

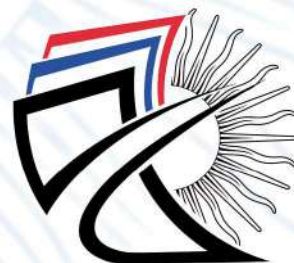
SISTEMAS DE TRATAMIENTO Y VALORIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

Patricio Vladimir Méndez Zambrano

Jessica Paola Arcos Logroño

Rogelio Estalin Ureta Valdez

Estefania Freytez Boggio



PUERTO MADERO
EDITORIAL

1era Edición
2023



puertomaderoeditorial.com.ar



La Plata - Argentina

SISTEMAS DE TRATAMIENTO Y VALORIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS



SISTEMAS DE TRATAMIENTO Y VALORIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

SOLID WASTE TREATMENT AND RECOVERY SYSTEMS

AUTORES:

Patricio Vladimir Méndez Zambrano.
Jessica Paola Arcos Logroño
Rogelio Estalin Ureta Valdez
Estefanía Freytez Boggio



Sistemas de tratamiento y valorización de residuos sólidos / Patricio Vladimir Méndez Zambrano ... [et al.] ; editado por Guido Patricio Santillán Lima ; Daniela Margoth Caichug Rivera. - 1a ed revisada. - La Plata : Puerto Madero Editorial Académica, 2023.

Libro digital, PDF/A

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-987-82816-3-6

1. Ambiente. I. Méndez Zambrano, Patricio Vladimir. II. Santillán Lima, Guido Patricio, ed. III. Caichug Rivera, Daniela Margoth, ed.

CDD 363.7285



Licencia Creative Commons:

Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)



Primera Edición, Enero 2023

SISTEMAS DE TRATAMIENTO Y VALORIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

ISBN: 978-987-82816-3-6

Editado por:

Sello editorial: ©Puerto Madero Editorial Académica
Nº de Alta: 933832

Editorial: © Puerto Madero Editorial Académica
CUIL: 20630333971
Calle 45 N491 entre 4 y 5
Dirección de Publicaciones Científicas Puerto Madero Editorial Académica
La Plata, Buenos Aires, Argentina
Teléfono: +54 9 221 314 5902
+54 9 221 531 5142
Código Postal: AR1900

Este libro se sometió a arbitraje bajo el sistema de doble ciego (peer review)

Corrección y diseño:

Puerto Madero Editorial Académica
Diseñador Gráfico: José Luis Santillán Lima

Diseño, Montaje y Producción Editorial:

Puerto Madero Editorial Académica
Diseñador Gráfico: Santillán Lima, José Luis

Director del equipo editorial: Santillán Lima, Juan Carlos

Editor: Santillán Lima, Guido Patricio
Santillán Lima Juan Carlos
Caichug Rivera Daniela Margoth

Hecho en Argentina
Made in Argentina

AUTORES:

Patricio Vladimir Méndez Zambrano.

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Sede Morona Santiago, EC140101,
Macas, Morona Santiago, Ecuador.

patricio.mendez@esPOCH.edu.ec



<https://orcid.org/0000-0002-4305-8152>

Jessica Paola Arcos Logroño

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Sede Morona Santiago, EC140101,
Macas, Morona Santiago, Ecuador.

paola.arcos@esPOCH.edu.ec



<https://orcid.org/0000-0002-9462-2219>

Rogelio Estalin Ureta Valdez

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Sede Morona Santiago, EC140101,
Macas, Morona Santiago, Ecuador.

rogelio.ureta@esPOCH.edu.ec



<https://orcid.org/0000-0001-8756-8982>

Estefanía Freytez Boggio

Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Decanato de Agronomía.
Programa de Ingeniería Agroindustrial. 3001, Barquisimeto, Venezuela.
estefaniafreytez@ucla.edu.ve.



<https://orcid.org/0000-0002-6133-5555>

CONTENIDO

RESUMEN	xv
PRÓLOGO.....	xvii
INTRODUCCIÓN.....	xix
CAPÍTULO 1.....	22
Concepto, origen y tipos de residuos y/o desechos sólidos.	22
1.1 Introducción	22
1.2 Residuos sólidos	3
1.2.1 Concepto de Residuos sólidos	3
1.2.2 Clasificación de los residuos sólidos	6
1.2.3 Composición de los RSU.....	9
1.2.4 Caracterización de los RSU y su importancia	11
1.2.5 Evaluación del flujo en la producción de residuos	12
1.3 Residuos orgánicos y porque enfocarse en ellos	18
1.4 Opciones de tratamiento de los residuos orgánicos	20
1.5 Pasos para implementar un sistema de gestión de residuos orgánicos	20
1.6 Residuos agroindustriales	21
1.6.1 Concepto de residuos agroindustriales	21
1.6.2 Tipos de residuos agroindustriales y que industria lo genera.....	23
1.6.3 Opciones de tratamiento de los residuos agroindustriales.....	24
1.7 Residuos tóxicos o peligrosos	27
1.7.1 Concepto de residuos tóxicos	27
1.7.2 Origen de los residuos tóxicos.....	27
1.7.3 Tipos de residuos tóxicos	28
1.7.4 Opciones de tratamientos de residuos tóxicos o peligrosos	29
CAPÍTULO 2.....	32
Gestión integral de residuos sólidos	32
1. Introducción.....	32
2. Importancia de gestionar los residuos sólidos	33
2.1 Desafíos que enfrenta la gestión de los residuos sólidos	35
2.2 Jerarquización de enfoques para gestionar residuos sólidos.....	40
3. Gestión integral de residuos sólidos	43
3.1 Concepto de GIRS	43
3.2 Etapas en la gestión integral de residuos sólidos	44
4. Importancia de la Prevención y minimización de residuos	59
CAPÍTULO 3.....	62
Procesos físicos aplicados en el tratamiento de residuos sólidos.....	62
1. Introducción.....	62

2.	Procesos de separación, procesamiento y transformación de los residuos sólidos.	63
3.	Procesos físicos	64
3.1	Reducción de tamaño	65
3.3	Separación por tamaño	73
3.3	Separación por densidad.....	78
3.4	Separación por cambio eléctrico y magnético.....	84
3.5	Compactación	86
CAPÍTULO 4.....		94
Procesos termoquímicos aplicados en el tratamiento de residuos sólidos.....		94
1.	Introducción.....	94
2.	Procesos termoquímicos	95
3.	Incineración	96
3.1	Concepto de incineración	96
3.2	Naturaleza del combustible	98
3.3	Productos de la combustión:	98
3.4	Tipos de incineración:	98
3.5	Instalaciones de incineración	100
3.6	Técnicas para la retención o transformación de contaminantes.....	106
3.7	Ventajas y desventajas de la incineración	109
3.8	Criterios de diseño de los sistemas de incineración	110
4.	Pirólisis.....	110
4.1	Concepto de pirólisis.....	110
4.2	Descripción del proceso	111
4.3	Tipos de pirólisis	112
4.4	Ventajas y desventajas de la pirólisis.....	115
4.5	Aplicaciones de la pirólisis en America latina y a nivel mundial	115
5.	Recuperación de energía.....	116
5.1	Concepto de recuperación de energía.....	116
5.2	Tipos de recuperación de energía.....	118
5.3	Tipos de residuos para la recuperación de energía.....	119
5.4	Componentes de la recuperación de energía	121
CAPÍTULO 5.....		127
Procesos biológicos aplicados al tratamiento de residuos sólidos		127
1.	Introducción.....	127
2.	Procesos biológicos.	128
3.	Digestión anaerobia.	129
3.1	Concepto de digestión anaerobia.....	129
3.2	Tipos de digestión anaerobia.....	130
3.3	Descripción del proceso- Microbiología del proceso.....	132
3.4	Requerimientos del proceso.	134
3.5	Productos de la digestión anaerobia	137

