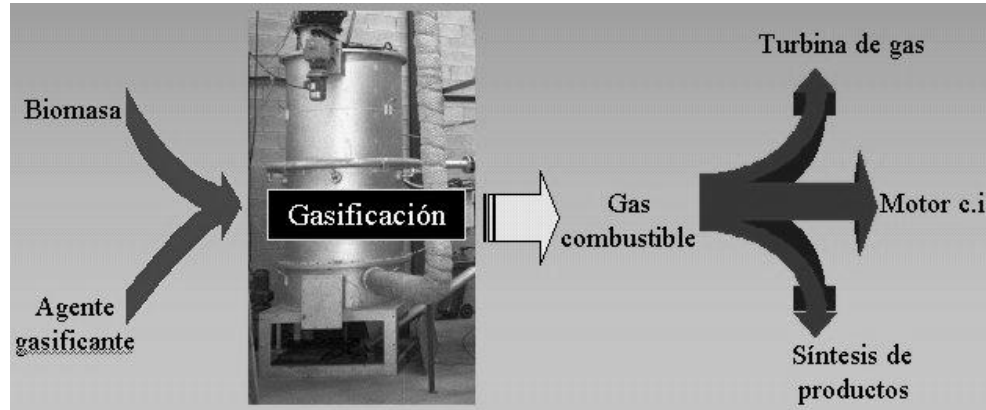
Históricamente la gasificación ha sido llevada a cabo con aire, proceso que produce un gas pobre con poder calorífico muy bajo. Tal es el caso del gasógeno, dispositivo instalado en el vehículo para producir gas a partir de

carbón y que fue muy utilizado en España tras la Guerra Civil Española por las dificultades de abastecerse de petróleo en el mercado mundial. La energía del gas de gasificación aumenta al utilizar otros agentes gasificantes, siendo el poder calorífico ascendente en el siguiente orden de agentes gasificantes: oxígeno, vapor de agua e hidrógeno.

- Con oxígeno (O_2): se forma CO
- Con aire: se forma CO + N_2
- Con oxígeno (O_2) y agua (H_2O): se forma CO + H_2
- Con aire y agua (H_2O): se forma CO + H_2 + N_2 (simultánea)
- Con aire y agua (H_2O): se forma CO + N_2 y, separadamente CO + H_2 (sucesiva)
- A presión y con catalizadores: se forma CH_4 .

El aprovechamiento energético de este gas de gasificación puede realizarse por combustión en calderas o en sistemas de co-combustión indirecta, introduciéndolo en una turbina de gas, un motor de combustión interna o en una pila de combustible.

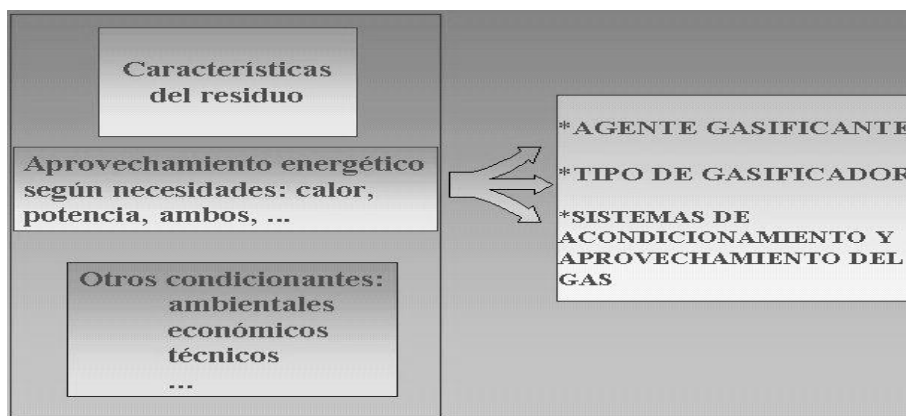
Figura 36. **Proceso de gasificación**



Fuente: <http://www.cps.unizar.es/~proter/Gasificaci%F3n.htm>. 03/03/2011.

La elección del método para llevar a cabo el proceso de gasificación depende de varios factores como el tamaño y forma del residuo, el aprovechamiento de la energía del gas producido que vaya a hacerse y, por supuesto, de los condicionantes económicos.

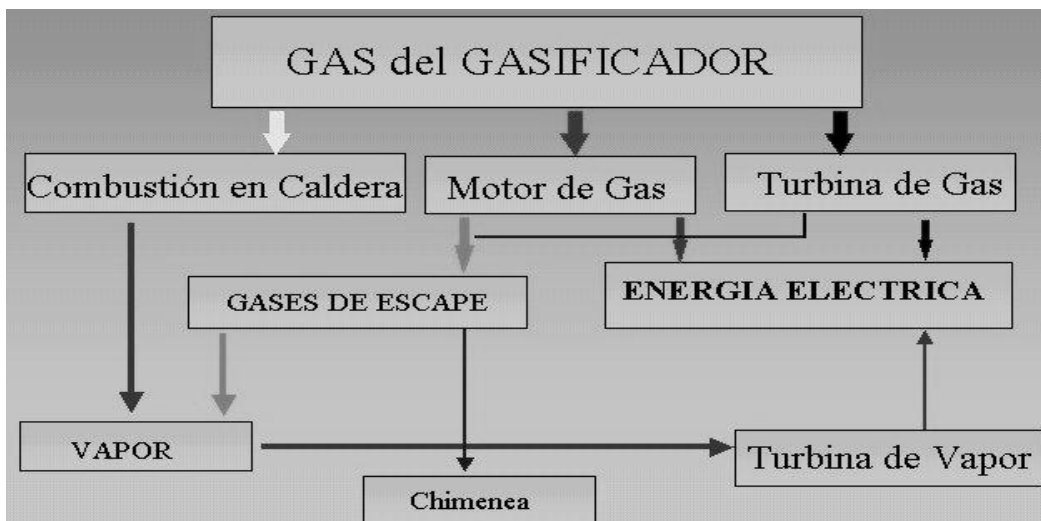
Figura 37. **Condicionantes del método de gasificación**



Fuente: <http://www.cps.unizar.es/~proter/Gasificaci%F3n.htm>. 03/03/2011.

Por su parte el aprovechamiento energético de este gas pobre puede hacerse quemándolo inmediatamente en una cámara de combustión, o introduciéndolo en una turbina de gas o un motor de combustión interna.

Figura 38. **Aprovechamiento energético**



Fuente: <http://www.cps.unizar.es/~proter/Gasificaci%F3n.htm>. 03/03/2011.

El agente gasificante puede ser tanto aire, oxígeno, aire enriquecido con oxígeno, vapor de agua o hidrógeno, de modo que se obtienen diferentes mezclas de gases que a su vez pueden tener diferentes utilidades.

Figura 39. Agentes gasificantes

AGENTE GASIFICANTE	PCS (MJ/m ³)	COMPOSICION DEL GAS OBTENIDO (% en volumen)						USO
		H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂	C ₂	
Aire	< 6	16	20	12	2	50	-	combustible
Oxígeno	10-20	32	48	15	2	3	-	combustible gas de síntesis
Vapor de agua	10-20	50	20	22	6	-	2	combustible gas de síntesis
Hidrógeno	>30							sustituto del gas natural

Fuente: <http://www.cps.unizar.es/~proter/Gasificaci%F3n.htm>. 03/03/2011.

Algunas de las ventajas del proceso de gasificación son:

- Versatilidad en la valorización del residuo, ya que se puede aprovechar la energía que contiene en forma de calor, electricidad o como gas de síntesis para la obtención de productos químicos.
- Buen rendimiento eléctrico, en el caso de que esa sea la vía más adecuada para el aprovechamiento del residuo.
- Menor impacto ambiental.

D.3.2. DESPOLIMERIZACIÓN TÉRMICA

Neumáticos, bolsas de plástico, desechos hospitalarios, ordenadores viejos e incluso armas biológicas son algunos de los desechos de carbono que pueden transformarse en petróleo, según la empresa norteamericana *Changing World Technologies* (CWT), que pondrá en funcionamiento una nueva técnica,

denominada despolimerización térmica, potencialmente capaz de transformar la basura en gasolina.

La técnica consiste en imitar la forma en que la tierra produce hidrocarburos a partir de la materia orgánica biodegradable, si bien en un tiempo mucho más corto: dos horas, frente a los millones de años que emplea nuestro planeta para obtener el mismo resultado.

Para CWT, esta tecnología es capaz de resolver algunos de los más agudos problemas ecológicos, como la polución y la gestión de los residuos, particularmente los tóxicos, ya que el procedimiento aplicado los volvería inofensivos.

CWT toma los desperdicios y los hace pasar por unos cubos a presiones y temperaturas diferentes (entre 250 y 500 grados centígrados) con la finalidad de convertir las cadenas de carbono en pequeños trozos que se recomponen a la salida del proceso.

En realidad la tecnología no es nueva, ya que desde los años 80 se sabe que la biomasa puede ser despolimerizada y que los residuos orgánico biodegradables son susceptibles de ser transformados en hidrocarburos, pero hasta ahora se había descartado porque consumía más energía que la era capaz de producir.

CWT ha conseguido resolver este problema utilizando agua en vez de energía para la transformación de la basura en petróleo, consiguiendo así una tasa de conversión de la energía del 85 por ciento, de los que únicamente el 15 por ciento se consume en el proceso.

En los medios industriales hay gran expectación por conocer las primeras aplicaciones innovadoras de esta tecnología, aunque también hay reservas sobre las posibilidades reales de que consiga todo lo que se propone. De resultar factible y rentable, esta tecnología puede revolucionar el mercado de la energía en el mundo.

El proceso de despolimerización térmica consta de dos etapas. Primero se muele la materia prima y se super-hidrata para conducirla a un tanque donde se cocina durante 15 minutos a 260 grados centígrados y 40 atmósferas de presión. En este tanque se produce una despolimerización parcial (ruptura de cadenas carbonadas largas en moléculas de menor longitud). La segunda etapa consiste en una rápida despresurización que contribuye a eliminar el 90 por ciento del agua contenida en la sopa orgánica biodegradable y permite además la precipitación de los minerales que serán vendidos como fertilizantes. El remanente es conducido a un segundo reactor donde se lo somete a temperaturas cercanas a los 500 grados centígrados para continuar la ruptura de las cadenas moleculares largas.

Por último se pasa a una serie de columnas de destilación donde, según procedimientos ampliamente utilizados en la industria química, se obtienen gases combustibles, petróleo liviano, petróleo pesado, agua y carbón en polvo. Las condiciones del proceso varían según las diferentes materias primas; así también lo hacen los diferentes productos finales: se han obtenido ácidos grasos, ácido clorhídrico y diferentes proporciones en la relación entre los minerales y los combustibles. Como el proceso trabaja a nivel molecular, se destruyen los agentes patógenos y el agua puede reciclarse hacia las napas freáticas sin que se corra el riesgo de contaminarlas.

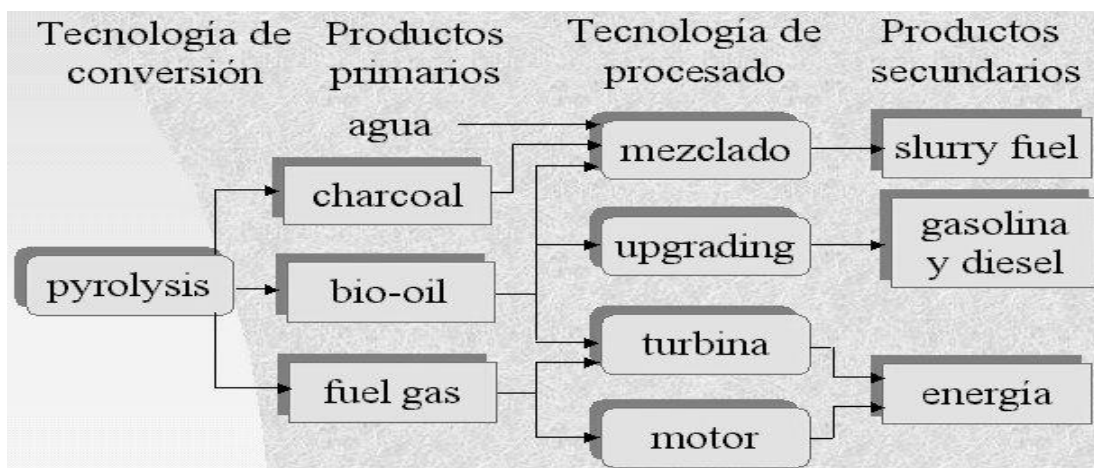
D.3.3. PIRÓLISIS

La pirólisis se puede definir como la descomposición térmica de un material en ausencia de oxígeno o cualquier otro reactante. Esta descomposición se produce a través de una serie compleja de reacciones químicas y de procesos de transferencia de materia y calor. La pirólisis también aparece como paso previo a la gasificación y la combustión.

Se puede considerar que la pirólisis comienza en torno a los 250 grados centígrados, llegando a ser prácticamente completa en torno a los 500 grados centígrados, aunque esto está en función del tiempo de residencia del residuo en el reactor.

A partir de la pirólisis pueden obtenerse diferentes productos secundarios útiles en función de la tecnología de tratamiento que se utilice.

Figura 40. **Productos de la pirólisis**



Fuente: <http://www.cps.unizar.es/~proter/Gasificaci%F3n.htm>. 03/03/2011.

Los productos primarios formados son los siguientes (en diferentes proporciones según el proceso empleado):

- Gases: compuestos principalmente de CO, CO₂, CH₄, C₂H₆ y pequeñas cantidades de hidrocarburos ligeros.
- Líquidos: compuesto por una gran mezcla de distintos productos como pueden ser: cetonas, ácido acético, compuestos aromáticos, y otras fracciones más pesadas.
- Sólidos: el producto sólido de la pirólisis es un residuo carbonoso (char) que puede ser utilizado como combustible o para la producción de carbón activo.

Existen diferentes tipos de Pirolisis en función de las condiciones físicas en las que se realice. Así, factores como la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia, la presión, etc, tienen una influencia muy grande en la distribución de productos que se obtienen.

Figura 41. Tipos de pirólisis

PIRÓLISIS	TIEMPO RESIDENCIA	VELOCIDAD CALENTAMIENTO	PRESIÓN BAR	TEMPERATURA °C MAX	PRODUCTO MAYORITARIO
Carbonización	Horas-días	Muy baja	1	400	Sólido
Convencional	5-30 min	Baja	1	600	Gas líq. y sólido
Fast	0.5-5 seg.	Muy alta	1	650	Líquido
Flash-líquido	< 1 seg.	Alta	1	< 650	Líquido
Flash-gas	< 1 seg	Alta	1	> 650	Gas
Ultra	< 0.5 seg	Muy alta	1	1000	Gas P. Químico
Vacío	2-30 seg	Media	< 0,1	400	Líquido

Fuente: <http://www.cps.unizar.es/~proter/Gasificaci%F3n.htm>. 03/03/2011.

La carbonización es quizá el proceso de pirólisis conocido desde hace más tiempo de todos los mostrados en el cuadro anterior, y el que más importancia tiene industrialmente para la producción de carbón vegetal. Esta carbonización se puede llevar a cabo en diferentes tipos de instalaciones.

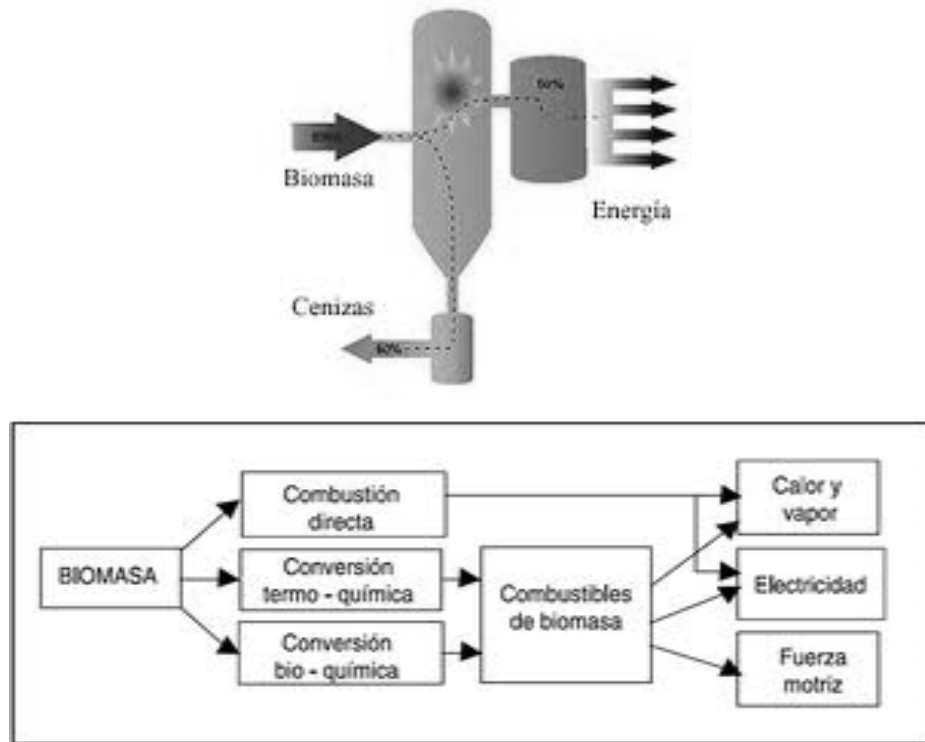
Figura 42. **Carbonización**

SISTEMA	VENTAJAS	INCONVENIENTES
Apilamiento	Poca inversión Capacidad muy variable Cualquier lugar	Poco control Producto muy heterogéneo Coste de mano de obra
Horno de ladrillo	Bine aislado, resiste a la corrosión Manejo fácil Larga vida Producto homogéneo	Preparación del material Capacidad fija Enfriamiento lento, ciclo largo
Horno de metal	Posibilidad de movilidad Enfriamiento rápido, ciclo corto	Baja vida Inversión más alta
Continuo	Gran homogeneidad Recuperación energía Automatización	Tecnología más compleja

Fuente: <http://www.cps.unizar.es/~proter/Gasificaci%F3n.htm>. 03/03/2011.