3.6	Equipos utilizados	139
3.7	Ventajas y desventajas de la digestión anaerobia.....	144
3.8	Aplicaciones de la digestión anaerobia a nivel mundial.	145
CAPÍTULO 6.....		148
El compostaje como alternativa en la gestión de residuos sólidos orgánicos		148
1.	Introducción.....	148
2.	Compostaje	149
2.1	Concepto de compostaje.....	149
2.2	Materia prima utilizada en el proceso de compostaje	151
2.3	Factores que intervienen en el proceso de compostaje	154
2.4	Microbiología del proceso de compostaje.....	161
2.5	Fases o etapas del proceso de compostaje.....	164
2.6	Sistemas que involucra el compostaje.....	167
2.7	Parámetros para realizar la instalación del sistema para compostaje.....	172
2.8	Operaciones en una planta de Compost	174
2.9	Tipos de compost	175
a.	Compost de acuerdo al grado de madurez	175
b.	Compost según la estabilidad y madurez en el proceso de compostaje.....	176
2.10	Evaluación de la calidad de un compost.	177
2.11	Usos del compost	179
CAPÍTULO 7.....		184
Aprovechamiento de residuos mediante la técnica del reciclaje		184
1.	Introducción.....	184
2.	Económica Circular	186
2.1	Características de una Economía Circular	189
3.	Prevenir la generación de residuos	189
4.	Manejo adecuado de los residuos: 3 R (Jerarquía, 3 R, Ecodiseño).....	191
5.	Valorizar los residuos generados	192
6.	Reciclaje	193
6.1	Concepto de reciclaje	194
6.2	Ventajas del reciclaje	196
6.3	Tipos de reciclaje	197
6.4	Reciclaje de plástico.....	199
6.5	Reciclaje de papel y cartón.....	202
6.6	Reciclaje de vidrio.....	202
6.7	Reciclaje de metales	204
6.8	Reciclaje de eléctricos y electrónicos.....	205
6.9	Contenedores para el reciclaje:	207
7.	Razones para la implementación de un programa de reciclaje exitoso	208
8.	Reciclaje en America Latina y en Venezuela	210
CAPÍTULO 8.....		217
Vertederos y rellenos sanitarios ¿Son una solución ambiental?		217

1. Introducción.....	217
2. Vertederos	219
2.1 Definición de vertederos	219
2.2 ¿Por qué enfocarse en vertederos abiertos?.....	220
2.3 Mejora de las operaciones en los vertederos abiertos	220
2.4 Conversión de vertederos abiertos a vertederos controlados	221
2.5 Cierre de los vertederos abiertos	223
3. Rellenos sanitarios.....	224
3.1 Definición de relleno sanitario	224
3.2 Tipos de vertederos controlados o rellenos sanitarios.....	225
3.3 Aspectos de generación de un relleno sanitario	227
3.4 Diseño de los rellenos sanitarios	229
3.5 Construcción de un relleno sanitario	231
3.6 Funcionamiento de los rellenos sanitarios	237
3.7 Operaciones del relleno sanitario	242
3.8 Problemas de los rellenos sanitarios.....	243
3.9 Análisis de los vertederos en Venezuela y América Latina	245
BIBLIOGRAFÍA	259
DE LOS AUTORES	278
Patricio Vladimir Méndez Zambrano	278
Jessica Paola Arcos Logroño	279
Rogelio Estalin Ureta Valdez.....	280
Estefanía Freytez Boggio.....	281

RESUMEN

Los residuos sólidos han experimentado un aumento desproporcionado respecto a su generación debido al crecimiento poblacional y a los malos hábitos de consumo por parte de las personas quienes adquieren productos en algunos casos sin necesitarlos y que después de ser utilizados los descartan como un desecho, bien sea el producto en desuso o los diferentes empaques que estos poseen, generando cantidades excesivas de residuos que de no ser bien manejados y tratados de forma adecuada pueden ser una fuente de contaminación. La gestión de estos residuos se ha convertido en un verdadero desafío para los entes gubernamentales, ya que no se cuenta con políticas diseñadas para abordar de forma integral la eliminación de los residuos, sin embargo, existen instituciones y empresas, así como asociaciones civiles y cooperativas que se encuentran trabajando en la recuperación y el aprovechamiento de los mismos. El objetivo de esta obra es dar a conocer los diferentes tratamientos que pueden ser aplicados a los residuos sólidos para su recuperación y aprovechamiento, mediante la recopilación de información y estudios de casos, que permitieron exponer los métodos y tecnologías más apropiados para la gestión de estos residuos, destacando la aplicación de tratamientos biológicos por su bajo costo, disminución de residuos domiciliarios, menor requerimiento de espacio y maquinarias, además de su aprovechamiento energético.

Palabras claves: Residuo sólido, contaminación, gestión, recuperación, aprovechamiento, tratamiento biológico.

ABSTRACT

Solid waste has experienced a disproportionate increase with respect to its generation due to population growth and bad consumption habits on the part of people who acquired products in some cases without needing them and who, after being used, discard them as waste, either the disused product or the different packages that they have, generating excessive amounts of waste that, if not properly, can be a source of contamination. The management of this waste has become a real challenge for government entities, since there are no policies designed to comprehensively address the elimination of this waste, however, there are institutions and companies, as well as civil associations and cooperatives. Who are working on the recovery and use of them. The objective of this work is to make known the different treatments that can be applied to solid waste for its recovery and use, through the collection of information and case studies, which allowed exposing the most appropriate methods and technologies for the management of these waste, highlighting the application of biological treatments for its low cost, reduction of household waste, less space and machinery required, in addition to its energy use.

Keywords: solid waste, contamination, management, recovery, use, biological treatment.

PRÓLOGO

Los diversos tratamientos a los que pueden ser sometidos los residuos sólidos para su adecuado manejo, van a determinar su valor para su recuperación y aprovechamiento en la obtención de subproductos o insumos que puedan ser de utilidad en diferentes procesos productivos. Estos tratamientos contribuyen a que las personas y empresas orientadas a esta labor puedan manipular los residuos sólidos desde que son producidos e incluso desde su fuente de generación, para posteriormente poder ser trasladados a otros sitios o que puedan ser almacenados hasta su recolección.

Este texto va dirigido a esas personas y empresas abocadas a la recuperación y aprovechamiento de estos residuos, desarrollando con detalle las diferentes etapas que intervienen desde su generación, selección, separación, reducción y prevención de su generación, así como su gestión y los procesos físicos, químicos, físico-químicos, biológicos, termoquímicos por medio de los cuales son tratados antes de su disposición final, con especial atención en aquellos que son de naturaleza orgánica.