Actualmente la investigación sobre la pirólisis se lleva a cabo sobre materias primas variadas, como pueden ser los residuos agrícolas y forestales, los residuos sólidos urbanos o los neumáticos.

Figura 43. **Proceso de pirólisis**



Fuente: <http://www.google.com.gt/images?hl=es&q=pirólisis&um=1&ie=UTF-8&source=og&sa=N&tab=wi&biw=1024&bih=407>. 04/03/2011.

D.4. **RECICLAJE QUÍMICO**

Como una alternativa al reciclaje físico (mecánico) se puede realizar el reciclaje químico, el cual, implica cambios en la estructura química del material. El reciclaje químico se basa en una reacción química específica variable. Además, permite utilizar al desecho plástico como fuente de materia prima, no sólo para producir nuevamente el material original (como material virgen), sino producir otros materiales con diferentes características. Para llevar a cabo el reciclaje químico, es necesario disponer de grandes cantidades de residuos

plásticos limpios, separados y homogéneos para poder garantizar la calidad del producto final.

El reciclaje químico es un proceso mediante el cual se produce la descomposición del polímero para obtener los componentes de partida (monómeros). El reciclaje químico puede realizarse mediante diferentes procesos que pueden clasificarse en: despolimerización térmica, solvolisis, disolución, y valorización energética.

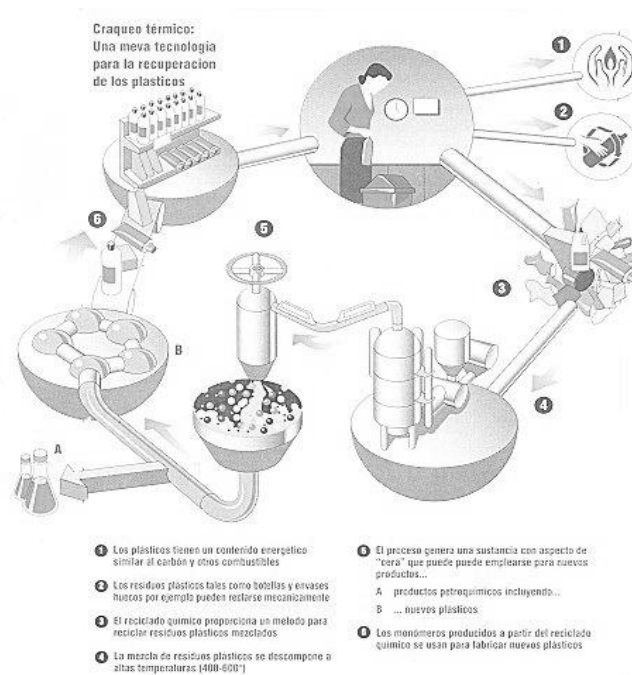
A partir de estos monómeros, y tras un nuevo proceso de polimerización, se obtienen nuevos materiales poliméricos, lo que se conoce como alcoholis. En el segundo caso, conocido como pirólisis, las materias primas pueden ser utilizadas para diferentes tipos de reacciones químicas incluida la producción de polímeros. La quimiólisis es aplicable a ciertos polímeros de condensación como los poliésteres, poliuretanos, poliamidas y poliacetales. Si se recoge una cantidad suficiente de residuos de un material homogéneo y de alta calidad, estos polímeros pueden entonces convertirse nuevamente en monómeros y volver a polimerizarse.

Se distinguen nueve grandes grupos de polímeros que pueden someterse al reciclado químico; los polímeros de adición (PE; PP; PVC; PS; Polimetilmetacrilato, PMMA) se tratan principalmente con la despolimerización térmica; mientras que los polímeros de condensación (PET; Poliamidas, PA; PC; Poliuretano, PUR) aceptan la mayoría de los tratamientos químicos.

Ventajas del reciclaje químico:

- Muy competitivo económicamente
- Selección y lavado previo innecesarios
- Eliminación de tapas o etiquetas innecesaria
- Sencilla adaptación de las plantas de reciclaje ya existentes para el proceso químico.

Figura 44. Craqueo térmico



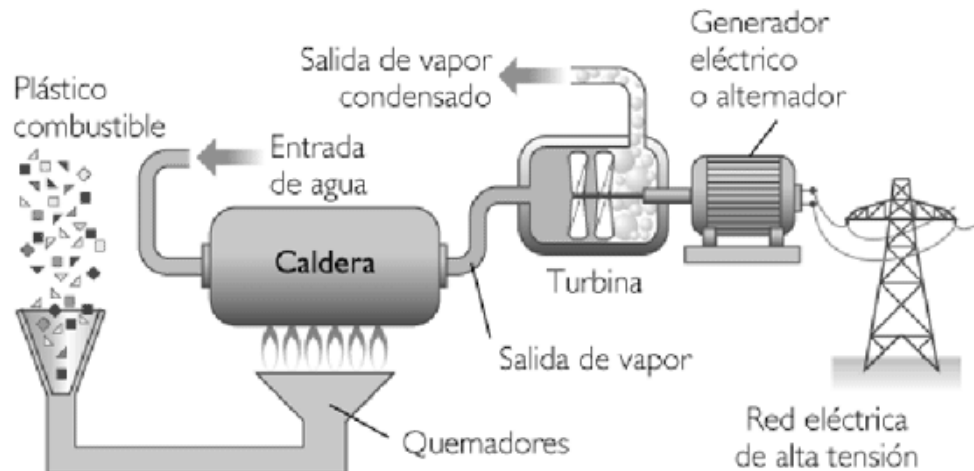
Fuente: <http://www.plastunivers.com/gif/pc/Revista/47b/r47bs6f01.jpg>. 04/03/2011.

D.5. INCINERACIÓN

La incineración de los residuos sólidos logra una importante reducción de volumen, dejando un material inerte (escorias y cenizas) de cerca del 10 por ciento del inicial. El proceso, que se realiza en hornos especiales, emite gases durante la combustión, por lo que una inadecuada combustión generará humos, cenizas y olores indeseables. La técnica de incineración, a excepción de cuando se usa en los residuos hospitalarios, no es recomendable para los países en desarrollo como el nuestro, y menos aún para las pequeñas poblaciones, debido a las siguientes causas:

1. Se requiere de un elevado capital inicial
2. Altos costos operativos
3. Se necesitan técnicos bien calificados, que son escasos. Su operación y mantenimiento son complejos y presentan muchos problemas
4. No es flexible para adaptarse a tratar mayores cantidades adicionales
5. En ocasiones se requiere de combustible auxiliar, ya que el poder calorífico de la basura es bajo porque contiene mucha humedad
6. Se requieren equipos de control para evitar la contaminación del aire
7. Disponibilidad del terreno (relleno sanitario), con posibilidad de afrontar los costos de las tecnologías apropiadas

Figura 45. **Proceso de reciclado energético**



Fuente: <http://knol.google.com/k/jorge-luis-bre%C3%B1a-or%C3%A9/los-pl%C3%A1sticos-en-el-siglo-xxi/2ydkxmcacjfn6/57#>. 04/03/2011.

D.6. LADRILLOS DE BASURA

Uno de los grandes retos que se plantea la humanidad es qué hacer con toda la basura y residuos que acumulamos día a día de una manera insostenible y que constantemente va creciendo. Uniendo la búsqueda de una solución a este problema con la de otros como la reducción del consumo energético en la fabricación de nuevos materiales han creado un ladrillo y está hecho de basura en un 100 por ciento. Este bloque es más resistente que uno de las mismas características de cemento, y requiere menos energía para su fabricación que un ladrillo de arcilla, además de ser mucho más barato

Figura 46. **Ladrillo de basura**



Fuente: <http://todosustentable.wordpress.com/tag/arquitectura-sustentable.04/03/2011>.

El *Bitublock* está compuesto de partículas de vidrio, escoria metalúrgica, lodo del alcantarillado, ceniza producida por los incineradores industriales y ceniza de combustible pulverizado de las centrales eléctricas, todo esto conglomerado con un pegajoso betún. Son materiales que se han catalogado siempre como desechos inútiles porque tradicionalmente no ha habido manera de aprovecharlos, constituyendo todo un problema medioambiental.

Hay grandes expectativas con que este material revolucione la construcción y reemplace otros materiales que acarrear graves ataques al medio ambiente para su extracción, producción y posterior desecho en vertederos. Los vertederos pueden convertirse en las minas del futuro, donde localizar materiales muy económicos y altamente productivos, y la edificación puede solidificar, retener y reaprovechar residuos que en el medio ambiente podrían causar graves daños.

Forth de la Universidad de *Leeds*, junto con *Salah Zoorob*, de la Universidad de *Nottingham*, están trabajando en la creación del *Vegeblock*, a partir de desechos de aceite vegetal.

D.7. MOLIENDA DE LLANTAS

El aprovechamiento energético y materia prima para hornos en la industria cementera, con fundamento en el uso de la llanta usada como combustible alternativo al carbón en función de su potencial calorífico. Tiene además la posibilidad de sustituir un porcentaje del hierro utilizado en el proceso, por el contenido de acero en la llanta.

Figura 47. **Molienda de Llantas**



Fuente: <http://www.ekreciclaje.es.tl.04/03/2011>.

El aprovechamiento energético en termoeléctricas, utilizando el poder calorífico de la llanta usada para generar energía eléctrica. Se requiere utilizar la llanta pulverizada sin metal ni textil en lugar del carbón, a tamaños de malla 200 para asegurar la combustión total y la utilización de la infraestructura existente. Sobre esta condición especial no existen experiencias documentadas

a nivel internacional, lo cual confiere incertidumbre a la alternativa desde el punto de vista técnico para su aplicación.

La utilización de la llanta usada como materia prima para producción de pavimento asfáltico fundamentada en el reconocido éxito de su aplicación en países como Canadá, Estados Unidos y España, entre otros, con base en la adición de caucho pulverizado (malla 80/ malla 40) durante la fabricación de pavimento asfáltico.

El caucho de llanta pulverizado le proporciona al pavimento características de flexibilidad y elasticidad que aumentan su vida útil por lo menos en un 50 por ciento a un costo efectivo menor que el pavimento convencional. Su aplicación en la malla vial del Distrito, generaría ahorros importantes en el desarrollo de éstos programas. Como es una tecnología nueva sin desarrollo en país, se requiere de la implantación de estudios piloto y su validación para las condiciones locales.

Suministro de materias primas para usuarios del caucho, entre los cuales está la fabricación del asfalto especificada anteriormente; el mercado internacional y el mercado potencial nacional del caucho pulverizado como materia prima en diferentes procesos, entre ellos los moldeados de caucho y los pisos y alfombras. Hacia el futuro dependiendo de los costos de los combustibles utilizados a la fecha, se podrá suministrar la llanta fragmentada como combustible alterno o como materia prima para las empresas cementeras y de generación eléctrica.

Tabla XXVI.

Alternativas de aprovechamiento de llantas usadas

Nombre	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Descripción	Aprovechamiento energético y materias primas en fábricas de Cements Llanta fragmentada como combustible alternativo al carbón y materia prima (hierro) en los hornos de producción de cemento. Llanta fragmentada de tamaño 8" x 8" con textil y acero.	Aprovechamiento energético en calderas de termoeléctricas Llanta pulverizada como combustible alternativo al carbón en las termoeléctricas Caucho de llanta tamaño malla 200 sin textil ni acero.	Materias primas para producción de pavimento asfáltico Llanta pulverizada como aditivo en el ligante asfáltico para mejorar sus propiedades plásticas y de adherencia. Caucho de llanta tamaño malla 80 sint textil o acero	Trituración para generar materias primas para productos de caucho Utilización de caucho de llantas pulverizado como producto para la industria del caucho y obras civiles. Llanta entera.
Materia prima para el aprovechamiento				
Producto final	Energía Cemento con materia prima de la llanta (hierro)	Textil Acero Energía	Textil Acero Asfalto con caucho de llanta	Caucho tamaño malla 80 Textil Acero
Tecnología	Existente, con uso intensivo a nivel mundial.	Tecnología conocida y utilizada en diferentes compañías a nivel mundial. No existe experiencias reconocidas para la granulometría requerida - Se debe desarrollar investigación	Con amplio uso en E. U. Canadá y Europa. Sin embargo se debe desarrollar previamente la investigación con pilotos para establecer las condiciones locales.	Existente y de fácil implementación, con uso intensivo a nivel mundial. Todas las alternativas requieren de esta etapa en la utilización de la llanta.
Inversión inicial (USD x 10.)	1422	4,114	4,468	4,068
Costo unitario actual	USD0.87/MBTU	USD0.87/MBTU	USD 21.1/ton Pavimento	USD683/ton caucho malla 80
Costo unitario alternativa	USD1.90/MBTU= USD127/MBTU	USD5.75/MBTU (USD3.85/MBTU)	USD 14.1/ton Pavimento	USD238/ton caucho malla 80 (CIF USA) (USD 59.5/ton caucho malla 80 (CIF USA))
Viabilidad económica:	Unitaria D e i n f e r r a USD103/MBTU=USD/ton(3159-6.78hierro)=USD24.8/ton llanta (-USD0.40/MBTU=USD/ton/12.24-6.79hierro)=USD5.46/ton llanta -444/año (-98/año)	Unitaria D e i n f e r r a USD4.88/MBTU=USD/ton(196.8/ton caucho (-USD2.98/MBTU=-USD 20.1/ton caucho) 2.632/año (-1606/año)	Unitaria D e i n f e r r a USD7/ton Pavimento 16,384/año	Unitaria D e i n f e r r a Aprox:USD455/ton caucho (Aprox:USD533.5/ton caucho) 6,085/año (7,135/año)

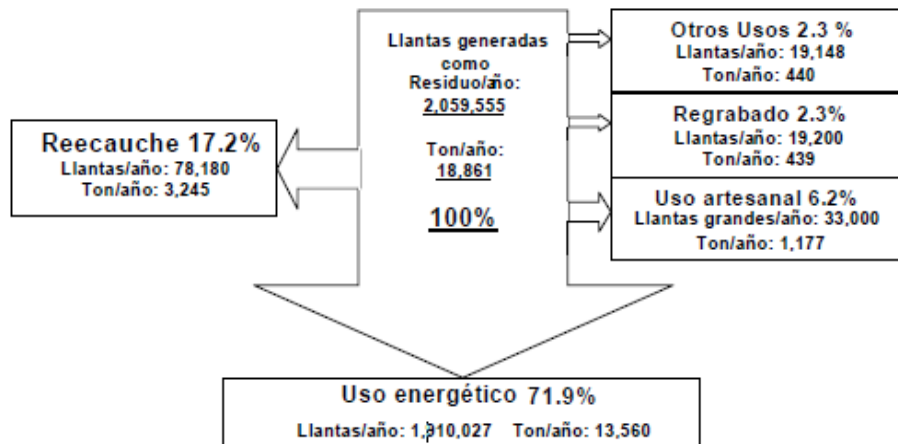
Fuente: unión Temporal OCADE LTDA./SANIPLAN/AMBIENTAL.