El objetivo principal de esta obra es recopilar todas las etapas, los procesos y tratamientos por los que pasan los residuos sólidos, las cuales involucran una serie de reacciones, utilización de parámetros o requerimiento de condiciones específicas en cada proceso de transformación de los mismos, y de esta manera contribuir con la adquisición de conocimientos por parte de personas que se estén iniciando en este campo de estudio de forma sencilla.

La obra está dividida en 8 capítulos:

Capítulo 1. Concepto, origen y tipos de residuos y/o desechos sólidos

Capítulo 2. Gestión de residuos sólidos

Capítulo 3. Procesos físicos aplicados en el tratamiento de residuos sólidos

Capítulo 4. Procesos termoquímicos aplicados en el tratamiento de residuos sólidos

Capítulo 5: Procesos biológicos aplicados al tratamiento de residuos sólidos

Capítulo 6. El compostaje como alternativa en la gestión de residuos sólidos orgánicos.

Capítulo 7. Aprovechamiento de residuos mediante la técnica de reciclaje

Capítulo 8. Vertederos y rellenos sanitarios ¿Son una solución ambiental?

En cada capítulo se detallan definiciones, etapas, equipos, reactivos, productos que no son aprovechables, productos contaminantes y su forma de retención, productos

aprovechables y los procesos por medio de los cuales pueden ser recuperados y aprovechados.

Los Autores

INTRODUCCIÓN

El manejo de los residuos a nivel mundial es un tema que ha llevado a muchas disertaciones a través de conferencias y estudios debido a la gran problemática que ha generado su inadecuada disposición final, especialmente en los países de América Latina y el Caribe donde no se cuenta con el debido entrenamiento ni la cultura del reciclaje de los mismos por medio de los diferentes procesos existentes para su transformación, recuperación y aprovechamiento.

En el Caribe y en muchos de los países de América Latina, el manejo de los residuos se ha realizado a través de un sistema de “recolección y disposición final”, etapas que realizan de forma inadecuada en muchos casos, dejando sin importancia las técnicas de aprovechamiento, reciclaje y tratamiento de los residuos sólidos (Sáez & Urdaneta, 2014).

Los países considerados del primer mundo representan solo el 16% de la población y generan el 34% de los desechos a nivel mundial, por su parte el continente asiático y el Pacífico generan el 23% y en África se proyecta que para el 2050 se triplique su producción de desechos (Banco Mundial, 2018). En América Latina y el Caribe (ALC) según Bausson (2019), la producción promedio regional per cápita de Residuos Sólidos Domiciliarios (RSD) y de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) es de 0,6 kg/hab/día a 0,9 kg/hab/día.

Los residuos sólidos urbanos generados en los países que constituyen el ALC actualmente han experimentado un aumento exorbitante, alcanzando un volumen aproximado de 540.000 toneladas al día, y se estima que para el año 2050, estos residuos en la región alcancen las 671.000 toneladas por día, así lo indican datos recientes de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) Medio Ambiente, los cuales fueron presentados durante un evento de la Asociación Brasileña de Empresas de Limpieza Pública y Residuos Especiales (ABRELPE), realizado en São Paulo durante el primer trimestre de 2018.

Según investigaciones realizadas en el año 2008 se presentaron estadísticas que revelan que Venezuela ha sido catalogada como uno de los países que genera porcentajes altos de basura *per cápita*, reportándose un alza en la generación de desechos sólidos. Es importante mencionar los escasos conocimientos que tienen la mayoría de las personas sobre el ambiente, su cuidado y la forma correcta de disposición de los desperdicios generados (Instituto Nacional de Estadísticas, 2010).

El sector encargado de recolectar, transferir, trasladar y de disponer finalmente la basura en Venezuela, no se escapa de la situación atrasada que también presenta en otros servicios. Investigaciones llevadas a cabo por Bausson, (2019) muestran que, en recursos humanos por cada 10.000 habitantes, Venezuela aparece entre los últimos (12,46%); ni siquiera hay datos sobre el país y; de los convenios de cobro apenas un 12%.

Sin embargo, no se trata solo del problema causado por la generación excesiva de desperdicios, sino de la mala disposición de los mismos, observándose diferencias significativas como es el caso de Haití y Guatemala por ejemplo, donde la tasa de disposición apropiada de residuos aún es muy baja, siendo el 54 % de estos depositados en rellenos sanitarios, el 18 % en vertederos que son controlados y el 25 % son arrojados a cielo abierto (ONU, 2012), mientras que en México el promedio a nivel nacional de disposición apropiada de residuos es del 60 % y en Chile, es del 80 % (Calvo et al., 2007).

En la actualidad la búsqueda de soluciones para mitigar los efectos generados por la contaminación ambiental se ha popularizado debido al interés mundial por mejorar de calidad de vida de los habitantes del planeta. La disposición inadecuada de los residuos sólidos orgánicos que producen las diferentes agroindustrias es un problema que genera efectos dañinos al ambiente, además que trae como consecuencia una desmejora en la vida en general de las personas y en la calidad de esta, disminuyendo su productividad y por ende su progreso.

Los residuos que provienen de la agroindustria son por lo general de naturaleza orgánica, por lo que tienden a descomponerse de forma fácil produciendo lixiviados capaces de incubar microorganismos contaminantes, ocasionando daños en los suelos y cuerpos de agua, así como la emisión de gases causantes del efecto invernadero. La agroindustria consiste en una serie de actividades donde se integra la producción primaria agrícola, pecuaria o forestal, el proceso de beneficio o transformación, además de involucrar actividades de comercialización del producto terminado y lo relacionado con las actividades administrativas, de mercadotecnia y de financiamiento. Durante esta actividad se suele combinar un proceso productivo agrícola con uno industrial con la finalidad de producir materias primas, alimentos o servicios utilizables (Saval, 2012).

En este proceso productivo, es transformada la materia prima en un producto terminado, con la consecuente producción de diferentes subproductos o residuos que pueden ser utilizados en otro proceso productivo o pueden ser desechados, por lo que

requieren de un tratamiento especial para posteriormente ser dispuestos de forma adecuada y de esta manera evitar su impacto negativo en el medio ambiente (Vargas & Pérez, 2018).

Los residuos generados por las agroindustrias poseen en sus componentes características que los hacen óptimos para ser aprovechados. Dentro de los restos agroindustriales que pueden ser reutilizados se encuentran: el bagazo, la paja, residuos de frutas, borra del café, los lodos, las vinazas, residuos de los centrales azucareros, cascarilla de arroz entre otros (Hernández et al., 2016).

En varios países de América Latina poco se aplica el empleo de los desperdicios sólidos generados en el sector agroindustrial, observándose que los residuos resultantes del procesamiento de comidas, restos obtenidos de la poda de jardines, los desechos municipales producto de la limpieza vegetal, los lodos biológicos provenientes de las plantas de tratamiento de diferentes aguas residuales, no son aprovechados teniendo como destino final su depósito en vertederos o rellenos sanitarios. Sin embargo, se está observando un creciente interés por la técnica del compostaje, por ser un proceso que transforma los residuos sólidos orgánicos en un producto útil aplicable a la tierra como abono orgánico sólido, además de constituir una fuente de generación de energía.

El compostaje se presenta como una alternativa en la gestión adecuada de los desperdicios provenientes de la agroindustria, mediante la degradación del material orgánico por la acción de microorganismos que se encargan de alterar la estructura molecular de estos, obteniéndose como producto final el compost, el cual puede ser utilizado como fertilizante o acondicionador del suelo durante la actividad agrícola, así como para la biorremediación del suelo.

Con base a lo antes expuesto, esta obra recopila de forma concreta los diferentes procesos para la transformación de los residuos sólidos que permitan su manejo integral, lo cual involucra la prevención de su generación, su selección y separación en origen, la manipulación de los mismos durante su traslado a los sitios de recolección, además de los diferentes procesos físicos, químicos y biológicos que contribuyen a minimizar tanto su tamaño, su impacto al ambiente y a la salud, su recuperación y aprovechamiento para la generación de otros productos que sirven de insumos para otros procesos productivos, la generación de energía, abono orgánico, fertilizantes, entre otras ventajas que aportan los procesos de transformación de desechos o residuos sólidos.

CAPÍTULO 1.

Concepto, origen y tipos de residuos y/o desechos sólidos.

1.1 Introducción

En tiempos remotos la basura no representaba un problema, sin conocer la fecha exacta donde se empezó a tener la noción de acumulación de basura y de los problemas que ocasionaba como la proliferación de moscas, roedores, carroñeros que a su vez traían consigo un sinfín de enfermedades, los estudios indican que data de hace 10.000 años (García, 2014).

En la antigüedad la generación de basura era casi nula, ya que por la falta de recursos se aprovechaba al máximo lo que se tenía, dándole utilidad a lo que en la actualidad representa un desecho, y el manejo de lo que consideraban que era útil resultaba más fácil porque realmente era muy poco lo que se generaba, y lograban solucionarlo alejándolo de las poblaciones o enterrándolo, ubicándose el primer vertedero municipal hace 400 años a. de C., en Atenas (García, 2014).

Con la evolución del hombre también llegó el consumo masivo y por ende la producción de basura a mayor escala convirtiéndose en un grave problema debido a la inconsciencia de los consumidores quienes sin medir las consecuencias al medio ambiente fueron haciendo de cada espacio un botadero de basura, a la que los entes gubernamentales han tenido que buscarle solución las cuales no siempre son amigables con el ambiente.

La mala gestión de la basura en los últimos años, ha traído consecuencias devastadoras al mundo, afectando directamente al ambiente y la salud humana, ocasionando problemas serios a la sociedad como deslizamientos que han arrastrado

consigo viviendas y han originado la muerte de personas, enfermedades, contaminación de los océanos, entre otros inconvenientes graves, por lo que se han venido realizando estudios e investigaciones orientadas al aprovechamiento de aquellos residuos que puedan tener otra utilidad.

En América latina las ciudades presentan un patrón de crecimiento en cuanto a infraestructura y población sumamente desordenado y acelerado. Este crecimiento ha provocado la degradación del ambiente incitado por la expansión de las ciudades haciéndose necesario una alternativa que involucre el desarrollo sustentable como alternativa a la solución de los problemas ocasionados por la generación de desechos sólidos (Soto-Cortés, 2015).

Toda actividad productiva genera un residuo o subproducto que a su vez trae como consecuencia la contaminación del medio ambiente y por ende la afectación de los ciclos normales de los recursos naturales, generando impacto sobre el paisajismo, la flora, la fauna y hasta en el ser humano. Debido a esto los desechos sólidos o también llamados residuos sólidos constituyen un tema de suma importancia dentro de las políticas públicas urbanas de cada región, ya que es necesario la implementación de mejoras en los sistemas de tratamiento y disposición final de los mismos. Llevar a cabo un correcto manejo de estos trae consigo costos que por décadas han representado un desafío a nivel mundial (Abarca Guerrero et al., 2013).

En la actualidad no existe una planificación en cuanto al uso de los diferentes residuos o subproductos generados por las actividades del ser humano (domesticas, comerciales e industriales), debido a que esto representa una inversión económica grande con todo lo que implica un sistema de gestión adecuada de residuos sólidos, por lo que resulta más económico llevarlos a sitios de confinamientos como los vertederos o rellenos sanitarios, al contrario que valorizarlos mediante procesos como reciclaje, digestión anaerobia o compostaje. Dándoles un tratamiento adecuado un gran porcentaje de los residuos orgánicos podrían ser utilizados en el mejoramiento de suelos como abono orgánico.

En este capítulo se definirán términos como residuos sólidos, desechos sólidos, residuos sólidos urbanos (RSU), también se describirá la generación de los residuos, tipos de residuos, composición, caracterización de los RSU y su importancia.

1.2 Residuos sólidos

1.2.1 Concepto de Residuos sólidos

El hombre, comenzó a realizar modificaciones al ambiente que lo rodeaba en búsqueda de mejorar sus condiciones de vida, se sentaron las primeras bases para urbanizar y crear las sociedades organizadas primitivas; al inicio este cambio tuvo muy bajo impacto, quizás porque las actividades estaban sustentadas por procesos naturales y cíclicos, donde los subproductos que se generaban eran absorbidos naturalmente por los ecosistemas, y que para ese entonces la tecnología que estaba disponible no permitía una explotación intensiva de los abundantes recursos naturales, siendo desconocidos los problemas causados por dichos residuos (UNED, 2021).

Posteriormente, al surgir la revolución industrial, se dio inicio a nuevas y diversas actividades diseñadas para tratar estos problemas, que conllevaron a la aparición de acciones iniciales orientadas al tratamiento requerido por los residuos sólidos, que se estaban generando a ritmo acelerado, originados por los nuevos procesos productivos; pero es a mediados del siglo XX donde el problema causado por la desorganización al recolectar estos residuos, comienza a tener dimensiones críticas originando gran impacto ambiental (UNED, 2021).

Tratando de conseguir una definición clara y correcta del término “residuo”, se observó cierta ambigüedad al encontrar que los términos “desecho” y “residuo” son comúnmente empleados como sinónimos. Motivado a esto, se consultó el diccionario de la Real Academia Española (2021b), donde fue encontrado que el vocablo “residuo” viene del latín “residuum”, y puede significar: a) “una parte o porción que queda de un todo”; b) lo que resulta de disgregar o destruir algo; y c) todo aquel material que resulta inservible y no es utilizado en la elaboración de una labor u operación.

De tal manera que, el término “desecho” es definido por la (Real Academia Española, 2021a), como: a) “aquello que queda después de haber escogido lo mejor y más útil de algo”; b) “cosa que, por usada o por cualquier otra razón, no sirve a la persona para quien se hizo”; y c) “residuo, basura”.

Respecto a lo expresado anteriormente, los dos términos pueden utilizarse indistintamente y que para la definición de “residuo” destaca la subjetividad del término, considerándose entonces: a) depende del criterio del propietario, por ser quien decide si

el objeto tiene alguna utilidad o no, y b) porque es posible reciclar, el residuo ya no lo es para transformarse en insumo de otro proceso (Rondón et al., 2016).