Tabla XXVII. Ventajas y desventajas de las alternativas

Item	Alternativa 1 Aprovechamiento energético y materias primas en fábricas de Cementos	Alternativa 2 Aprovechamiento energético en calderas de termoeléctricas	Alternativa 3 Materias primas para producción de pavimento asfáltico	Alternativa 4 Trituración para generar materias primas para productos de caucho	Situación actual/ horquilla panelera (85% en peso llanta)
Económico	Ventajas V/r agregado al residuo	V/r agregado al residuo	Disminución de costos asociados a los programas de pavimentación en la ciudad V/r agregado al residuo	Generación de ingresos por su exportación o utilización en nuevos mercados V/r agregado al residuo	Algunos sectores de la industria panelera utilizan la llanta como combustible con costos del orden de \$ 2200kg de llanta en el trapiche, equivalente a un 8% de valor de venta de la panela.
	Desventajas Costo de inversión alto sin rentabilidad	Altos costos de inversión sin rentabilidad	Costos asociados a estudio piloto	Ninguna	Existen aproximadamente 430 personas que laboran informalmente en toda la cadena de manejo de la cadena hasta el aprovechamiento con una ocupación entre el 10% y el 50% en esas labores. Los transportadores de la panela que venden la llanta a los trapiches la transportan como carga de compensación a su regreso de la ciudad. Los trapiches que utilizan la llanta lo realizan en combinación con el bagazo. CORPOICA adelanta proceso de tecnificación de los hornos para utilizar solamente bagazo.
Social	Ventajas Generación de Directo: 19	Generación de Empleo Directo: 15	Calidad de vida en la ciudad por mejores vías Generación de Empleo Directo: 50	Generación de Empleo Directo: 50	Grandes impactos ambientales y de salud pública. Los registros de salud señalan que el 50% de las 10 primeras causas de consulta en la región panelera tienen relación con efectos posibles por la combustión incompleta de la llanta en los trapiches
	Desventajas Pérdida gradual entre el 10% y el 50% de la ocupación de los trabajadores informales de la cadena de manejo de la llanta usada	Pérdida gradual entre el 10% y el 50% de la ocupación de los trabajadores informales de la cadena de manejo de la llanta usada	Pérdida gradual entre el 10% y el 50% de la ocupación de los trabajadores informales de la cadena de manejo de la llanta usada	Pérdida gradual entre el 10% y el 50% de la ocupación de los trabajadores informales de la cadena de manejo de la llanta usada	Grandes impactos ambientales y de salud pública. Los registros de salud señalan que el 50% de las 10 primeras causas de consulta en la región panelera tienen relación con efectos posibles por la combustión incompleta de la llanta en los trapiches
Ambiental	Ventajas Todos los componentes de la llanta quedan dentro del cemento- No quedan residuos de la llanta La empresa cementera estudiada tiene sistemas de control de emisiones que garantizan los niveles permisibles de emisión de acuerdo a la reglamentación vigente	La empresa cuenta con equipos de control que garantizan los niveles de vertimientos, emisión y manejo de residuos sólidos (escoria y cenizas)	No existe posibilidad de emisión de compuestos peligrosos	No existe posibilidad de emisión de compuestos peligrosos	Grandes impactos ambientales y de salud pública. Los registros de salud señalan que el 50% de las 10 primeras causas de consulta en la región panelera tienen relación con efectos posibles por la combustión incompleta de la llanta en los trapiches
	Desventajas Añe eventuales fallas en el sistema de combustión y/o de control de compuestos peligrosos	Quedan residuos de la llanta a disponer (emisiones de azufre en combustión y fibra en la fragmentación). Añe eventuales fallas en el sistema de combustión y/o de control de emisiones se pueden generar compuestos peligrosos	Se deben disponer residuos de la llanta (fibra) en la fragmentación	Se deben disponer residuos de la llanta (fibra) en la fragmentación	Se deben disponer residuos de la llanta (fibra) en la fragmentación
Actividades previas por el Distrito y la Secretaría Distrital de Ambiente para iniciar controles	Gestión para reglamentación de leyes Resoluciones complementarias para montaje de programa Fortalecimiento institucional para vigilancia y control	Gestión para reglamentación de leyes Resoluciones complementarias para montaje de programa Fortalecimiento institucional para vigilancia y control	Gestión para reglamentación de leyes Resoluciones complementarias para montaje de programa Fortalecimiento institucional para vigilancia y control	Gestión para reglamentación de leyes Resoluciones complementarias para montaje de programa Fortalecimiento institucional para vigilancia y control	Gestión para reglamentación de leyes Resoluciones complementarias para montaje de programa Fortalecimiento institucional para vigilancia y control

Fuente: unión Temporal OCADE LTDA./SANIPLAN/AMBIENTAL S.A.

Figura 48. **Distribución del aprovechamiento de las llantas usadas en la cadena de gestión (% en Ton)**



Fuente: <http://www.secretariadeambiente.gov.co/sda/libreria/pdf/residuos/2-Llantas.pdf>.

04/03/2011.

D.8. TIENDA ECOLÓGICA

Consiste en seleccionar y transformar los residuos sólidos reciclables para crear artículos decorativos y de uso doméstico de carácter ambiental y con diseños únicos no contaminantes, a escoger según necesidades y gustos.

Por medio de la tienda ecológica se contribuye a la disciplina social en el manejo responsable de los residuos sólidos.

Beneficios

- Reducir el volumen de basura
- Disminuir costos en recolección y transporte
- Prolongar la vida útil del relleno sanitario

E. DATOS CALCULADOS

Tabla XXVIII. **Propiedades físicas**

No.	Tipo de Camión	Peso Neto (Kg)	Densidad (Kg/m3)	Densidad Promedio (Kg/m3)
1	Domiciliar		177,05	
2	Domiciliar		182,95	
3	Domiciliar		241,80	
4	Domiciliar		180,21	
5	Domiciliar		173,68	
6	Domiciliar		177,50	
7	Domiciliar		171,30	
8	Domiciliar		183,28	
9	Domiciliar		179,45	
10	Domiciliar		179,06	
11	Domiciliar		179,80	
12	Domiciliar		178,21	
13	Industrial		177,05	
14	Industrial		170,65	
15	Industrial		188,96	
16	Industrial		172,61	
17	Industrial		270,49	
18	Mercado		189,29	
19	Mercado		176,35	
	Domiciliar			183,69
	Industrial			195,95
	Mercado			182,82

Fuente: datos originales.

Tabla XXIX. **Proporción de camiones que llegan al relleno sanitario**

TIPO	PORCENTAJE (%)
Domiciliares	46,21
De Mercado	7,59
Agroindustriales	41,00
Otros	5,51

Fuente: datos originales.

Tabla XXX. **Caracterización**

TIPO DE MATERIAL	PORCENTAJE(%)
Orgánico biodegradable	34,20
Madera	5,41
Papel	2,26
Cartón	8,98
PET	7,80
Plástico duro	3,18
Nylon	1,56
Cuero	2,99
Textil	9,52
Aluminio	1,41
Chatarra	2,45
Vidrio	0,59
Otros	19,65

Fuente: datos originales.

Tabla XXXI. **Caracterización domiciliar**

TIPO DE MATERIAL	PORCENTAJE(%)
Orgánico biodegradable	46,193
Madera	1,104
Papel	6,100
Cartón	18,600
PET	20,507
Plástico duro	2,734
Nylon	4,101
Cuero	0,000
Textil	0,132
Aluminio	0,042
Chatarra	0,089
Vidrio	0,018
Otros	0,380

Fuente: datos originales.

Tabla XXXII. **Caracterización industrial**

TIPO DE MATERIAL	PORCENTAJE(%)
Orgánico biodegradable	0,000
Madera	42,083
Papel	3,505
Cartón	15,315
PET	11,094
Plástico duro	1,479
Nylon	2,219
Cuero	0,000
Textil	21,571
Aluminio	0,000
Chatarra	0,168
Vidrio	0,140
Otros	2,426

Fuente: datos originales.

Tabla XXXIII. **Caracterización de mercado**

TIPO DE MATERIAL	PORCENTAJE(%)
Orgánico biodegradable	75,871
Madera	0,000
Papel	0,773
Cartón	6,956
PET	1,373
Plástico duro	0,183
Nylon	0,275
Cuero	0,000
Textil	0,390
Aluminio	1,274
Chatarra	0,000
Vidrio	0,664
Otros	12,242

Fuente: datos originales.

Tabla XXXIV. **Caracterización de góndola de alternativas ecológicas**

TIPO DE MATERIAL	PORCENTAJE(%)
Orgánico biodegradable	30,645
Madera	0,000
Papel	0,000
Cartón	0,000
PET	4,113
Plástico duro	0,548
Nylon	0,823
Cuero	0,000
Textil	0,000
Aluminio	0,000
Chatarra	0,000
Vidrio	0,000
Otros	63,871

Fuente: datos originales.

Tabla XXXV. **Propiedades fisicoquímicas**

Fecha	Hora	No.	Muestra	Tipo de Basura	Humedad (%)	Materia Orgánica Biodegradable (%)	Carbono (%)	Nitrógeno (mg/Kg)	Fósforo (mg/Kg)	Poder Calorífico (J/g)
27/09/2010 al 29/10/2010	14:07	1	S10-44	Cartón	63,94	53,35	30,94	785,04	80,70	12 206,00
	14:15	2	S10-45	Nylon	44,25	0,23	0,13	1 025,64	7,83	45 942,00
	13:15	3	S10-46	Papel	60,93	57,86	85,76	1 535,64	22,12	8 399,00
	13:54	4	S10-47	Textil	62,35	69,56	80,94	3 288,16	145,86	14 344,00
	13:30	5	S10-48	Madera	7,34	0,48	0,27	1 023,56	0,53	19 245,00
	13:57	6	S10-49	Aluminio	35,03	0,66	0,38	1 026,58	-----	-----
	13:48	7	S10-50	PET	9,87	59,10	34,27	262,66	1,301,07	40 098,00
	14:30	8	S10-51	Orgánica biodegradable	88,76	97,03	98,34	11 712,06	3,226,14	-141,00

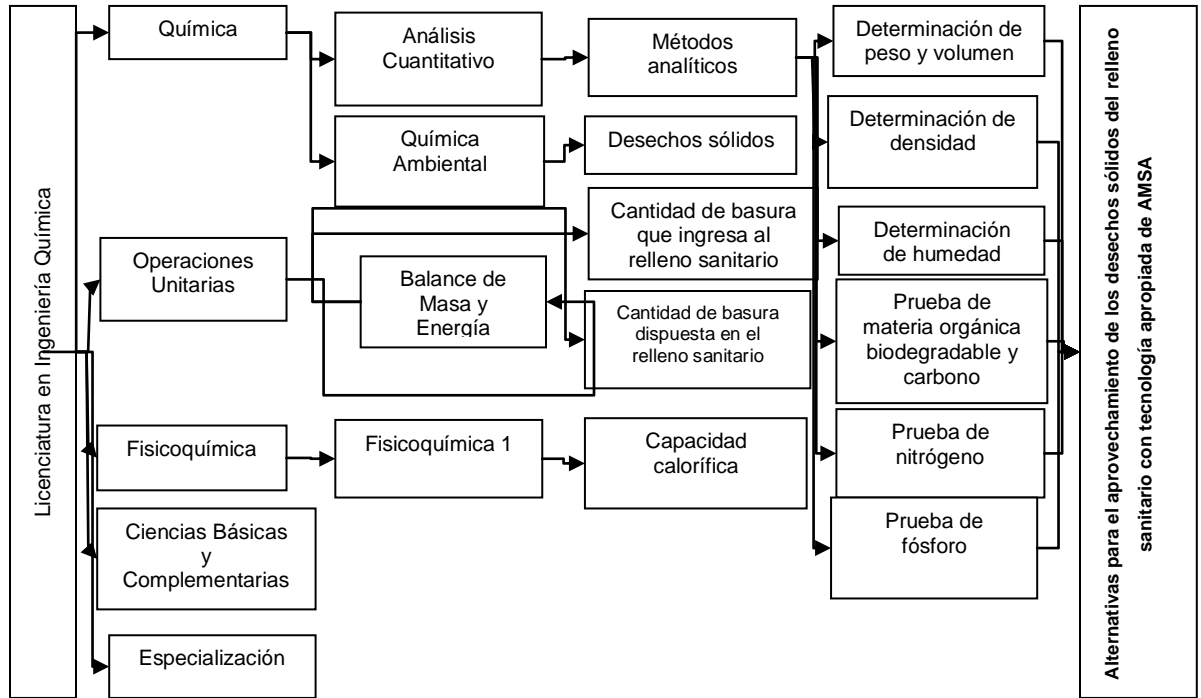
Fuente: datos originales.

ANEXOS

ANEXO 1
TABLA DE REQUISITOS ACADÉMICOS

FLUJOGRAMA

Figura 49. Requisitos académicos



ANEXO 2
ÁRBOL DE PROBLEMAS

Figura 50. **Árbol de problemas**



Fuente: elaboración propia.

ANEXO 3
MÉTODO SAKURAI

PROGRAMA REGIONAL OPS/EHP/CEPIS
DE MEJORAMIENTO DE LA RECOLECCION, TRANSPORTE Y
DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS SOLIDOS

CICLO : ASPECTOS BASICOS DEL SERVICIO DE ASEO

MODULO : ANALISIS DE RESIDUOS SOLIDOS

MANUAL DE INSTRUCCION

PREPARADO POR

Dr. Kunitoshi Sakurai

VERSION PRELIMINAR

Noviembre 1981

ANALISIS DE RESIDUOS SOLIDOS

Sumario

Se señala el objetivo del análisis de residuos sólidos y se indican las tendencias de evolución de la basura latinoamericana. En la segunda parte se discuten los métodos prácticos de muestreo de la basura y en la tercera parte se señala la teoría de muestreo que sirve de base en la planificación de la encuesta. La cuarta y quinta partes indican los métodos de análisis físico y químico de residuos sólidos, respectivamente. Los ítems discutidos en cada una de estas dos partes son peso, PPC, densidad, composición y humedad (en la parte IV), y H, C, N, P, K, sólidos volátiles, ceniza, poder calorífico superior y poder calorífico inferior (en la parte V). Por último, la sexta parte se refiere al método sencillo del análisis de residuos sólidos que facilita el conocimiento mínimo de las características de la basura por los encargados del servicio de aseo en ciudades medianas y pequeñas.

Objetivo del aprendizaje

Se pretende capacitar a los encargados del servicio para planificar, ejecutar y evaluar una encuesta sobre la basura, analizando las características cuantitativas así como las cualitativas.

Nota

El manejo apropiado de residuos sólidos requiere una serie de análisis cuantitativos y cualitativos, no solo de sólidos sino también de gases y líquidos (por ejemplo gas y líquido percolado de rellenos). Sin embargo, este material no trata del análisis de gas ni de líquido percolado, trata únicamente del análisis de residuos sólidos domiciliarios. El tema del gas y líquido percolado deberá consultarse con otros materiales especializados.

PARTE I: INTRODUCCION

Parte V: Análisis químico de residuos sólidos

- 5.1 Prueba de hidrógeno y carbono
- 5.2 Prueba de nitrógeno (orgánico y amoniacal)
- 5.3 Prueba de fósforo (fosfatos)
- 5.4 Prueba de potasio (potasa)
- 5.5 Prueba de sólidos volátiles y ceniza
- 5.6 Prueba de poder calorífico superior e inferior

Parte VI: Método sencillo del análisis de residuos sólidos

- 6.1 Toma de muestras
- 6.1 Prueba de densidad
- 6.3 Prueba de composición física
- 6.4 Prueba de humedad
- 6.5 Método para estimar el poder calorífico de la basura

Bibliografía

Contenido

Parte I: Introducción

- 1.1 Objetivo del análisis de residuos sólidos
- 1.2 Tendencias de evolución de la basura latinoamericana
- 1.3 Normalización de los métodos de análisis

Parte II: Muestreo

- 2.1 Selección de la etapa para el muestreo
- 2.2 Método 1 - Muestreo en las fuentes
- 2.3 Método 2 - Muestreo en las veredas
- 2.4 Método 3 - Muestreo en los camiones recolectores
- 2.5 Método 4 - Método APWA

Parte III: Teoría de muestreo

- 3.1 Determinación de la población muestral
- 3.2 Población universal y unidades muestrales
- 3.3 Producción per cápita (PPC)
- 3.4 Teoría de muestreo (caso fórmula 1)
- 3.5 Ejemplos (caso fórmula 1)
- 3.6 Teoría de muestreo (caso fórmula 2)
- 3.7 Muestreo aleatorio con estratificación y muestreo sistemático
- 3.8 Flujoograma de la encuesta de residuos sólidos por muestreo

Parte IV: Análisis físico de residuos sólidos

- 4.1 Peso y PPC
- 4.2 Prueba de densidad
- 4.3 Prueba de composición física
- 4.4 Prueba de humedad

1.1 Objetivo del análisis de residuos sólidos

1.1.1 Los volúmenes de producción y características de residuos sólidos son muy variables, ciudad por ciudad, país por país, en función de los diferentes hábitos y costumbres de la población, de las actividades dominantes, del clima, de las estaciones y otras condiciones locales que se modifican con el transcurso de los años.

1.1.2 Estas variaciones influyen mucho en la búsqueda de la solución más apropiada a los problemas involucrados en las operaciones del servicio de aseo. Las operaciones básicas a las que es necesario dar solución son: el almacenamiento, la recolección y la disposición final.

1.1.3 En primer lugar es preciso, en el caso del almacenamiento, determinar las características que deben tener los receptáculos para almacenar los residuos sólidos en lo referente a su forma, tamaño y material, a fin de asegurar su fácil manejo y condiciones higiénicas. El tamaño se debe determinar en base a la frecuencia de recolección y al volumen de producción de basura per cápita per día (o a la densidad de la basura y producción de basura como la de América Latina, se debe reducir el uso de cajas de cartón como recipientes, ya que éstas se rompen fácilmente por el efecto de humedad causando problemas al derramarse la basura en las calles.

1.1.4 A continuación se debe determinar la frecuencia de recolección y seleccionar el tipo, capacidad, etc., de los vehículos recolectores a emplear. En la determinación de la frecuencia se necesita tener en cuenta los siguientes factores:

- Composición física de la basura (contenido de desperdicios y humedad)
- Condiciones climáticas
- Consideración sanitaria (ciclo de la mosca, etc.)
- Recurso disponible para la recolección

En el caso de la basura latinoamericana, se necesita una frecuencia de recolección de por lo menos dos veces por semana por su alto contenido de desperdicios y humedad.

En cuanto a la selección de los vehículos recolectores, es muy común en América Latina el uso de camiones compactadores ensambados con especificaciones para países industrializados o fabricados en estos países. En este caso, la sobrecarga de los vehículos es muy probable por la alta densidad de la basura latinoamericana, lo cual provoca el desgaste prematuro de los vehículos, sobre todo

de los resortes y ejes traseros. Por lo tanto, es muy importante seleccionar la combinación oportuna de cajas y chasis teniendo en cuenta las características de la basura en cuestión.

1.1.5 Finalmente, corresponde seleccionar el sistema de disposición final más conveniente. Esto debe hacerse desde el punto de vista sanitario y económico. De los distintos métodos de disposición final, el que parece ser el más adecuado a la realidad técnica y económica de América Latina es el relleno sanitario. Cuando se trata de seleccionar otros sistemas tales como compostificación, incineración y pirólisis, es indispensable analizar debidamente las características de la basura a disponer, a fin de identificar la factibilidad técnica y económica de estos sistemas en el medio.

1.1.6 En resumen, es indispensable que los funcionarios del servicio de aseo conozcan bien las características cuantitativas y cualitativas de los residuos sólidos actuales de su ciudad así como sus proyecciones futuras. Estos conocimientos son fundamentales para un debido cumplimiento de las siguientes tareas:

- Planeamiento adecuado del servicio de aseo a corto, mediano y largo plazo.
- Dimensionamiento del servicio de aseo.
- Selección de equipos y tecnologías apropiados.

El análisis de la basura tiene como objetivo el permitir conocer en forma fidedigna dichas características, al objeto de contar con los antecedentes necesarios para dar correcta solución a los problemas que se plantean.

1.2 Tendencias de evolución de la basura latinoamericana

1.2.1 Debido a la necesidad de un planeamiento a largo plazo, es imprescindible identificar, a través del análisis sistemático y periódico de la basura, las tendencias de evolución de sus características, tanto cuantitativas como cualitativas.

1.2.2 Aunque la información al respecto, en América Latina, es aislada e incompleta, es posible concluir que la PPC (producción per cápita por día) está aumentando anualmente, y que ese incremento está en relación con los mayores ingresos per cápita (IPC) como una consecuencia además de la llegada de la sociedad de consumo (ver la figura a continuación).

1.2.3 También se puede concluir que la evolución cualitativa de la basura latinoamericana seguirá la tendencia de los países industrializados - el incremento grande de papeles y plásticos, ligero en metales y trapos y la disminución de cenizas y material inerte. Se aprecia claramente esta tendencia en la basura de Sao Paulo como se muestra en la tabla 1.1.

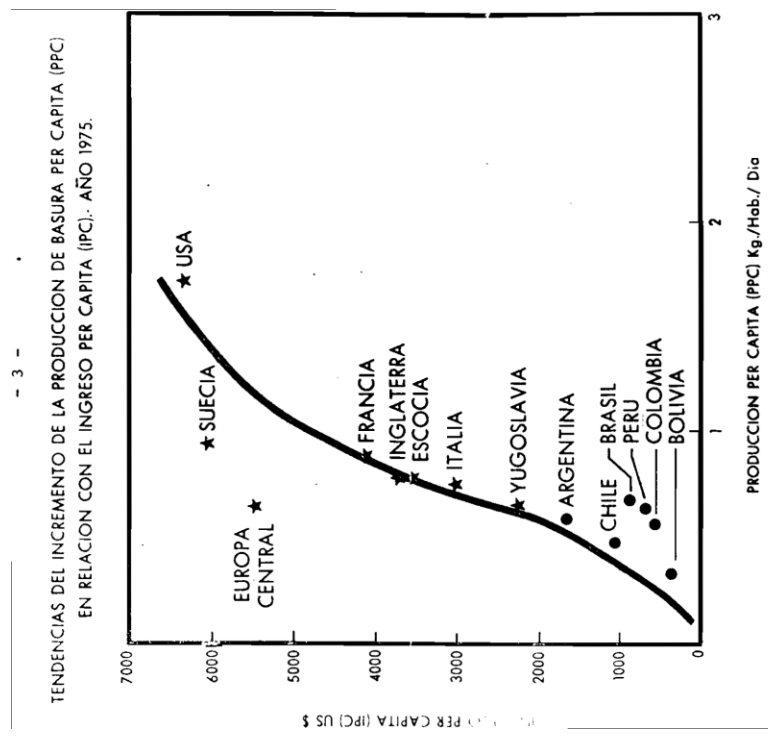


FIGURA 1.1
Fuente: ACURIO, G. & RUIZ, D. Desarrollo Institucional. Simposio Regional sobre Resechos Sólidos - Santo Domingo, República Dominicana, 13-17 Feb. 1978. EHP/OPS, 1978. 39 p. Serie técnica 21

EVOLUCION DE LA COMPOSICION DE LA BASURA EN SAO PAULO

Constituyentes	Años			
	1927 (%)	1957 (%)	1969 (%)	1972 Sudeste Región Sao Paulo (%)
Papel	13.4	16.70	24.7	21.8
Cartón	-	-	4.5	4.1
Madera	-	-	2.4	1.9
Trapos	1.5	2.00	2.4	3.4
Cuero	-	0.70	1.4	0.9
Caucho	-	-	-	0.6
Hueso	-	0.07	-	0.1
Plástico	-	-	1.9	4.3
Verduras y frutas	-	-	-	42.7
Follaje	-	-	-	4.1
Restos de alimentos	-	-	-	0.7
Animales muertos	-	-	-	0.1
Latas	1.3	2.10	7.8	3.9
Metales	0.4	0.13	-	0.3
Vidrio	0.9	1.40	2.6	2.1
Tierra y similares	-	-	-	9.0
Materia orgánica e inerte	82.5	76.00	52.2	-
Peso específico (kg/m ³)	500	300	230	215

Fuente: Lixo e Limpeza Pública da Faculdade de Higiene da USP - Sao Paulo, 1969

Si bien la densidad de la basura latinoamericana es superior a la de los países industrializados, la anterior está disminuyendo anualmente como resultado lógico de la evolución cualitativa arriba mencionada.

1.3 Normalización de los métodos de análisis

1.3.1 Es necesario normalizar los métodos de análisis de residuos sólidos para que sea posible un informe padronizado, así como la comparación de los resultados de ensayos ejecutados por diferentes ciudades. Asimismo, es muy importante que se mantengan los resultados obtenidos con los mismos métodos durante varios años, a fin de identificar las tendencias arriba mencionadas.

1.3.2 Los métodos de análisis de basura están todavía en proceso de desarrollo y no hay métodos normalizados para América Latina. Sin embargo, en el caso de ciudades grandes con suficientes recursos e instituciones investigadoras, tales como universidades, es preferible el uso de los métodos tentativos elaborados por el "Institute of Solid Wastes", órgano perteneciente a la "American Public Works Association (APWA)", evaluándolos a través de su uso cuidadoso, a fin de desarrollar métodos más uniformes y eficientes. Se presenta a continuación la lista de contenido de los métodos de APWA:

MÉTODOS TENTATIVOS DE ANÁLISIS DE RESIDUOS SÓLIDOS Y COMPOST

- Muestreo inicial
- Instrucciones generales
- Pruebas de humedad (agua)
 - Método de secado al horno
 - Método de rayos infrarrojos
- Prueba de sólidos volátiles y ceniza
- Prueba de lípidos (extracción de éter)
- Prueba de fibra cruda
- Prueba de azúcares
- Prueba de almidón
- Método antioma-ácido sulfúrico
- Método de la hidrólisis ácida directa
- Prueba de protefina
- Prueba del carbono
- Prueba del nitrógeno (orgánico y amoniacal)
- Método Kjeldahl-Wilfarth-Gunning
- Prueba de la relación carbono-nitrógeno
- Pruebas del fósforo (fosfatos)
- Pruebas del potasio (potasa)
- Método fotométrico de la llama
- Prueba de la concentración hidrogeniónica (pH)
- Prueba del poder calorífico superior
- Prueba del poder calorífico inferior
- Prueba del azufre
- Prueba del hidrógeno y carbono

Fuente: Municipal Refuse Disposal, Appendix A: Tentative Methods of Analysis of Refuse and Compost, Third Edition 1970, APWA

Nota: La versión en español de estos métodos se puede obtener de la CEPIS/OPS pagando el costo de fotocopiado (34 páginas en total).

1.3.3 Generalmente los métodos de APWA son demasiado complicados y no son aplicables en ciudades latinoamericanas por la falta de laboratorios adecuados, así como de técnicos calificados. Por esto, es preciso desarrollar métodos más sencillos que estén dentro de nuestro alcance. Presentaremos más adelante los métodos modificados y simplificados de APWA para ciudades de recursos modestos (partes IV y V) y los métodos más sencillos para ciudades con escasos recursos (Parte VI).

1.3.4 Otro problema que se agrava de año en año es el de los residuos sólidos industriales, especialmente los peligrosos. En algunos países de América Latina este problema ya es bastante serio exigiendo una pronta solución, tanto correctiva como preventiva. Las características de los residuos sólidos industriales son más variables que las de la basura domiciliaria, por eso se hace más necesario conocer el material con el cual se debe trabajar para poder dar solución a este problema.

Se recomienda que se trate de usar, dentro de lo posible, los métodos elaborados por la Agencia de Protección Ambiental de los E.U.A., adaptándolos a nuestro medio, a fin de facilitar la comparación de los resultados obtenidos en varios países. El siguiente material, elaborado por la mencionada Agencia, servirá de base para identificar el método apropiado de análisis de residuos sólidos peligrosos:

EPA. EPA. State decision - makers guide for hazardous waste management, Chapter 8, Waste sampling and analysis methods and leachate analysis methods. Washington, 1977.

2.1 Selección de la etapa para el muestreo

2.1.1 Generalmente la cantidad y la composición de la basura llevada al sitio de disposición final difieren considerablemente de las de la basura generada y/o recolectada debido a la activa recuperación de materiales, tales como: papeles, cartones, trapos, botellas y metales, según se muestra a continuación:

TABLA 2.1

PERDIDAS EN EL FLUJO DE BASURA	
ETAPA	FASE DE MANEJO DE BASURA
1	Generación (basura generada)
2	Recuperación por dueños de casa
3	Recuperación por sirvientes
4	Recuperación por basureros en las calles
5	Basura dispuesta por métodos no autorizados, e.g. en terrenos no usados o en drenes
6	Recolección (basura recolectada)
7	Recuperación por recolectores
8	Basura llevada a destino final no autorizado, e.g. chancherías
9	Transportación (basura llevada al sitio de disposición final)
10	Recuperación por personal de disposición final
11	Recuperación por basureros en los botaderos
12	Disposición final (basura dispuesta)

PARTE II: MUESTREO

2.1.2 Por tanto, es necesario seleccionar la etapa más apropiada para la toma de muestras, teniendo en cuenta el motivo del análisis. En algunos casos, e.g. cuando se trata de determinar el volumen necesario de recipientes de basura domiciliar o identificar el potencial de industrialización de la basura, se debe analizar la basura actualmente generada. Esto es posible mediante el muestreo en las fuentes, es decir en las etapas 2 a 3. Es casi imposible tomar la muestra antes de las etapas 2 y 3. En cambio, para diseñar los camiones recolectores y los rellenos es mejor tomar la muestra de la basura llevada al sitio de disposición final.

2.2 Método 1 - Muestreo en las fuentes

- 2.2.1 Este método procura tomar la muestra en la etapa 1, pero prácticamente se le toma después de las etapas 2 y 3.
- 2.2.2 Se zonifica la ciudad teniendo en cuenta las actividades dominantes, las vías arteriales así como la sectorización existente para la recolección de basura.

Se necesita establecer por lo menos las siguientes cuatro zonas:

- Zona comercial
- Zona residencial (I) Ingreso alto
- Zona residencial (II) Ingreso medio
- Zona residencial (III) Ingreso bajo

2.2.3 Se prepara la información básica para cada zona, tal como número de manzanas, número de viviendas, número de habitantes, etc.

2.2.4 En cada zona se debe tomar diariamente una muestra de más de 200 kgs de basura durante una semana completa puesto que hay una variación destacada dentro de ese plazo.

Si se suponen una PPC de 0.5 kg/hab/día y seis personas en cada vivienda, el número mínimo de viviendas a someter al muestreo será de 67 en cada zona ($200 \div (0.5 \times 6) = 66.7$).

2.2.5 En base a la regla básica arriba mencionada se determina el número de viviendas, cuadradas o manzanas en que se va a tomar la muestra y se les selecciona aleatoriamente, considerando además la disponibilidad de recursos para muestreo y análisis, así como la teoría de muestreo que explicaremos más adelante. En el caso de ciudades grandes de más de 500 mil habitantes, se debe tomar diariamente más de dos muestras de cada zona.

2.2.6 Después de la selección de viviendas, cuadradas o manzanas, se hace una visita explicativa del motivo y método de muestreo a cada ama de casa. Es preferible que esta visita la efectúen sociólogos, ya que ellos son más adiestrados en comunicación. También es muy importante que en esa visita se realice una encuesta sobre el número de habitantes en cada vivienda.

2.2.7 El programa de muestreo debe cubrir ocho días sucesivos y se debe descartar la muestra tomada el primer día de recojo, ya que la duración del almacenamiento para esa muestra no se conoce. La basura recolectada del segundo al octavo día representará la generación semanal de basura.

2.2.8 Los recolectores deben entregar una bolsa plástica a cada ama de casa a cambio de la bolsa llena de basura, marcándola para su identificación. Luego, llevar la bolsa en un camión abierto al depósito en donde se hará el pesaje, la medición del volumen y/o el análisis físico de la basura.

2.2.9 La desventaja más importante de este método la constituye el posible cambio del comportamiento del ama de casa en la generación de basura al conocer la realización del análisis.

2.3 Método 2 - Muestreo en las veredas

2.3.1 Este método procura tomar la muestra poco antes de la etapa 4, pero prácticamente se le toma en la etapa 4.

2.3.2 Este método consiste en tomar la muestra de los recipientes colocados en las veredas para el servicio normal de recolección. Está libre, prácticamente, de la desventaja del método 1. Sin embargo, este método presenta otro problema, especialmente en la etapa 4 antes mencionada (recuperación por basureros en las calles)

2.3.3 Los pasos 2.2.2 a 2.2.5 del método 1 también sirven para el método 2.

2.3.4 Se toma la muestra de basura de los recipientes colocados en las veredas de la siguiente manera:

- a. Se prepara un tambor de alrededor de 100 litros, que servirá para el muestreo y una balanza de pie.
- b. Se pesa el tambor y se mide su volumen.
- c. Se pone la basura en el tambor sin hacer presión y se remece de tal manera que se llenen los espacios vacíos en el mismo.
- d. Se pesa una vez lleno y por diferencia se obtiene el peso de la basura. La basura ya pesada se vierte en un camión abierto para su posterior análisis físico.
- e. Se pesa toda la basura de viviendas, manzanas o cuadradas programadas para muestreo, vaciándola después en un camión abierto.

2.3.5 A través del método arriba mencionado es posible tomar la muestra de basura de cada zona con datos de número de viviendas, número de habitantes y peso y volumen de basura.

2.4 Método 3 - Muestreo en los camiones recolectores

2.4.1 Se procura con este método tomar la muestra después de la etapa 9, es decir, se toma la muestra de los camiones recolectores que llegan al relleno sanitario o a la estación de transferencia.

2.4.2 Se prepara la siguiente información para cada ruta o sector de recolección:

- a. Característica del sector: comercial, residencial I, II o III.

b. Número de viviendas y habitantes.

c. Frecuencia y viajes asignados

{ e.g. dos veces por semana
1° viaje del camión A (chofer B); Lunes
1° viaje del camión A (chofer B); Jueves }

2.4.3 Se seleccionan aleatoriamente las rutas o los viajes para muestreo, de tal manera que se pueda lograr una muestra representativa de cada zona.

2.4.4 Se pesan todos los viajes en caso de contar con una balanza en el relleno o en la estación de transferencia. En caso contrario, se pesan al menos los viajes determinados para muestreo, cubriendo una semana completa y alquilando una balanza particular.