Aunado a esto, todo proceso productivo finalmente genera: el producto deseado, los residuos o subproductos que comúnmente son empleados como materia prima en un proceso diferente y los desechos que deben ser dispuestos de una forma adecuada para evitar generar un impacto que resulte negativo para el ambiente (Rosas-Callejas et al., 2016)

En tal sentido, para dar objetividad al concepto de “residuo”, diferentes legislaciones introducen en sus manuscritos la definición adoptada, encontrando varias acepciones en aspectos y alcances diferentes, tal es el caso de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE), la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), el Convenio de Basilea y el Programa Regional de Manejo de residuos Peligrosos del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), entre otras (Rondón et al., 2016).

La actual problemática derivada de los residuos no es solamente una cuestión de cantidad, sino que involucra la forma cómo están compuestos estos residuos y qué proceso se lleva a cabo para minimizar los problemas tanto ambientales como de salud. Conocer los procedimientos que dan origen a los desperdicios y su composición constituye los primeros pasos para gestionar el procesamiento de los mismos, ya que de allí se derivan la planeación y estrategias a implementarse.

Entre los mayores problemas ambientales de América Latina y del planeta, se encuentran los desechos sólidos, los cuales son generados por actividades humanas y serán definidos por diferentes autores que conocen de los efectos de estos al ambiente, a la salud y la estética del paisajismo. Las principales definiciones encontradas son:

Se definen como residuos, a la materia generada en aquellas actividades que son propias de los procedimientos para la producción y para el consumo que no han alcanzado ningún valor económico, esto puede deberse a la deficiente tecnología diseñada para su aprovechamiento y que no se posee un mercado para los productos obtenidos (Acosta et al., 2019).

Sin embargo, existe una diversidad de definiciones de residuos que contemplan diferentes aspectos, en este sentido se presentan las siguientes definiciones:

Según la Organización de las Naciones Unidas y el Programa Regional de Manejo de Residuos Peligrosos del CEPIS señalan que el residuo es aquel material que no posee un valor de uso directo y que es descartado por su propietario (Martínez, 2005).

Por otra parte, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente establece que residuo “incluye cualquier material descrito como tal en la legislación nacional, cualquier material que figura como residuo en las listas o tablas apropiadas, y en general cualquier material excedente o de desecho que ya no es útil ni necesario y que se destina al abandono” (Martínez, 2005, p. 16).

En el Convenio de Basilea es definido el residuo como “las sustancias u objetos a cuya eliminación se procede, se propone proceder o se está obligado a proceder en virtud de lo dispuesto en la legislación nacional”(Martínez, 2005, p. 16).

Por su parte la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) define al residuo como “Todo material (sólido, semisólido, líquido o contenedor de gases) descartado, es decir que ha sido abandonado, es reciclado o considerado inherentemente residual” (Martínez, 2005, p. 16).

En las leyes venezolanas vigentes, destacaba la ley de residuos y desechos sólidos la cual fue derogada por la Ley de gestión integral de la basura (Ley de Gestión Integral de la Basura, 2011), en dicha ley, así como en los organismos responsables en el procesamiento de los restos sólidos (MINEC) se definen los siguientes términos:

- Residuo sólido: todo material remanente o sobrante de labores humanas, que en base a sus características biológicas, físicas y químicas puede ser utilizado en otras actividades. Este concepto implica que todo residuo sólido puede ser reciclado y reutilizado.
- Desecho solido: material remanente de cualquier actividad, operación o proceso que no se va a usar en otra actividad o cuyo destino no implique un uso inmediato del mismo. El sinónimo informal usado para este término es “Basura”.
- Residuos sólidos urbanos (RSU): son todos los restos en estado sólido que son producidos en una comunidad urbana y que su disposición debe estar realizada de forma apropiada. Comprenden todos aquellos residuos domésticos, comerciales, institucionales e industriales.

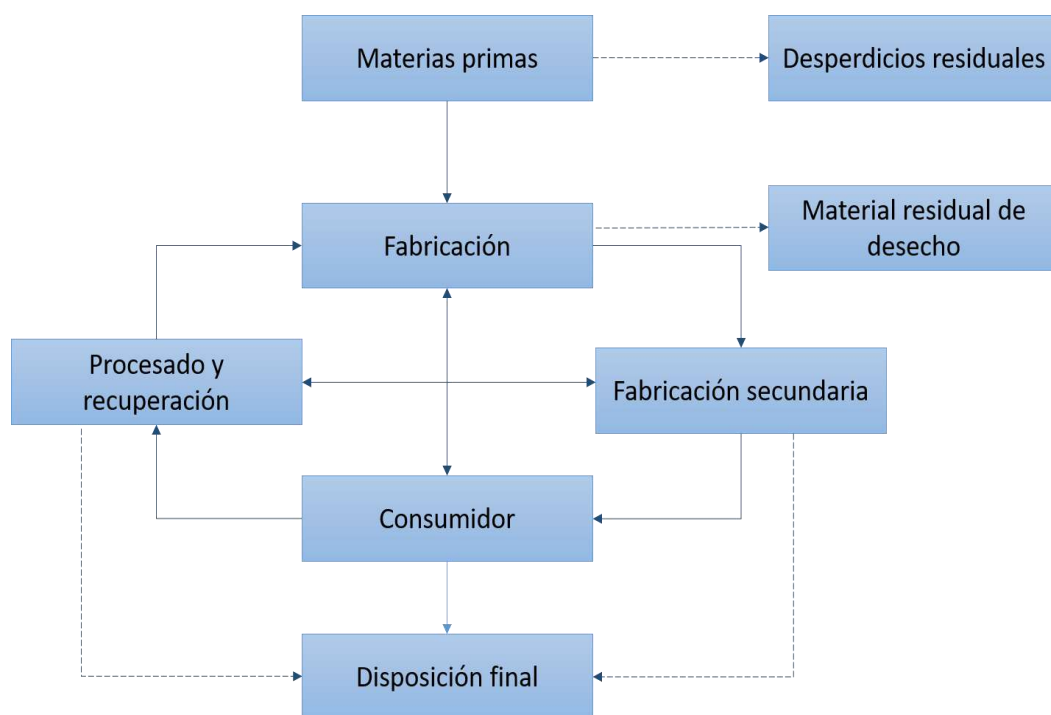
En todo proceso productivo se generan residuos en cada una de las etapas del proceso, desde que ingresan las materias primas, realizándose una selección y limpieza de las

mismas obteniéndose de esta forma los primeros desperdicios, luego entran en el proceso de fabricación para ser transformadas y donde son utilizadas sólo las partes de interés descartándose un porcentaje que puede ser menor o mayor dependiendo del producto que se desea obtener, generándose también material residual de desecho, hasta la obtención del producto final que dependiendo de los estándares de calidad requeridos por la empresa puede ser reprocesado o ir directamente al consumidor quien una vez que hace uso del producto también genera desperdicios como pueden ser los empaques (bolsas, latas, frascos, cajas, entre otros).