2.4.5 Se preparan dos canchas en el relleno o la estación de transferencia, una amplia donde el camión bote toda su carga y otra cercana a esta, de menor tamaño, para realizar la clasificación propiamente. Esta última debe tener una superficie de hormigón al objeto de evitar que la muestra se mezcle con tierra y sea de este modo alterada.

2.4.6 Una vez que el camión ha descargado los residuos sólidos, se comienza por homogenizar la carga, esto es, revolverla para evitar que se presenten sectores donde exista predominio de algún componente. Esta faena se realiza mediante palas, rastillos, etc.

2.4.7 Una vez concluida esta faena se procede a llenar cinco tambores de 1 m³ de 200 litros cada uno, para de este modo reunir el volumen de 1 m³. Los tambores se colocan en cada una de las cuatro esquinas del acopio de basura y el quinto en el centro mismo.

Los tambores deben llenarse en forma absolutamente aleatoria, sin ningún tipo de selección previa. Una vez colocado el tambor en el lugar establecido se llenará con el material que esté a su alrededor.

Los tambores se llenarán sin ningún tipo de compactación, para obtener así el volumen de 1 m³ de basura suelta.

2.4.8 Una vez llenos los tambores se pesan con una balanza de pie para medir la cantidad de basura que se someterá a análisis (peso total de la muestra). Posteriormente se vuelcan sobre la superficie de hormigón, quedando en condiciones de comenzar el trabajo de clasificación para la prueba de composición física.

2.5 Método 4 - Método APWA

2.5.1 Se procura con este método preparar la muestra inicial de basura para posteriores análisis, principalmente químicos.

2.5.2 A causa de la extraordinaria heterogeneidad y de la diversidad de tamaño de las partículas, las muestras iniciales han de ser relativamente grandes y los materiales deben estar muy bien mezclados. Se sugiere tomar como muestra inicial de materiales tales como residuos mixtos o desechos un cuarto de camión y, desde luego, no menos de 500 libras (unos 217 kilogramos).

2.5.3 A menos que las muestras sean tomadas en varias y distintas partes de la ciudad, la basura debe ser recolectada de un área que posea una contribución de diferentes tipos de basura y que presenten un promedio general.

2.5.4 El muestreo y la preparación de la muestra deben ser hechos rápidamente para evitar la modificación excesiva del contenido de humedad y también que se incie el proceso de descomposición.

2.5.5 La muestra debe ser molida en un pequeño molino o triturada inmediatamente después de su llegada. El material debe ser molido hasta que ninguna partícula exceda de 1 1/2 pulgadas.

2.5.6 Después de triturada la muestra debe mezclarse rápidamente sobre una superficie plana, limpia e impermeable con una pala.

2.5.7 El material debe ser dividido en cuartos y una pala llena retirada de cada cuarto. El contenido de cuatro palas debe ser bien mezclado como se explicara anteriormente y nuevamente cuarteado y de cada cuarto retirada una cantidad que, después de combinada, se enviará al laboratorio. Serán cerca de 5 kg que se utilizarán para los "Procedimientos de Laboratorio para Preparación" que se explican a continuación:

2.5.8 Según los métodos de la APWA todos los análisis de muestras se harán en duplicado, con excepción de la humedad y del pH, en que se secarán previamente hasta alcanzar un peso constante (70 - 75°C), se limpiarán de latas, pedazos de madera, trapos, piedras, arena, ladrillos, etc. y molidas, hasta pasar el tamiz de poros de 1 mm, usando un molino de cuchillos equipado con el tamiz de orificios de 1 mm. Después se guardarán en un frasco ámbar de boca grande con tapón rosqueado.

3.1 Determinación de la población muestral

- 3.1.1 En un programa de evaluación por muestreo la primera y más importante interrogante a responder es la referente al tamaño de la muestra.
- 3.1.2 Si el tamaño de la muestra es muy grande, los recursos se gastan innecesariamente y, si por el contrario es muy pequeña, los resultados son de escasa utilidad. Es necesario pues fijar un tamaño de muestra tal que los resultados a obtener reflejen con cierto grado de confianza y reducido porcentaje de error las condiciones prevalecientes en el universo poblacional.
- 3.1.3 Existen técnicas estadísticas para la determinación del tamaño adecuado de la muestra, según los requerimientos de cada caso. Por lo tanto, los técnicos encargados de la encuesta de residuos sólidos deben tener en cuenta la teoría de muestreo así como los objetivos de la encuesta y el recurso disponible. A continuación se presentan algunos conceptos de la teoría de muestreo, los cuales ayudarían a los técnicos arriba mencionados.
- 3.1.4 Esta parte complementa la parte II, los alumnos pueden omitirla en una primera lectura.
- 3.2 Población universal y unidades muestrales
- 3.2.1 Como Población universal se denomina el conjunto del cual se ha de tomar la muestra y, en este caso será aquella población a la cual se preste el servicio de recolección de basura. Es muy común en el estudio de la basura dividir la población universal en grandes estratos a fin de conseguir datos parciales para efectos de manejo y administración, además de datos globales.
- En el caso de la basura residencial, generalmente el criterio para la estratificación está determinado por la capacidad económica de la población.
- 3.2.2 Antes de seleccionar la muestra, la población universal o los estratos deben dividirse en partes llamadas unidades muestrales. Estas unidades deben cubrir la totalidad de la población o de los estratos y no se deben sobreponer, es decir, todo elemento de la población o de los estratos deberá pertenecer a una y solamente a una unidad.
- 3.2.3 Existen varias posibilidades para escoger la unidad de muestreo: pueden ser personas tomadas aisladamente, miembros de una familia, personas que vivan en una cuadra, manzana o barrio. Sin

PARTE III: TEORIA DE MUESTREO

embargo, es mucho más conveniente tomar como unidad a todas las personas que habitan una vivienda por ser éste el elemento al cual, en primera instancia, se presta el servicio. Esto no excluye la posibilidad de manejar otro tipo de unidad, todo dependerá de los recursos disponibles.

3.2.4 Para facilitar todo el proceso de selección de la muestra se necesita disponer de un mapa donde se registren todas y cada una de las unidades muestrales y numeradas desde 1 hasta N, siendo N el número total de unidades muestrales.

3.3 Producción per cápita (PPC)

3.3.1 Uno de los factores más importantes por saber a través de la encuesta por muestreo es la PPC, por la cual se entiende la cantidad promedio de basura en función de su peso (kilogramos) producida por persona y por día.

3.3.2 Se considera la población universal de N unidades muestrales (N viviendas, por ejemplo). La unidad muestral i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$) tiene X_i habitantes y produce Y_i kilogramos de basura en un día. Es decir, la unidad muestral i produce Q_i ($= Y_i/X_i$) kilogramos de basura por habitante por día. En este caso, la PPC se puede calcular a través de una de las siguientes dos fórmulas:

$$\text{Fórmula 1: } PPC = \frac{\sum_{i=1}^N Y_i}{\sum_{i=1}^N X_i} = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i}{N} = \bar{Q} \quad (1)$$

$$\text{Fórmula 2: } PPC = \frac{\sum_{i=1}^N Y_i}{\sum_{i=1}^N X_i} = R \quad (2)$$

Generalmente se usa la fórmula 2, la cual es la única correcta desde el punto de vista matemático*. Sin embargo, esta fórmula complicaría un tanto la aplicación de la teoría de muestreo. Por lo tanto, se recomienda que se utilice la fórmula 1 para la aplicación de la teoría de muestreo y se determine la PPC por la fórmula 2.

* Supongamos una comunidad de 200 habitantes con las siguientes características:

- 20 viviendas ricas con 5 habitantes en cada una...0.6 kg de basura/hab/día
- 10 viviendas pobres con 10 habitantes en cada una 0.4 kg de basura/hab/día
- Producción total de basura por día20x5x0.6+10x10x0.4 = 100 kg/día
- PPC por la fórmula 2100/200 = 0.500 kg/hab/día

El cálculo de la PPC por la fórmula 1 causaría un error en la siguiente manera:

$$(0.6x20+0.4x10)/(20+10) = 0.533 \text{ kg/hab/día}$$

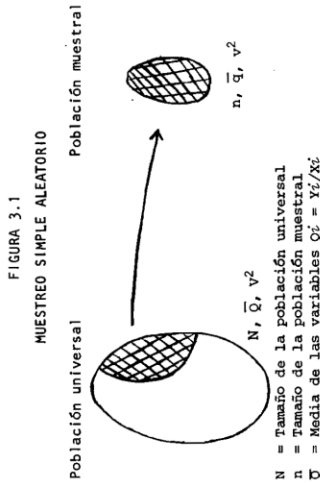
3.4 Teoría de muestreo (caso fórmula 1)

3.4.1 Para aplicar la teoría de muestreo, el muestreo debe realizarse aleatoriamente. El muestreo aleatorio más común se llama muestreo simple aleatorio.

3.4.2 El muestreo simple aleatorio es un método de selección de unidades tomadas de un total de N, de tal forma que cada una de las muestras posibles tenga la misma posibilidad de ser escogida.

3.4.3 En la práctica se elige una muestra simple al azar por cada unidad. Se escoge una serie de números al azar entre el 1 y N, ya sea por medio de una tabla de números aleatorios, ya sea por medio de una máquina calculadora que utilice este programa, o bien introduciendo los números desde el 1 hasta N en una urna, mezclándolos debidamente y tomando al azar n de ellos. Las unidades que lleven los números obtenidos constituyen la muestra.

3.4.4 Se presenta en la figura siguiente la mecánica del muestreo simple aleatorio:



donde: N = Tamaño de la población universal
n = Tamaño de la población muestral
 \bar{Q} = Media de las variables $Q_i = Y_i/X_i$
 $\bar{Q}_i = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n}$
 $(i = 1, 2, \dots, N), \bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i}{N}$
 \bar{q} = Media de las variables $q_i = y_i/x_i$
 $\bar{q} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{n}$
 $(i = 1, 2, \dots, n), \bar{q} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{n}$
 X_i = N° de habitantes de la unidad escogida i
 Y_i = Cantidad de basura producida (kg/día) por la unidad escogida i
 Q_i = Variancia de la variable Q_i
 v^2 = Variancia de la variable q_i

3.4.5 Según la teoría del muestreo aleatorio, la esperanza matemática de la media en la población muestral $E(\bar{q})$ es igual a la media en la población universal (\bar{Q}).

$$E(\bar{q}) = \bar{Q} \quad (3)$$

3.4.6 Del mismo modo, la siguiente relación es cierta en un 95%, independientemente de la distribución de Q , siempre y cuando el muestreo sea aleatorio y n y $N-n$ sean suficientemente grandes:

$$|\bar{q} - \bar{Q}| < 1.96 \sqrt{\frac{N-n}{N-1} \frac{V^2}{n}} = E \quad (4)$$

donde: E = error de muestreo en la estimación de la media \bar{Q} con el 95% de certeza.

O sea, la media de la población universal (\bar{Q}) se encontrará en el siguiente rango con una probabilidad del 95%:

$$\bar{q} - E < \bar{Q} < \bar{q} + E \quad (5)$$

3.4.7 Siendo el valor de $N-1$ prácticamente N ($N-1 \approx N$) en la ecuación (4), se puede determinar el tamaño necesario de la muestra (n) por la siguiente ecuación:

$$n = \frac{\left[\frac{E}{1.96} \right]^2 + \frac{V^2}{N}}{V^2} \quad (6)$$

3.4.8 Para determinar el valor de n por la ecuación (6) hay que establecer previamente el error permisible (E) y tiene que suponerse la desviación estándar en la población universal (V).

En cuanto al valor de E (error permisible en la estimación de la PPC), este se puede establecer teniendo en cuenta los objetivos del uso del valor estimado de \bar{Q} (PPC) en la ecuación (5).

En lo que se refiere al valor de V hay que suponerlo en base a una encuesta anterior en la misma ciudad o a una encuesta realizada en alguna ciudad semejante. También sería conveniente, en algunos casos, hacer un muestreo preliminar y estimar de él el valor de V .

3.4.9 Entre la variancia de la población universal (V^2) y la de la población muestral (v^2) existe la siguiente relación:

$$E(v^2) = \frac{N}{N-1} \frac{n-1}{n} V^2 \quad (7)$$

donde: $E(v^2)$ = esperanza matemática de v^2

Siendo prácticamente $N \approx N-1$ y $n \approx n-1$, puede decirse que:

$$E(v^2) \approx V^2 \quad (8)$$

Por lo tanto, se puede usar el valor de v de la encuesta anterior o del muestreo preliminar como valor estimatorio de V .

3.5 Ejemplos (Caso fórmula 1)

3.5.1 Se suponen, como caso 1, los siguientes valores:

$$\begin{aligned} \text{Caso 1: } E &= 20 \text{ gr/hab/día} \\ V &= 150 \text{ gr/hab/día} \\ N &= 10,000 \text{ viviendas} \end{aligned}$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación (6) se tiene:

$$n = \frac{150^2}{\left[\frac{20}{1.96} \right]^2 + \frac{150^2}{10,000}} = 211.5$$

Es decir, en el caso 1 la muestra debe contener, por lo menos, 212 unidades muestrales (viviendas).

3.5.2 Se suponen los siguientes tres casos a fin de explicar los efectos de los factores E , V y N :

$$\begin{aligned} \text{Caso 2: } E &= 50 \text{ gr/hab/día} \\ V &= 150 \text{ gr/hab/día} \\ N &= 10,000 \text{ viviendas} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Caso 3: } E &= 20 \text{ gr/hab/día} \\ V &= 50 \text{ gr/hab/día} \\ N &= 10,000 \text{ viviendas} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Caso 4: } E &= 20 \text{ gr/hab/día} \\ V &= 150 \text{ gr/hab/día} \\ N &= 100,000 \text{ viviendas} \end{aligned}$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación (6) se obtiene el valor n para cada caso como sigue:

Se supone, como ejemplo, que $v=200$ gr/hab/día. Sustituyendo este valor, $N=10,000$ y $n=212$ en la ecuación (4), se tiene:

$$E = 1.96 \sqrt{\frac{10,000 - 212}{10,000 - 1} \cdot \frac{200^2}{212}} = 26.6 \text{ gr/hab/día}$$

Es decir, en este caso el error en la estimación de la media \bar{Q} (con el 95% de certeza) es mayor que el que se ha proyectado (20 gr/hab/día).

Para mantener el error dentro del rango proyectado, la muestra debía contener por lo menos 370 unidades en vez de 212 como se calcula en la siguiente ecuación:

$$n = \frac{200^2}{\left(\frac{20}{1.96}\right)^2 + \frac{200^2}{10,000}} = 369.9$$

3.6 Teoría de muestreo (Caso fórmula 2)

3.6.1 En el caso de la fórmula 2 [ecuación (2)], el procedimiento para determinar el tamaño necesario de la muestra (n) es diferente y un tanto complicado.

3.6.2 El valor de R [la PPC, ver la ecuación (2)] puede calcularse conociendo la cantidad total de basura $\left\{ \sum_{i=1}^N y_i \right\}$ producida en

un día determinado y el número de personas $\left\{ \sum_{i=1}^N x_i \right\}$ que la producen o también mediante un muestreo aleatorio de la población en el cual se obtienen valores de las cantidades de basura (y_i) y número de habitantes (x_i) de la unidad muestral i .

En este último caso se puede calcular el valor de r (la estimación de R) en la siguiente forma:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (10)$$

Caso 2: $n = \frac{150^2}{\left(\frac{50}{1.96}\right)^2 + \frac{150^2}{10,000}} = 34.46$ unidades (35 viviendas)

Caso 3: $n = \frac{50^2}{\left(\frac{20}{1.96}\right)^2 + \frac{50^2}{10,000}} = 23.95$ unidades (24 viviendas)

Caso 4: $n = \frac{150^2}{\left(\frac{20}{1.96}\right)^2 + \frac{150^2}{100,000}} = 215.62$ unidades (216 viviendas)

3.5.3 A través de la comparación de los casos 2, 3 y 4 con el caso 1 se pueden sacar las siguientes conclusiones:

Conclusión 1: Si se admite un error un poco más grande, se puede reducir bastante el tamaño necesario de la muestra.

Conclusión 2: Si la variancia de la población (V^2) es un tanto pequeña, se puede reducir considerablemente el tamaño necesario de la muestra.

Conclusión 3: Aunque sea más grande el tamaño de la población, prácticamente no es necesario aumentar el tamaño de la muestra.

3.5.4 A fin de confirmar la validez del valor V supuesto antes del muestreo, se necesita calcular después del muestreo la desviación estándar muestral v (la desviación estándar de las variables $q_i = y_i/x_i$).

$$v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}{n}} \quad (9)$$

El valor de v así obtenido debe ser menor o igual que el valor supuesto V . En caso contrario, el error del muestreo sobrepasa el valor preestablecido E .

3.5.5 En todo caso, se puede calcular el valor verdadero del error del muestreo sustituyendo el valor de v ($v=v$) logrado mediante la ecuación (9) en la ecuación (4).

3.6.3 La esperanza matemática de x , $E(x)$, es igual que R , siempre y cuando el muestreo sea aleatorio.

$$E(x) = R \tag{11}$$

También se puede calcular la variancia de x (V_x) por la siguiente fórmula:

$$V_x^2 = \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^n (y_i^2 - x_i^2)}{(n-1) \bar{x}^2}$$

$$= \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^n (y_i^2 - R x_i^2)}{(n-1) \bar{x}^2} \tag{12}$$

donde: $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$$

$$f = \frac{n}{N}$$

Puesto que el término $\frac{\sum_{i=1}^n (y_i^2 - R x_i^2)}{(n-1) \bar{x}^2}$ tiene un valor constante (valor propio de la población), se puede expresar V_x del siguiente modo:

$$V_x = K \sqrt{\frac{1-f}{n}} \tag{13}$$

donde: $K =$ constante

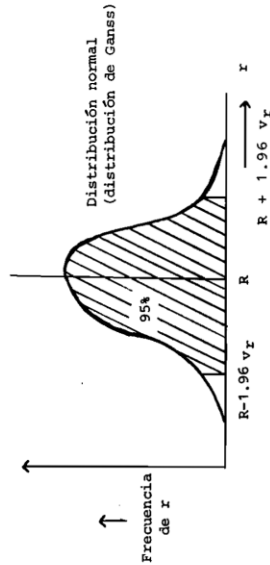
3.6.4 La manera más rápida para calcular V_x^2 en una máquina calculadora es:

$$V_x^2 = \frac{n(N-n)}{N(n-1)} \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 - 2R \sum_{i=1}^n x_i y_i + R^2 \sum_{i=1}^n x_i^2}{\left[\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} \right]^2} \tag{14}$$

Se calcula cada término de la ecuación (14) de acuerdo con el cuadro siguiente:

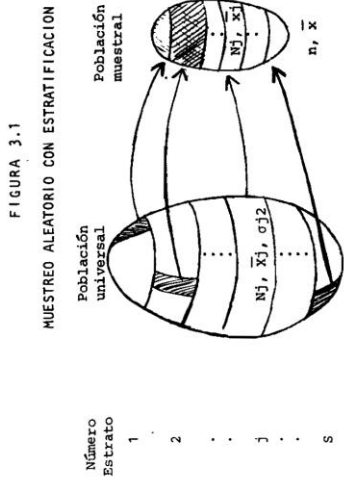
Unidad Número	Nº de personas x_i	Basura producida y_i	x_i^2	y_i^2	$x_i y_i$
1	x_1	y_1	x_1^2	y_1^2	$x_1 y_1$
2	x_2	y_2	x_2^2	y_2^2	$x_2 y_2$
:	:	:	:	:	:
i	x_i	y_i	x_i^2	y_i^2	$x_i y_i$
:	:	:	:	:	:
n	x_n	y_n	x_n^2	y_n^2	$x_n y_n$
TOTAL	$\sum_{i=1}^n x_i$	$\sum_{i=1}^n y_i$	$\sum_{i=1}^n x_i^2$	$\sum_{i=1}^n y_i^2$	$\sum_{i=1}^n x_i y_i$

3.6.5. En caso de que $N \gg n \gg 0$, es decir $N-n$ y n sean suficientemente grandes y que el muestreo sea aleatorio, el histograma de frecuencia de x se aproxima a la curva de Gauss independiente de la curva de distribución de la población universal (y_i/x_i). Por lo tanto, la variable x se encontrará en el rango de $R-1.96 V_x$ a $R+1.96 V_x$ con una probabilidad del 95%, como se muestra a continuación:



un error menor que el del muestreo simple aleatorio. Dos de las más comunes serán el muestreo aleatorio con estratificación y el muestreo sistemático.

3.7.2 En la figura siguiente se presenta la mecánica del muestreo aleatorio con estratificación:



- donde:
- N = Tamaño de la población universal
 - Nj = Tamaño del estrato j
 - n = Tamaño de la muestra
 - nj = Tamaño de la muestra del estrato j
 - X = Media de la población universal
 - Xj = Media del estrato j
 - Xj^2 = Media muestral del estrato j
 - sigma_j^2 = Variancia de la población del estrato j
 - sigma^2 = Variancia de la población
 - S = Número total de estratos

Es decir, el error de muestreo en la estimación de r (con un 95% de certeza) está dado por la ecuación siguiente:

$$Er = 1.96 v_r \tag{15}$$

donde: Er = Error de muestreo en la estimación de r con el 95% de certeza

3.6.6 Para determinar el tamaño necesario de la muestra (n), hay que seguir los siguientes pasos:

- a. Se determina el valor Er (error permisible en la estimación de la PPC) teniendo en cuenta los objetivos del uso de la cifra de PPC.
- b. Se realiza un estudio preliminar con el tamaño de la muestra n' o se usa un estudio existente que tenga el tamaño de la muestra n''. Se calcula v_r'^2 o v_r''^2 usando la ecuación (14) y se obtiene la siguiente ecuación usando la ecuación (13):

$$\frac{v_r'}{v_r''} = \frac{K \sqrt{\frac{1 - \frac{n}{N}}{n}}}{K \sqrt{\frac{1 - \frac{n'}{N'}}{n'}}$$

Por tanto:

$$v_r' = v_r'' \sqrt{\frac{n'(N - n')}{n(N - n)}} \tag{16}$$

En caso de que N >> n y n', se obtiene la siguiente ecuación:

$$v_r' = v_r'' \sqrt{\frac{n'}{n}} \tag{16}$$

c. Combinando (15) y (16) se tiene:

$$n = \frac{1.96^2 v_r''^2 n'}{Er^2} \tag{17}$$

3.6.7 Por lo tanto, cuando se necesite reducir el error hasta, por ejemplo un 50% o 10% del error actual, se deberá aumentar el tamaño de la muestra a 4 o 100 veces el tamaño actual, respectivamente.

3.7 Muestreo aleatorio con estratificación y muestreo sistemático

3.7.1 Existen ciertas técnicas estadísticas que nos permiten estimar las condiciones prevaletantes en el universo poblacional con

3.7.3 Según la teoría del muestreo aleatorio con estratificación, existen las siguientes ecuaciones entre las variables arriba mencionadas:

$$N = \sum_{j=1}^S N_j \quad (18)$$

$$\bar{X} = \sum_{j=1}^S \frac{N_j}{N} \bar{X}_j \quad (19)$$

$$\sigma^2 = \sum_{j=1}^S \frac{N_j}{N} \sigma_j^2 + \sum_{j=1}^S \frac{N_j}{N} (\bar{X}_j - \bar{X})^2 \quad (20)$$

$$E(\bar{X}) = \bar{X} \quad (21)$$

$$|\bar{X} - \bar{X}| < 1.96 \sqrt{\sum_{j=1}^S \left(\frac{N_j}{N} \right)^2 \frac{N_j - 1}{N_j - 1} \sigma_j^2} = E \quad (22)$$

donde: $E(\bar{X})$ = Esperanza matemática de \bar{X}
 E = Error de muestreo en la estimación de \bar{X} por \bar{x} con un 95% de certeza

3.7.4 Cuando se trata de estratificar la población universal, se realiza conforme al factor fuertemente ligado con la variable X . En el caso del muestreo de la basura, se necesita estratificar la población conforme, por ejemplo, al nivel de ingreso y a las características de la zona.

Además de la diferencia en las características cuantitativas, hay una destacada diferencia en las características cualitativas según los estratos (zona: comercial, residencial e industrial; nivel de ingreso: alto, medio y bajo; etc.).

Por lo tanto, es indispensable efectuar un muestreo aleatorio con estratificación.

3.7.5 El método del muestreo sistemático puede calificarse como muestreo aleatorio siempre y cuando el intervalo del muestreo no sea igual a la periodicidad que pudiera haber en la población universal.

3.7.6 La mecánica del muestreo sistemático es la siguiente:
 Se suponen N unidades en la población que se numeran del 1 a N , siguiendo un orden. Para seleccionar una muestra de n unidades

se calcula que $k = N/n$, y se toma una unidad al azar de las primeras k unidades. De allí en adelante cada unidad será la anterior más k . Por ejemplo, si $k=10$ y la primera unidad tomada es el número 7, las unidades siguientes serán los números 17, 27, 37 y así sucesivamente.

3.7.7 Las ventajas del método del muestreo sistemático sobre el muestreo simple aleatorio son las siguientes:

- a. Es más fácil obtener la muestra y a menudo más fácil de ejecutar sin errores.
- b. El muestreo sistemático es más confiable en su resultado que el muestreo simple aleatorio. En efecto, estratifica la población en n estratos los cuales corresponden al valor escogido entre las primeras k unidades, las segundas k unidades y así sucesivamente. Esto hace que cada muestra se distribuya más uniformemente entre la población y tome en cuenta sus variaciones.

3.7.8 Lo más importante en el método del muestreo sistemático es evitar el posible efecto negativo de la periodicidad que pudiera existir en la población universal. Este efecto negativo es factible que se presente en poblaciones que tienen variaciones periódicas, como puede suceder si k es tal que las unidades tomadas son las de las esquinas en donde generalmente existen viviendas con mezcla de usos entre residencial y comercial o en una urbanización nueva que ha sido construida con módulos periódicos.

3.8 Flujoograma de la encuesta de residuos sólidos por muestreo

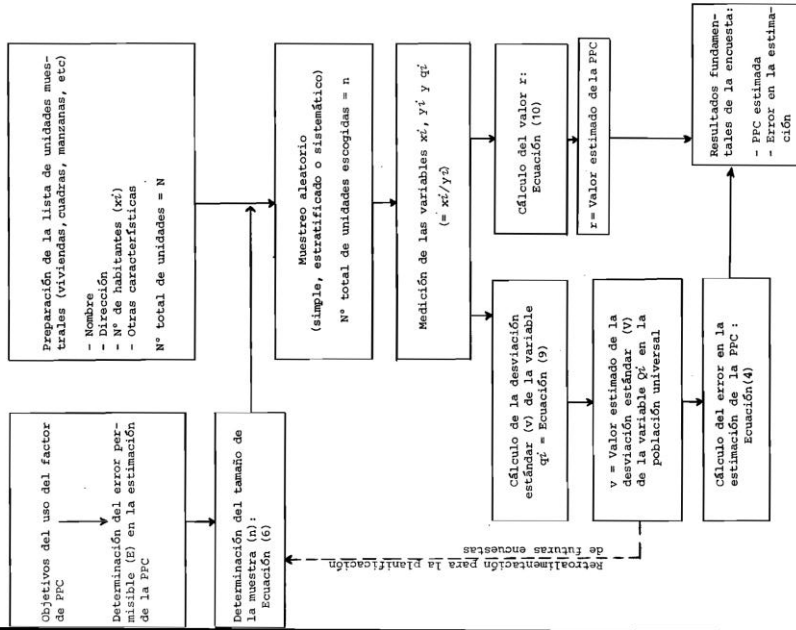
3.8.1 Como conclusión de esta parte se presenta seguidamente el flujoograma de la encuesta de residuos sólidos por muestreo que facilita el trabajo de los técnicos encargados de dicha encuesta.

3.8.2 En este flujoograma se usan la fórmula 2 en la estimación de la PPC y la fórmula 1 en la estimación del error en la PPC estimada como se discutiera en el punto 3.3.2. Empero, en caso de necesitar la estimación matemáticamente correcta de error, se necesita usar las ecuaciones (14) y (15).

3.8.3 Sería conveniente enfatizar la necesidad de medir las variables x_i , f_i y q_i tomando muestras que cubran por lo menos una semana completa, puesto que se presenta una destacada variación dentro de este plazo.

3.8.4 Este flujoograma puede usarse también como flujoograma de evaluación de la encuesta anterior o de la preliminar. Los resultados obtenidos por esta evaluación deberán suministrarse al proceso de planificación de la encuesta.

FLUJOGRAMA: ENCUESTA DE RESIDUOS SOLIDOS POR MUESTREO



PARTE IV: ANALISIS FISICO DE RESIDUOS SOLIDOS

4.1 Peso y PPC

4.1.1 Se mide el peso de la basura usando una balanza de pie o una para pesar camiones. En el caso del método de muestreo en las fuentes (método 1 de la parte II), la muestra se lleva al depósito en donde se hará el pesaje mediante una balanza de pie. En cuanto al método de muestreo en las veredas (método 2 de la parte II), está incluida la operación de pesaje por una balanza de pie dentro del proceso de muestreo. También en el caso del método de muestreo en los camiones recolectores (método 3 de la parte III), está incluida la operación de pesaje por una balanza para pesar camiones. De esta manera se debe determinar el peso de cada muestra cubriendo la generación de basura de una semana completa.

4.1.2 Se puede determinar la PPC (producción per cápita per día) del modo siguiente:

$$PPC(kg/hab/día) = \frac{1}{7} \times \frac{A1 \times P1 + A2 \times P2 + A3 \times P3 + A4 \times P4}{B1 \times P1 + B2 \times P2 + B3 \times P3 + B4 \times P4}$$

donde: -P1, P2, P3 y P4 = Número de habitantes en las zonas comercial, residencial (ingreso alto), residencial (ingreso medio) y residencial (ingreso bajo), respectivamente.

-A1, A2, A3 y A4 = Peso de la muestra de una semana completa tomada de cada una de las zonas arriba mencionada.

-B1, B2, B3 y B4 = Número de habitantes correspondientes a la muestra tomada de cada zona arriba mencionada.

Esta ecuación corresponde a la fórmula 2 de la parte III (punto 3.3.2).

4.2 Prueba de densidad

4.2.1 Como dijimos en el punto 1.2.3, la densidad de la basura latinoamericana es superior a la de los países industrializados por su menor contenido de papeles y plásticos. Además de este hecho, hay que tener en mente que la densidad se altera a medida que se avanzan las etapas del punto 2.1.1. A continuación se muestra un ejemplo imaginario de esta alteración de la densidad de basura:

ALTERACION DE LA DENSIDAD

Etapas	Densidad
A. Basura suelta en recipientes compactados 200 kg/m ³
B. Basura compactada en camiones compactadores 500 kg/m ³
C. Basura suelta descargada en los rellenos 400 kg/m ³
D. Basura recién rellenada 600 kg/m ³
E. Basura estabilizada en los rellenos (2 años después del rellenamiento) 900 kg/m ³

4.2.2 Se necesita medir la densidad en la etapa oportuna conforme al objetivo de la medición. Por ejemplo, para la determinación del volumen de recipientes se debe medir en la etapa A arriba mencionada y para la selección de camiones compactadores se necesita medir en la etapa B. En el caso de la medición de la densidad de relleno, es fundamental la medición de la densidad en la etapa D. Y, por último, se debe usar la densidad de la etapa E en el cálculo de la vida útil del relleno.

4.2.3 Para la determinación de la densidad en la etapa A se toma la muestra usando el método 1 (muestreo en las fuentes) o el método 2 (muestreo en las veredas) de la parte II. En el caso del método 2 se puede calcular la densidad agregando al ítem 2.3.4 el paso f. que se presenta a continuación:

f. Se obtiene la densidad de la basura al dividir su peso total en kilogramos entre su volumen total en metros cúbicos.

$$\text{Densidad de la basura } D(kg/m^3) = \frac{\text{Peso total de la basura en } kg}{\text{Volumen total de la basura en } m^3}$$

En el caso del método 1 se debe desarrollar los pasos a., b., c., d., e., del ítem 2.3.4 y el paso f. arriba mencionado en el depósito adonde se ha llevado toda la muestra para su posterior análisis.

- a. Materia orgánica (restos de alimentos, madera y follaje).
- b. Papeles y cartones.
- c. Plásticos, cauchos y cueros.
- d. Textiles.
- e. Escorbos, cenizas y lozas.
- f. Metales férricos.
- g. Metales no férricos.
- h. Vidrios.
- i. Huesos.
- j. Otros.

Se han seleccionado estos componentes pues ellos dan una visión lo suficientemente completa de la calidad de la basura latinoamericana y permiten realizar, sobre una base cierta, estudios sobre la mejor solución para el servicio de aseo.

4.3.2 La clasificación se hace manualmente, echando cada componente en un tambor preseleccionado de alrededor de 50 a 100 litros. Se da por terminada esta faena cuando toda la basura en estudio ha sido separada en sus componentes.

4.3.3 Se deben pesar los tambores antes de empezar la clasificación usando la balanza de pie.

4.3.4 Una vez llenos estos tambores o terminada esta clasificación se pesan los tambores con los diferentes componentes y por diferencia se saca el peso de cada componente.

4.3.5 Se saca el porcentaje (%) de cada componente teniendo los datos del peso total y el peso de cada clase.

4.3.6 Se necesita efectuar todo el trabajo de terreno con la mayor rapidez posible, ya que durante la operación la basura va perdiendo humedad. En consecuencia, un menor tiempo da como resultado una mayor exactitud en las mediciones.