La Figura 1 muestra el proceso de generación de residuos mediante un diagrama de flujo:

Figura 1

Diagrama de proceso de generación de residuos



Nota: Figura de *Gestión integral de residuos sólidos* (p.8), por Tchobanoglous et al., (1998), McGraw Hill México (https://scholar.google.co.ve/scholar?q=tchobanoglous.+g.+1998.+gestion+integral+de+residuos+s%C3%B3lidos&hl=es&as_sdt=0%2C5&as_vis=1&lookup=0&as_ylo=1998&as_yhi=1999)

1.2.2 Clasificación de los residuos sólidos

Los residuos sólidos pueden ser clasificados de la siguiente manera:

- A. Según la fuente donde se originan los residuos sólidos (Davis & Masten, 2005).
 - Residuos domésticos o residenciales: son todos aquellos residuos que son producidos en las casas, viviendas y/o edificios residenciales.

- Residuos comerciales: todos los que son originados en las panaderías, oficinas, restaurantes, locales comerciales, zapaterías, locales de recreación y comercio en general que no representen una amenaza o peligro eminente para la salud de los habitantes que los circundan y ambiental.
- Residuos industriales: los restos que son originados en industrias y fábricas. Aquí se incluye también los restos que son asimilables a urbanos: como bolsas, cartones, envases, y todo aquel residuo que no representen una amenaza o riesgo para la salud y ambiental.
- Residuos institucionales: los que son originados en colegios, escuelas, liceos, universidades, iglesias, templos, tribunales y/o edificios públicos.
- Residuos por construcciones y demolición: todos aquellos residuos originados en todas aquellas obras donde se lleva a cabo la rehabilitación y construcción.
- Residuos sanitarios: los que son producidos en los ambulatorios, hospitales, clínicas.
- Residuos mineros: aquellos que son obtenidos en la explotación minera.
- Residuos radioactivos: son aquellos residuos originados en actividades donde se manipula con sustancias químicas radioactivas y requieren sistemas especiales para finalmente ser dispuestos.
- Residuos originados en las plantas de tratamiento: constituye los lodos no peligrosos producidos en dichas plantas, que no represente una amenaza o riesgo para la salud y del ambiente y siendo considerados una fracción de los RSU.

En la Tabla 1 que sigue a continuación, describe la instalación, actividades y el tipo de residuos sólidos generados de acuerdo al tipo de fuente:

Tabla 1

Fuentes de residuos sólidos en una comunidad

Fuente	Instalación, actividades o lugares típicos donde se generan	Tipos de residuos solidos
Residencial	Habitaciones separadas unifamiliares y multifamiliares. Apartamentos	Residuos de alimento, papel, cartón, plástico, textiles, cuero, recortes de jardín, aluminios, madera, metales, vidrio, latas, cenizas, hojas, residuos especiales (artículos con un volumen elevado, aparatos electrónicos, línea blanca, desechos de jardín, neumáticos, baterías y aceite), residuos domésticos considerados peligrosos.

SISTEMAS DE TRATAMIENTO Y VALORIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

Méndez P., Arcos, J., Ureta, R., Freytez E.

ISBN 978-987-82816-3-6

Fuente	Instalación, actividades o lugares típicos donde se generan	Tipos de residuos sólidos
Comercial	Tiendas, edificios de oficinas, restaurantes, moteles, hoteles, mercados, imprentas, talleres neumáticos y gasolineras.	Madera, metales, papel, plástico, cartón, residuos de madera, vidrio, residuos especiales, entre otros.
Institucional	Centros gubernamentales, escuelas, hospitales, prisiones.	Igual que el comercial
Construcciones y demoliciones	Nuevos sitios de construcción, reparación/renovación de caminos, demolición de construcciones, pavimento roto.	Madera, acero, concreto, tierra.
Servicios municipales (menos instalaciones de tratamiento)	Limpiezas de calles, camellones, limpieza de artejeas, parques y playas, otras áreas recreativas.	Residuos especiales, basura, basura de las vías, recortes de camellones y árboles, residuos generales de parques, playas y áreas recreativas.
Plantas de tratamiento de aguas residuales PTAR	Procesamiento de agua, agua residual e industrial	Tratamiento de los restos obtenidos de fábricas, principalmente formados por lodos residuales.
Residuos sólidos municipales	Todas las anteriores	Todas las anteriores
Industrial	Construcción, manufactura tanto ligera como pesada, refinerías, plantas químicas, centrales eléctricas, demolición y otras	Residuos de procesos industriales, incluyendo alimentos, cenizas, basura, escombros producto de alguna construcción o demolición, residuos especiales y residuos considerados como peligrosos.
Agrícola	Cosechas realizadas en los campos y en surco, huertas, viñedos, avícola, ganado, granas.	Restos alimenticios echados a perder, residuos agrícolas, desperdicios y restos peligrosos.

Nota: Tabla de *Ingeniería y Ciencias Ambientales* (p.519), por Tschobanoglous, et al. (1993) citados por Davis & Masten (2005), McGraw Hill Interamericana, México D.F (<https://es.scribd.com/doc/247864072/Ingenieria-y-Ciencias-Ambientales-Davis-Masten>).

El termino residuos sólidos municipales (RSM) incluye todos aquellos residuos que son producidos en la comunidad, excepto los derivados de los procedimientos realizados en alguna industria allí instalada y los originados de actividades agrícolas.

B. Por su naturaleza química se establecen dos categorías de residuos (Davis & Masten, 2005):

- 1) Residuos inorgánicos (No biodegradables): encierra a los restos de minerales y otras sustancias o aquellos compuestos que el hombre procesa. En esta clasificación también se encuentran incluidos materiales como metales, plásticos, vidrios, entre otros, además de considerar restos de algunos productos agroquímicos, agrotóxicos,

fitosanitarios y agro veterinarios, que mayormente son sintéticos y dejan un efecto residual.

- 2) Residuos orgánicos (biodegradables): constituye todos aquellos materiales originados de los seres con vida, vegetales o animales. Entre ellos se incluyen una variedad de residuos que se originan de forma natural durante el “ciclo vital”, producto de aquellas actividades llevadas a cabo por el hombre.

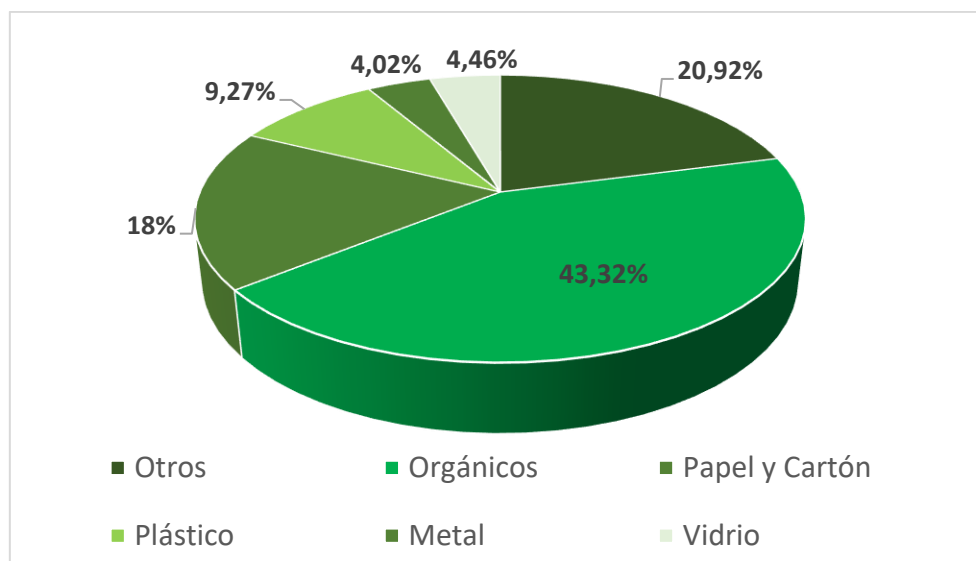
C. Por su estado físico, los residuos son clasificados en: sólidos, líquidos y gaseosos.