4.4 Prueba de humedad

A continuación se presenta uno de los métodos de análisis de humedad desarrollados por la APWA que se llama "el método de secado al horno". Este método requiere algunos equipos básicos de laboratorio y estos no necesariamente están dentro del alcance de las ciudades latinoamericanas. En tal caso, se recomienda el uso de un método más sencillo que explicaremos en la parte VI.

4.4.1 Equipos:

- a. Un horno de secado, de ser posible con circulación de aire a presión.

4.2.4 La medición de la densidad de la basura recién rellenada (etapa D) se hace de la siguiente manera:

- a. Se prepara una celda especial de un tamaño de alrededor de 50 m³. Es preferible preparar una trinchera por su conveniencia en la medición del volumen.
- b. Se mide el volumen de la trinchera.
- c. Se llena la trinchera con la basura que fue pesada por una balanza para pesar camiones, aparcándola y compactándola en la forma empleada en el relleno en cuestión.
- d. Una vez llena esta trinchera, se suma el peso de la basura que ha sido colocada en la misma.
- e. Se obtiene la densidad de la basura recién rellenada al dividir su peso determinado en d. entre su volumen medido en b.

4.2.5 En el caso de la basura estabilizada en los rellenos (etapa E), se hace la medición de la densidad en la siguiente forma:

- a. Se hace la selección del sitio para ensayo, el cual debe tener registros de operación tales como el período de operación y los orígenes de la basura.
- b. Se raspa la tierra superficial del sitio con un tractor para retirar la tierra de cobertura.
- c. Se hace la excavación con el empleo de una retroexcavadora, de un área de 25 m² midiendo 5m x 5m, hasta una profundidad de 2 m, logrando en esta forma 50 m³ de basura estabilizada.
- d. Se coloca la basura excavada en un camión basculante, mediante una pala mecánica. Se pesa este camión, de tara conocida, por una balanza para pesar camiones.
- e. Se obtiene la densidad de la basura estabilizada al dividir su peso, medido en d., entre su volumen, determinado en c.

4.3 Prueba de composición física

- 4.3.1 Se toma la muestra de alrededor de 1 m³ o 200 kg, a través de los métodos 1, 2 ó 3 de la parte II, llevándola a un lugar pavimentado en donde se inicia rápidamente la clasificación en los diez grupos siguientes:

- b. Un frasco secador grande o un armario con una sustancia higroscópica.
 - c. Recipientes para las muestras (los botes de aluminio cerrados de unas 3.5 pulgadas de diámetro y 2 pulgadas de profundidad).
 - d. Una balanza de tres brazos graduada a una décima de gramo y con capacidad para 200 grs.
- 4.4.2 Procedimiento:
- a. Se prepara la muestra inicial usando el método 4 de la parte II.
 - b. Se pesan los recipientes para las muestras.
 - c. Se toman en los recipientes las muestras duplicadas de 50 a 100 grs de residuos orgánicos triturados frescos y se cubren inmediatamente. Los materiales inorgánicos como vidrio, metales y cerámica de media pulgada o mayores se eliminan. No hay que comprimir el material.
 - d. Se pesan los recipientes con las muestras en su interior con precisión de un decigramo antes de que transcurra una hora.
 - e. Se secan a 75°C en el horno de secado con las tapas medio abiertas o sin tapas, hasta que su peso sea constante. Las muestras de menos de 60% de contenido de humedad es suficiente secarlas durante 24 horas en un horno que tenga circulación de aire a presión, aunque es preferible secarlas durante 48 horas.
 - f. Se sacan los recipientes del horno y se dejan enfriar en el frasco secador.
 - g. Se pesan los recipientes.
 - h. Se vuelven a secar por 1 ó 2 horas.
 - i. Se repiten los puntos f. y g.
 - j. Si durante el segundo secado (por 1 ó 2 horas) se produce una pérdida de peso menor que el 1% del peso original (muestra húmeda) se da por terminado el proceso.
 - k. Si la pérdida de peso en el segundo secado es mayor que el 1% del peso original, se seca por 1 hora más y se repite la operación hasta cumplir la condición indicada en el punto j.

4.4.3 Cálculo:

$$\% \text{ Humedad (base húmeda)} = \frac{100 \times (\text{pérdida de peso})}{(\text{peso neto húmedo})}$$

PARTE V: ANALISIS QUIMICO DE RESIDUOS SOLIDOS

En esta parte se presentan las siguientes seis pruebas más importantes del análisis químico de residuos sólidos, las cuales son fundamentales para identificar la factibilidad técnica de los procesos de compostificación e incineración, así como para el diseño de dichos procesos:

Pruebas	Procesos de tratamiento
Prueba de hidrógeno (H) y carbono (C)	} Compostificación } Incineración y pirólisis
Prueba de nitrógeno (N)	
Prueba de fósforo (P)	
Prueba de potasio (K)	
Prueba de sólidos volátiles y ceniza	
Prueba de poder calorífico superior e inferior	

Los procedimientos de estas pruebas, descritos a continuación, han sido desarrollados en base a los de la APWA y, lógicamente, requieren que la preparación de la muestra inicial se efectúe mediante el método 4 de la parte II.

5.1 Prueba de hidrógeno y carbono

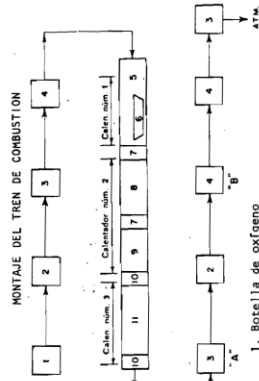
5.1.1 Equipos:

- Un horno eléctrico para calentar tubos cerrados para la combustión de sustancias orgánicas.
- Cápsulas de combustión con tapa.
- Tubos secadores en U con tubos laterales de 16 mm de diámetro interior y 150 mm de altura.
- Lavagases Fisher-Willigan.
- Una balanza de análisis.
- Un horno de secado.
- Un aparato desecador.
- Tubos Tygon.
- Una botella de oxígeno extraesco preparado con aire líquido.

5.1.2 Reactivos:

- Acido sulfúrico concentrado.
- Oxido cúprico granular (calentado a 900°C durante una hora antes de usarlo).
- Cromato de plomo granular.
- Peróxido de plomo granular.
- Perclorato de magnesio.
- Ascarita (malla 8-20).
- Alambre de plata pura de grosor 3-4 B a S.
- Un filtro de amianto.

5.1.3 Se monta el tren de combustión como se indica en la figura 5.1.



- Botella de oxígeno
- Lavagases con ácido sulfúrico concentrado
- Tubo secador con perclorato de magnesio
- Tubo de combustión
- Tubo de combustión
- Cápsula de combustión
- Tapón de fibra de amianto
- Cromato de plomo
- Oxido cúprico
- Alambre de plata (trenzado en malla)
- Peróxido de plomo (se mantiene a 150°C)

FIGURA 5.1

- c. Acido sulfúrico concentrado, 93 a 96% H₂SO₄, libra de nitratos y (NH₄)₂SO₄.
- d. Oxido mercurico de grado reactivo libre de nitrógeno.
- e. Solución de hidróxido de sodio y sulfato de sodio: Se disuelven 450 gramos de NaOH y 80 gramos de Na₂SO₃ · 5H₂O en agua destilada libre de amoníaco y llevado a un litro.
- f. Indicador rojo de metilo.
- g. Sulfato de potasio, K₂SO₄.
- h. Cinc granulado.

5.2.3 Procedimiento:

- a. Se pesa aproximadamente 1 gramo de muestra, previamente molida y ressecada, con una precisión de hasta un décimo de miligramo.
- b. Se introduce en un matraz Kjeldahl y se agregan 15 gramos de K₂SO₄, 0.7 gramos de óxido mercurico y 25 mililitros de H₂SO₄ concentrado.
- c. Se calienta suavemente hasta eliminar la espuma que aparece en la superficie. Luego se aumenta la temperatura continuando la digestión durante aproximadamente dos horas hasta que la mezcla alcance un color verde amarillento (solución ácida).
- d. Se enfría, se añaden 200 mililitros de agua destilada y se agita.
- e. Posteriormente se agrega 1 gramo de cinc granulado para evitar proyecciones; 75 mililitros de una solución preparada de hidróxido de sodio y cloruro de sodio, se vierten por las paredes del matraz para que no se mezcle en seguida con la solución ácida.
- f. Se conecta de inmediato el matraz al equipo refrigerante por medio del tubo de conexión. La salida del equipo refrigerante deberá estar sumergida en una solución normal de ácido sulfúrico, 0.1N, contenida en un Erlenmeyer de 500 mililitros. Se necesita medir la cantidad de esta solución antes de introduciría en el Erlenmeyer (generalmente se introducen 50 mililitros).
- g. Se mezcla por agitación el contenido del matraz Kjeldahl y se destila hasta que todo el amoníaco haya sido recogido por la solución normal de H₂SO₄. Generalmente los primeros 150 mililitros de destilado contienen todo el amoníaco.
- h. Se titula con una solución 0.1N de NaOH, usando rojo de metileno como indicador. Paralelamente se realiza un ensayo testigo, pesando 0.5 gramos de azúcar de caña y emitiéndola a un tratamiento similar al de la muestra. Cuando se utilizan reactivos nuevos se deberá realizar un nuevo ensayo testigo.

5.1.4 El elemento número 10 del tren sirve para facilitar la conducción del calor desde el centro del tubo de combustión hasta la salida para que en esta parte del tubo no se acumule humedad. El peróxido de plomo (elemento número 11) se tiene que mantener a 190°C durante toda la prueba.

5.1.5 Obténgase el peso inicial de los elementos "A" y "B". Pénsense de 0.5 a 1 gramo de basura secada de la muestra directamente en una cápsula de combustión. Conéctense los calentadores números 1 y 2, aumentese gradualmente la temperatura hasta aproximadamente 800 a 900°C. Reglése la circulación de oxígeno por el tren de combustión a aproximadamente 500 mililitros por minuto. Téngase la muestra en combustión durante 30 minutos por lo menos, dejando después un tiempo para asegurar que toda el agua formada durante la combustión ha sido arrastrada por la corriente de oxígeno al tubo de secado que contiene el perclorato de magnesio. Obténgase el peso final de los elementos "A" y "B".

5.1.6 Cálculos:

$$\% \text{ Hidrógeno} = \frac{\text{Aumento de peso de "A" x 11.19}}{\text{Peso de la muestra}}$$

$$\% \text{ Carbono} = \frac{\text{Aumento de peso de "B" x 27.29}}{\text{Peso de la muestra}}$$

5.2 Prueba de nitrógeno (orgánico y amoniacal)

5.2.1 Equipos:

- a. Matraces Kjeldahl para digestión y destilación de 800 mililitros.
- b. Caperuza de exhaustación y salida especial al exterior para eliminar los vapores ácidos durante la digestión.
- c. Tubos de conexión Kjeldahl de bolas (bolas de 5 a 6 cm de diámetro con tapa de caucho en el extremo inferior y conectado al superior con tubo de goma a un condensador).
- d. Matraces Erlenmeyer de 500 mililitros.
- e. Balanza analítica.

5.2.2 Reactivos:

- a. Solución normal de ácido sulfúrico, 0.1N.
- b. Solución normal de hidróxido de sodio, 0.1N.

5.2.4 Cálculos:

a. Ensayo testigo:

$$(\text{ml del ácido}) - (\text{ml de la base}) \times \frac{(\text{normalidad de la base})}{(\text{normalidad del ácido})}$$

= ml equivalente del ácido en ensayo testigo

b. Muestra:

$$(\text{ml del ácido}) - (\text{ml de la base}) \times \frac{(\text{normalidad de la base})}{(\text{normalidad del ácido})}$$

= ml equivalente del ácido de la muestra + ensayo testigo

c. Muestra corregida:

b. - a. = ml equivalente del ácido de la muestra

d. Porcentaje de nitrógeno orgánico y amoniacal en la muestra:

$$\frac{(\text{ml equiv. del ácido de la muestra}) \times (\text{norm. del ácido}) \times (14 \text{ mg})}{10 \times (\text{peso inicial de la muestra seca, en gramos})} = \% \text{ Nitrógeno.}$$

5.2.5 Los nitrógenos medidos son orgánicos y amoniacales y no incluyen los nitratos. Los nitratos no son reducidos a forma amoniacal durante el procedimiento analítico. Entrante es dudoso que algunos (si algunos) nitratos o nitratos sean formados mediante compostificación aeróbica, a menos que el período de estabilización se haya prolongado durante mucho tiempo.

5.3 Prueba de fósforo (fosfatos)

5.3.1 Equipos:

- a. Matraces Kjeldahl de 800 mililitros para digestión.
- b. Una campana de humos.
- c. Matraces graduados de 200 mililitros.
- d. Recipientes de aluminio para muestras de dos pulgadas de diámetro (unos 50 mm) y 7/8 de pulgada de alto (unos 22 mm).
- e. Un espectrofotómetro.

f. Un colorímetro fotoeléctrico (equipado con un filtro de luz de transmisión máxima próxima a los 625 o 675 milimicrones) o un colorímetro visual.

- g. Un horno de secado.
- h. Un desecador.
- i. Una balanza de análisis.
- j. Pipetas volumétricas.

5.3.2 Reactivos:

- a. Acido sulfúrico concentrado, 93 a 96% H₂SO₄.
- b. Hidróxido de sodio, 10N (40%).
- c. Solución de molibdato de amonio: Se disuelven 5 gramos de (NH₄)₂MoO₄ en un litro de HCl 0.75N.
- d. Solución de elón: Se disuelven 10 gramos de elón en un litro de NaHSO₃ al 3%.
- e. Solución normal de fósforo de potasio: Se disuelven 1.917 gramos de KH₂PO₄ puro y seco en agua y se diluye hasta un litro.

Un mililitro de esta solución equivale a un miligramo de P₂O₅.

5.3.3 Procedimiento:

- a. Se pesan unos 3 gramos de residuos secos de la muestra en un recipiente previamente secado y tarado. (Es mejor secar los residuos a 75°C durante dos horas después de que se ha transferido al recipiente.)
- b. Se transfiere la muestra a un matraz Kjeldahl y se añaden unos 25 mililitros de H₂SO₄ concentrado. Digérase bajo la campana de humos hasta que el líquido se vuelva color pajá, indicio de que la materia orgánica se ha descompuesto.
- c. Se enfría, se introduce en un matraz graduado de 200 mililitros, añadiendo unos 80 mililitros de agua.
- d. Se alcaliniza con la solución de NaOH utilizando un indicador de fenolftaleína hasta que la solución empiece a tornarse color rosa.
- e. Se añade agua hasta alcanzar la marca y se mezcla bien.

- f. Se filtra, se elimina la primera parte del filtrado y se conserva la solución para determinar el fosfato y la potasa. (El volumen de la solución básica de la muestra es de 200 mililitros).
- g. Con la pipeta se pasan 10 mililitros de la solución anterior a un vaso de boca ancha de 100 mililitros, se añaden 30 mililitros de solución de molibdato de amonio y 10 mililitros de solución de selen (50 mililitros de volumen total).
- h. Al mismo tiempo se depositan cantidades medidas con pipeta de la solución normal de fosfato en matraces graduados de 50 mililitros y se añaden las mismas cantidades de las soluciones de molibdato de amonio y selen. Se diluye con agua hasta la marca. (Se sugiere utilizar, para fines de comparación, soluciones normalizadas de 1, 2, 4, 6, 8 y 10 miligramos de P₂O₅ en 50 mililitros o preparar la curva de calibración del espectrofotómetro o colorímetro fotoeléctrico).
- i. Se mezcla bien la muestra y las soluciones y se deja reposar durante treinta minutos.
- j. Se mide o se compara inmediatamente la muestra en el colorímetro.

5.3.4 Cálculo:

$$\frac{\text{mg de P}_2\text{O}_5 \text{ (determinación colorimétrica)} \times 2}{(\text{peso seco neto en gramos})^*} = \% \text{ P}_2\text{O}_5$$

* Valor medido en el paso a. de 5.3.3

Este cálculo es para la cantidad de 10 mililitros tomada de los 200 mililitros de la solución preparada de la muestra y hay que ajustarlo si se varían las cantidades.

5.4 Prueba de potasio (potasa)

5.4.1 Equipos:

- a. Un espectrofotómetro con dispositivo de fotómetro de llama.
- b. Matraces graduados.
- c. Pipetas volumétricas.

5.4.2 Reactivos:

- a. Solución normal de cloruro de potasio:
Se disuelven 1,584 gramos de KCl seco en agua y se diluye hasta completar un litro. Un mililitro de esta solución equivale a un miligramo de K₂O.

5.4.3 Procedimiento:

- a. Se toma una alícuota de la solución muestra preparada para la determinación de la potasa en el paso f. de 5.3.3 (procedimiento de prueba de fósforo).
- b. Se procede a la determinación por fotometría de llama, operando el instrumento de acuerdo a las instrucciones del fabricante.
- c. Al mismo tiempo, se miden los valores de densidad óptica de las soluciones de conocida concentración de potasio preparadas de la solución normal de KCl y se prepara una curva de calibración.
- d. Se compara el valor de densidad óptica de la solución muestra con la curva de calibración y se determina la concentración de K₂O (ppm) de la solución muestra.

5.4.4 Cálculo:

$$\frac{(\text{concentración de K}_2\text{O de la solución muestra, en ppm})}{50 \times (\text{peso seco neto en gramos})^*} = \% \text{ K}_2\text{O}$$

* Valor medido en el paso a. del punto 5.3.3

5.5 Prueba de sólidos volátiles y ceniza

5.5.1 Equipos:

- a. Un horno de secado.
- b. Una balanza analítica.
- c. Un frasco secador grande.
- d. Crisoles de porcelana
- e. Un horno de mufla con pirómetro indicador y control de la temperatura por reostato (se deben alcanzar temperaturas de 650°C).

5.5.2 Procedimiento:

- a. Se transfieren unos 5 gramos de residuos secados y molidos de la muestra en un crisol previamente incinerado y tarado (W₁).
- b. Se vuelve a secar los residuos en el crisol a 75°C en el horno de secado durante 2 horas.
- c. Se saca el crisol del horno y se deja enfriar en el frasco secador.
- d. Se pesa el crisol (W₂) y se determina el peso neto seco de la muestra (W₂-W₁).

- b. Se instala el alambre fusible entre los dos electrodos de la bomba de oxígeno, se pone la cápsula en el soporte de abrazadera de uno de los electrodos y se coloca una cantidad determinada de agua destilada (1 ml) en la bomba.
- c. Se pone la cabeza de la bomba dentro del cilindro y se atornilla la tapa firmemente con la mano mediante una argolla de contacto.
- d. Se conecta la válvula de entrada de oxígeno al cilindro que contiene este gas y se deja penetrar lentamente el oxígeno hasta llegar a una presión de 30 atms. Luego se cierra la válvula de entrada de oxígeno y se desconecta la bomba.
- e. El balde del calorímetro se llena con 2,000 gramos (± 0.5 gr) de agua destilada para que la bomba quede sumergida en ella y completamente cubierta. La temperatura del agua deberá estar aproximadamente a 1.5°C bajo la temperatura ambiente.
- f. Se sumerge la bomba en el balde, se conectan los bornes de los electrodos con el circuito de ignición y se coloca la tapa con el termómetro y el agitador.
- g. Se pone el agitador en marcha y se mantiene la agitación durante cinco minutos antes de empezar con las lecturas de temperatura. En seguida se lee el termómetro cada 60 seg. y se anotan las temperaturas con aproximación de una milésima durante otros cinco minutos por lo menos.
- h. Al final de este período preliminar se cierra el circuito de ignición y se anota la temperatura al momento de ignición.
- i. Se hace la lectura y anotación de las temperaturas a los 45, 60, 75, 90 y 105 segundos después de producido el encendido y luego a intervalos de un minuto hasta que se haya llegado al valor máximo de la temperatura. Alcanzada la temperatura máxima se siguen anotando las temperaturas, ahora decrecientes, durante otros cinco minutos.
- j. Una vez anotada la última lectura, se detiene el motor, se remueve la tapa, se desconectan los bornes de ignición y se retira la bomba del calorímetro.
- k. Se espera durante unos cinco minutos y enseguida se dejan escapar lentamente los gases abriendo la válvula de salida. Se desatornilla la tapa de la bomba y se revisa cuidadosamente para cerciorarse de que no queden partículas combustibles sin quemar. En caso de haberlas se descarta el ensayo.
- l. Se lava bien el interior de la bomba, inclusive la tapa con la válvula y la cápsula, con un chorro de agua destilada y se vierte el lavado en un

- e. Se coloca el crisol en el horno de muña frío, se aumenta la temperatura del horno gradualmente hasta 650°C y se mantiene esta temperatura durante 2 horas.
- f. Se saca el crisol del horno y se deja enfriar en el frasco secador.
- g. Se pesa el crisol (W_1) y se determina el peso de la ceniza ($W_2 - W_1$).

5.5.3 Cálculos:

$$100 \times \frac{(W_2 - W_1)}{(W_2 - W_1)} = \% \text{ sólidos volátiles}$$

$$100 \times \frac{(W_2 - W_1)}{(W_2 - W_1)} = \% \text{ ceniza}$$

5.6 Prueba de poder calorífico superior e inferior

5.6.1 Equipos:

- a. Un calorímetro de bomba de oxígeno.
- b. Un cilindro de oxígeno.
- c. Un cilindro de oxígeno (corriente).
- d. Un regulador de presión (corriente).
- e. Una balanza con capacidad neta para 5 kg.
- f. Un horno de secado.
- g. Un frasco secador grande.
- h. Una balanza analítica.

5.6.2 Reactivos:

- a. Agua destilada.
- b. Solución de carbonato de sodio, 0.0725N:
Se disuelven 3.84 gramos de Na_2CO_3 en agua destilada y se diluye hasta completar un litro.
- c. Indicador naranja de metilo o rojo de metilo.

5.6.3 Procedimiento:

Estudiar y cumplir al detalle las instrucciones del fabricante del calorímetro que se usará. A continuación se presenta el procedimiento general:

- a. Se pesa hasta un décimo de miligramo entre 0.8 y 1.2 gramos de la muestra previamente molida y resecada directamente en la cápsula metálica de combustión.

vaso de precipitado. Se hace la titulación del lavado usando la solución de Na_2CO_3 , 0.0725N y el indicador naranja de metilo. Se conserva la solución que queda después de la titulación, a fin de usarla en la prueba de azufre.

m. Cuidadosamente se remueven los excesos del alambre fusible no quemados y se miden.

n. Se hace la prueba de azufre conforme al manual del fabricante del calorímetro.

5.6.4 Cálculos:

Para el cálculo del poder calorífico superior se deben utilizar las instrucciones del fabricante de la bomba en cuestión, pues estas dependen del tipo de bomba que se utilice.

Como puede haber interés por conocer datos en B.T.U./libra*, se presenta a continuación la ecuación para la conversión a esta unidad:

$$\text{B.T.U./libra} = (\text{caloría/gramo}) \times 1.8$$

Se calcula el poder calorífico inferior a partir del poder calorífico superior, deduciéndose 1,030 B.T.U. por una libra (572 calorías por gramo) de agua proveniente de una cantidad unitaria (una libra o un gramo respectivamente) de material, incluyéndose tanto el agua proveniente de la humedad como la formada por combustión.

* B.T.U. (British Thermal Unit) = Caloría que se necesita para aumentar la temperatura de una libra de agua por 1°F bajo la presión atmosférica de 1 atm.

En cualquier ciudad, sea grande o pequeña, es esencial conocer las características de la basura tales como densidad, composición, humedad y poder calorífico, con el objeto de diseñar los sistemas de recolección y disposición final de la misma. Sin embargo, los métodos descritos en otras partes de este manual podrían estar fuera de alcance por la carencia de recursos humanos y materiales en algunas ciudades de América Latina.

El objetivo de esta parte es ofrecer un método sencillo para el análisis de residuos sólidos de manera que facilite el conocimiento mínimo de dichas características por los encargados del servicio de aseo en estas ciudades.

6.1 Toma de muestras

Generalmente, la cantidad y la composición de la basura llevada al relleno son bastante diferentes que la de la basura generada debido a la activa recuperación de materiales tales como papeles, cartones, trapos, botellas y metales. Por tanto, se necesita seleccionar un lugar más apropiado para la toma de muestras teniendo en cuenta el motivo del análisis. Para diseñar el relleno sería mejor tomar la muestra en el relleno y para identificar la procedencia de industrializar la basura sería preferible tomarla de las calles.

6.2 Prueba de densidad

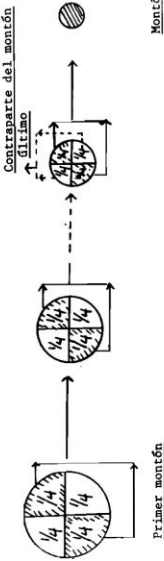
- a. Se prepara un tambor de alrededor de 100 litros que servirá para el muestreo y una balanza de pie.
 - b. Se pesa el tambor y se mide su volumen.
 - c. Se pone la basura en el tambor sin hacer presión y se remueve de manera que se llenen los espacios vacíos en el mismo.
 - d. Se pesa una vez lleno y por diferencia se obtiene el peso de la basura.
 - e. Se obtiene la densidad de la basura al dividir su peso en kilogramos entre el volumen del tambor en metros cúbicos.
- $$\text{Densidad de la basura } D(\text{kg/m}^3) = \frac{\text{Peso de la basura en kg}}{\text{Volumen del tambor en m}^3}$$
- f. El número de muestras debe ser tan grande como sea posible para reducir errores.

6.3 Prueba de composición física

- a. Se toma la muestra de alrededor de 1 m³ llevándola a un lugar pavimentado de preferencia en donde se vierte formando un montón.

- b. Se rompen bolsas y se cortan cartones y maderas contenidas en la basura hasta conseguir un tamaño de 15 cm por 15 cm o menos.
- c. Se homogeniza la muestra mezclándola toda.

d. El montón se divide en cuatro partes y se escoge dos opuestas para formar otra muestra representativa más pequeña. La muestra menor se vuelve a mezclar y se divide en cuatro partes, luego se escoge dos opuestas y se forma otra muestra más pequeña. Esta operación se repite hasta obtener una muestra de 50 kg de basura o menos.



- e. Se separan los componentes del montón último y se clasifican de acuerdo a las siguientes características:

- Papel y cartón
- Trapos
- Madera y follaje
- Piles de alimentos
- Plásticos, caucho y cuero
- Metales
- Vidrios
- Suelo y otros

- f. Los componentes se van clasificando en cilindros pequeños que pueden ser de 50 litros.

- g. Se debe pesar los cilindros antes de empezar la clasificación usando la balanza de pie.

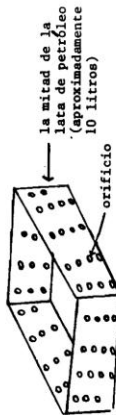
- h. Una vez terminada la clasificación se pesan los cilindros con los diferentes componentes y por diferencia se saca el peso de los componentes.

- i. Se saca un porcentaje (%) de los componentes teniendo los datos del peso total y el peso de cada clase.

- j. Se necesita realizar este análisis con la mayor rapidez posible para evitar demasiada evaporación de agua.

6.4 Prueba de humedad

- a. Se toma la contraparte del montón último en el análisis de la composición de basura, se mezcla y luego se forma un montón.
- b. Se realiza la operación similar que la del punto d. del análisis de la composición de la basura hasta tener 50 litros de basura o menos.
- c. Se preparan unos 6 recipientes metálicos utilizando latas de petróleo de 20 litros y se pesan estos recipientes (W_1).



- d. Se pone la muestra en los recipientes cortando bien los restos de frutas y verduras para facilitar la desecación.
- e. Una vez llenos se pesan (W_2) y se colocan sobre un horno de pan o una caldera de vapor por tres o cuatro días aprovechando el calor radiado.
- f. Una vez secos se pesan (W_3) y se calcula la humedad de la basura usando la siguiente ecuación:

$$\text{Humedad de la basura } w (\%) = \frac{W_2 - W_3}{W_2 - W_1} \times 100$$

6.5 Método para estimar el poder calorífico de la basura

6.5.1 Para facilitar el cálculo del poder calorífico de la basura, el primer lugar se adoptan los siguientes valores como el poder calorífico de cada componente seco:

a. Papel y cartón	4,000 Kcal/Kg
b. Trapos	4,000 Kcal/Kg
c. Madera y follaje	4,000 Kcal/Kg
d. Restos de alimentos	4,000 Kcal/Kg
e. Plástico, caucho y cuero	9,000 Kcal/Kg
f. Metales	0 Kcal/Kg
g. Vidrios	0 Kcal/Kg
h. Suelo y otros	0 Kcal/Kg

En segundo lugar, se supone que toda la humedad de la basura está en los componentes de las clases a, b, c y d.

6.5.2 Se calcula el poder calorífico superior de la basura como sigue:

Clase	Composición húmeda (%)	Composición seca (%)	Poder calorífico superior (kcal/Kg)
a. Papel y cartón	a	a+b+c+d	$\frac{a+b+c+d-W}{100} \times 4,000$
b. Trapos	b		
c. Madera y follaje	c		
d. Restos de alimentos	d		
e. Plástico, caucho y cuero	e	e	$\frac{e}{100} \times 9,000$
f. Metales	f	f	$\frac{f+g+h+W}{100} \times 0$
g. Vidrios	g	g	
h. Suelo y otros	h	h	
i. Agua	-	W	
TOTAL	100%	100%	$40(a+b+c+d-W) + 90e$ kcal/Kg

Por tanto el poder calorífico superior de la basura (Ps) está dado por la ecuación siguiente:

$$Ps \text{ (Kcal/Kg)} = 40(a + b + c + d - W) + 90e$$

6.5.3 Se calcula el poder calorífico inferior de la basura (Pi) usando la siguiente ecuación:

$$Pi \text{ (Kcal/Kg)} = Ps - \frac{W}{100} \times 600 = Ps - 6W$$

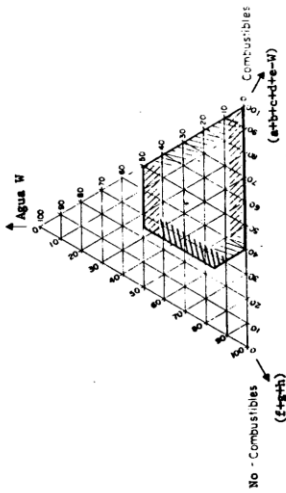
6.5.4 Cuando se trata de seleccionar el proceso de incineración como un método de tratamiento de la basura con el objeto de reducir su volumen y recuperar energía, hay que chequear el poder calorífico inferior de la basura usando las siguientes normas:

- Pi para incinerar la basura sin combustible auxiliar - cuando menos 1,000 Kcal/Kg.
- Pi para recuperar energía - cuando menos 1,500 Kcal/Kg.

También se debe considerar cuidadosamente la disponibilidad de capital inicial, en ese punto en la clasificación de los países, aunque estos son generalmente difíciles de conseguir. Pero los países en desarrollo, como regla general se puede decir que la incineración no es apropiada en los países en desarrollo a excepción de la incineración de residuos sólidos hospitalarios.

6.5.5 Se puede evaluar la combustibilidad de la basura sin cálculo del poder calorífico arriba mencionado si se usa la siguiente figura:

DIAGRAMA DE TRES COMPONENTES



Nota: es la esfera de composición de basura que se puede incinerar sin combustible auxiliar.

BIBLIOGRAFIA

1. ACURIO, G. & RUIZ, D. Desarrollo institucional. Simposio Regional sobre Resechos Sólidos - Santo Domingo, República Dominicana 13-17 Feb. 1978, EHP/OPS, 1978. 39 p. Serie técnica 21.
2. BENDER, D.F., PETERSON, M.L. & STIERLE H. Physical, chemical and microbiological methods of solid waste testing. Cincinnati National Research Center, 1973.
3. BRASIL. CETESB, Sao Paulo. Lixo e demais resíduos sólidos. Curso por correspondencia Limpeza pública, Lx.02, 1976. 41 p.
4. BRASIL. COMLURB, Rio de Janeiro. Determinacao de parametros de projeto e dados operacionais para execucao de aterros sanitarios. 1979. 28 p.
5. COLLAZOS, H. & DUQUE, R. Características de los residuos sólidos. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Curso Intensivo sobre Manejo Integral de los Resechos Sólidos, Manual del Curso I, 1981. 30 p.
6. CONCHA, M. & SZCZWARANSKI, J.L. Técnica de muestreo de residuos sólidos e investigación en relleno piloto. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 1977. 197 p. Publicación I-45.
7. EPA. Environmental Protection Agency. State decision-makers guide for hazardous waste. Washington, 1977. 103 p. Solid waste management series SW-611.
8. EPA. Institute for Solid Wastes of American Public Works Association. Municipal refuse disposal, 3 ed., 1970. 538 p.
9. FLINTOFF, F. Management of solid wastes in developing countries. New Delhi, WHO, 1976. 242 p. South East Asia Series, 1.
10. HANSEN, M.H., HURWITZ, W.N. & MADOW, W.G. Sample survey methods and theory, Volume I Methods and applications, New York, John Wiley & Sons, Inc., 1953. 638 p.
11. KAUK, J.C. & ISAMITT, M.P. Laboratorio para residuos sólidos. Investigación en relleno sanitario. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 1979. 194 p. Publicación I-47.
12. SAKURAI, K. Método sencillo del análisis de la basura. Lima, CEPIS, 1980. 5 p.
13. WHO. WHO International Reference Centre for Wastes Disposal. Methods of analysis of sewage sludge, solid wastes and compost. Dubendorf, Suiza, 1978. 44 p.