1.2.3 Composición de los RSU

Los residuos sólidos urbanos (RSU) son originados en las poblaciones, producto de diversas actividades llevadas a cabo de forma diaria y habitual por el hombre y los mismos pueden estar compuestos por cualquiera de los siguientes materiales: vidrio, cartón, papel y restos orgánicos (representando la fracción más grande de los restos urbanos en peso), plásticos, textiles, metales (mobiliario, latas, herramientas y otros); escombros y madera (Ambientum, 2021). A nivel mundial y en la región de América Latina y El Caribe se puede apreciar la variación en las proporciones de la composición de los residuos sólidos (Ver Figuras 2 y 3).

Figura 2

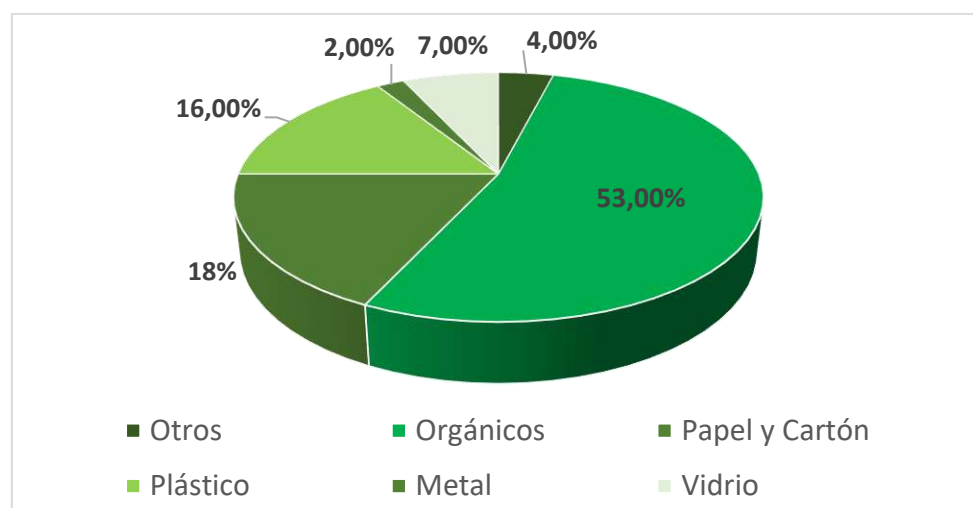
Composición de los residuos sólidos a nivel mundial



Nota: Figura de *Waste Atlas 2013 Report* (p.37), por D-Waste (2013), Internacional (<https://www.waste.ccacoalition.org/document/waste-atlas-2013-report>).

Figura 3

Composición de residuos sólidos en Brasil



Nota: Adaptación de *Sustainable financing and policy models for municipal composting*, Tabla del apéndice 6 (p. 98), por Kaza et al. (2016). World Bank Group, Washington D.C (<https://www.waste.ccacoalition.org/document/sustainable-financing-and-policy-models-municipal-composting>).

Estos residuos son productos de diversas actividades que son realizadas en los domicilios, servicios públicos, construcciones y establecimientos comerciales, también

como aquellos restos industriales los cuales son derivados de sus procesos productivos. Tanto la cantidad, como los constituyentes de los RSU dependen de ciertos factores de tipo económico y social, además de factores a nivel cultural, las costumbres, el clima y las cualidades propias de las poblaciones (Ambientum, 2021).

1.2.4 Caracterización de los RSU y su importancia

Conocer lo relacionado con las fuentes, la cantidad y los componentes de los desperdicios sienta las bases para todas las etapas de un plan exitoso para gestionar los residuos sólidos. En particular, comprender los siguientes factores ayuda a las ciudades a diseñar e implementar estrategias para mejorar aspectos específicos de sus estrategias sólidas para gestionar dichos residuos (EPA, 2002):

- a) Prevención y disminución de residuos: comprender el movimiento de desarrollo de residuos ayuda a las autoridades de la localidad y a los organismos autorizados de tomar decisiones a desarrollar campañas de difusión y la ejecución de medidas específicas en lo político. En este caso se tienen las campañas de difusión podrán alentar a los generadores a gran escala de restos orgánicos (p. ej., mercados de producción) a construir biodigestores para generar biogás y digestato como enmienda para suelos, un aditivo capaz de proporcionar mejoras significativas al suelo el cual es obtenido con los restos de producto de los alimentos. Las ciudades también pueden utilizar los datos originados en estudios donde se caracterizan restos para identificar materiales que no son reciclables para poder implementar en ellos las estrategias de extensión en prevenir que se produzcan más restos.
- b) Recolección de residuos: comprender el movimiento en la producción de estos, ayuda a las autoridades y aquellos entes u organismos responsables en tomar decisiones a planificar las inspecciones y los proyectos para recolectarlos y su almacenamiento (por ejemplo, conocer tanto la cantidad como la tipología de restos orgánicos generados influirá en las decisiones sobre los posibles programas de clasificación en origen).
- c) Reciclaje y procesamiento de residuos: comprender el movimiento de producción de restos ayuda a las personas con autoridad en la localidad y aquellos entes a quienes se les delega tomar las decisiones a desarrollar una infraestructura adecuada y a planificar los cambios que son efectuados en el movimiento en

producción de estos restos causado por los cambios estacionales y las vacaciones. Se cuenta como un ejemplo particular es que una ciudad necesitaría conocer la cantidad real de restos orgánicos producidos en los límites de esta ciudad, para tomar decisiones sobre el tamaño adecuado de la instalación potencial de compostaje que también pueda manejar un aumento del movimiento de entrada durante ciertos periodos.

- d) Eliminación de residuos: comprender el movimiento de producción de estos restos ayuda a que las personas autorizadas de la localidad y demás entes sobre los que recae el tomar las decisiones a planificar como eliminar estos residuos. Para este caso en particular, un estudio sobre la caracterización de residuos contenidos en un vertedero existente puede contribuir a que en una ciudad se determine la situación de referencia y la efectividad del programa para gestionar los residuos sólidos, estimar el tiempo de utilidad restante del vertedero y planificar más opciones de procesamiento y desvío de residuos en un futuro próximo. La seguridad es una preocupación general en las etapas para gestionar los restos sólidos. Existen residuos que requieren un manejo especial porque son altamente corrosivos, a su toxicidad u otras características peligrosas. Comprender como están compuestos los residuos permite al personal tomar las precauciones correspondientes.

1.2.5 Evaluación del flujo en la producción de residuos

Es necesaria una evaluación de referencia fundamentada en las características actuales del flujo en la producción de restos para proyectar las tasas futuras al generar dichos restos y de composición. Es necesario comprender qué recursos (de capital u otros) podrán necesitar las poblaciones en un período corto para gestionar adecuadamente diferentes fracciones del flujo al producir los restos.

- a) Fuentes: existen varias categorías según su origen. Las categorías comunes al producir residuos incluyen:
- ✓ Residencial: incluye todos los hogares, como viviendas unifamiliares, apartamentos y viviendas formales e informales. Producir restos por este sector generalmente incluyen residuos orgánicos, textiles, papel y pequeñas porciones de vidrio, caucho, cuero y metales. También se incluye una pequeña porción de plástico; esta fracción

suele aumentar a medida que crece la economía y la globalización. Estos residuos que son considerados como domésticos peligrosos son un subconjunto de los restos que se producen a nivel residencial que incluyen productos químicos como pinturas, solventes, agentes de limpieza, baterías y aparatos electrónicos.

- ✓ Comercial: incluye edificios de oficinas, centros comerciales, hoteles, aeropuertos, restaurantes y mercados. Los mercados, restaurantes, comedores y hoteles generan flujos de restos con un porcentaje elevado de residuos alimentarios y otros componentes orgánicos. Las oficinas, hoteles y los almacenes tienden a generar cantidades grandes de desperdicios que son reciclables como papel, plástico, cartón y vidrio.
- ✓ Institucional: incluye escuelas, centros médicos y prisiones. Las instalaciones institucionales a menudo producen cantidad alta de basura constituida por papel. Algunas instituciones, incluidos los hospitales y las escuelas, suelen generar grandes cantidades de restos alimentarios. Las instalaciones médicas generan residuos peligrosos, estas no deben manipularse junto a restos sólidos generales.
- ✓ Industrial: incluye instalaciones de fabricación o procesos industriales. Los diversos componentes de embalaje, residuos de comedores y baños, textiles, residuos de metal, restos de madera, la mampostería o concreto y demás residuos similares son residuos típicos de las fábricas. El residuo que es producido va a estar relacionado con los procesamientos industriales o del tipo de industria, pero generalmente es producido en grandes cantidades. Generalmente, las industrias producen residuos peligrosos y no peligrosos, es por ello que entre las prácticas más idóneas está el garantizar que los restos que son clasificados de peligrosos se manejen según los requisitos legales del país, no se mezclen y recolecten con restos sólidos considerados como no peligrosos (ONU-HABITAT, 2010).

- b) Cantidad: dos opciones básicas determinan la cantidad de desperdicio, el modelado y la medición. Muchas ciudades utilizan técnicas de modelado que suelen depender de las tasas calculadas al producir restos genéricos para estimar la cantidad de restos producidos total. Estas técnicas suelen ser económicas, pero solo proporcionan una idea general de los volúmenes y del tipo de restos. El utilizar dichos datos genéricos aumenta la probabilidad en

realizar un cálculo erróneo de las cantidades y de las tasas en la producción de estos restos (ONU-HABITAT, 2010). Esto implica que los resultados del modelado pueden no reflejar el movimiento al producir los restos locales de manera veraz. Las técnicas de modelado funcionan mejor si los datos de la cantidad de restos producidos provienen de una localidad vecina con características demográficas y fuentes similares, y se verifican posteriormente con la aplicación de métodos de prueba físicos.

Las técnicas de medición física son más precisas que las de modelado, pero son también más costosas y consumen más tiempo. Dichas técnicas implican tomar muestras del flujo al producir restos locales para desarrollar un perfil de residuos con la aplicación de métodos estadísticos para predecir la cantidad y composición total del flujo al producir los restos mediante la investigación de un volumen pequeño de residuos. Esta auditoría puede ser desafiante porque la porción de muestra debe ser analizada varias veces en el año para dar cuenta de las modificaciones estacionales (EPA, 1995). Una variedad de técnicas de medición, que podrán llevarse a cabo únicamente o combinarse con otras técnicas, incluyen (United Nations Environment Programme, 2009):

- ✓ Medir en el punto de generación: las técnicas de muestreo miden los residuos generados, realizando una encuesta en cada hogar. Algunas ciudades también realizaron estudios en ciertas instalaciones institucionales, industriales y comerciales.
- ✓ Examinar los registros que mantienen quienes generan residuos: algunos generadores comerciales, industriales e institucionales pueden tener registros de las cantidades de restos que generan. Las ciudades podrían utilizar esta información para estimar las cantidades generadas por estos sectores.
- ✓ Realizar encuestas de vehículos: las encuestas relacionadas con los vehículos autorizados para recolectar los desperdicios proporcionan estimaciones de los desperdicios producidos por diferentes fuentes y como se gestionan (p. ej., tratamiento, eliminación). Cabe resaltar que, esta técnica no toma en cuenta aquellos residuos no recolectados o eliminados incorrectamente.

- ✓ Examinar los registros en los sitios de eliminación: en estas instalaciones de eliminación pesan los residuos entrantes. Si bien estos registros proporcionan una estimación de los restos desechados en una instalación, no capturan la porción que se genera y es tratada (p. ej., reciclaje, compostaje) o eliminada incorrectamente (p. ej., quema abierta).

- c) Composición: muchas ciudades han utilizado estudios de caracterización (o composición) de restos que les permitió identificar los tipos y cantidades específicos de materiales constituyentes del flujo con que se producen los residuos en un espacio designado. Estos estudios, que generalmente implican clasificar las muestras de restos a mano, pueden personalizarse para satisfacer las necesidades locales. La exhaustividad de las categorías y las clases que existen de materiales medidos depende de aquellos objetivos planteados en el trabajo y las clases de desperdicios prevalentes en una ciudad en particular (Ver Tabla 2). Los diversos estudios de caracterización de residuos generalmente se realizan en las siguientes ubicaciones:
 - ✓ Sitios de generación de residuos: los estudios de caracterización mediante la selección de diversas muestras de residuos recolectadas de residencias o en áreas comerciales (p. ej., en mercados de productos alimenticios).
 - ✓ Estaciones de transferencia: aquellos restos que se recolectan en los espacios donde son generados (p. ej., hogares y negocios) suelen ser almacenados en un establecimiento para transferencia para después ser trasladados al sitio de eliminación. Las muestras en estas estaciones podrán proporcionar un perfil de los restos de dicha ciudad respecto a su composición. El muestreo en múltiples estaciones podría proporcionar información relevante relacionada con la ciudad y proceder de forma acertada en la toma de decisión.
 - ✓ Vertederos: los residuos entregados al vertedero o basurero local pueden muestrearse para de esta manera poder precisar los componentes de estos restos. Registrar la fuente (p. ej., vecindario y sector) de donde se provienen los residuos permite realizar un análisis más detallado de la caracterización.

Tabla 2

Categorías de residuos de muestra y materiales para la caracterización de residuos

Categorías de residuos	Tipo de material	Ejemplos
Papel	Diarios/impresión Papel compostable Cartón corrugado Papel de oficina Mezcla de papel Contenedores recubiertos de cera	Periódicos Pañuelos, servilletas, toallas, Cajas de embalaje/envío Sobres, papel para fotocopidora, papel membretado Revistas, correo basura, cartón, catálogos, guías telefónicas Cajas de leche/jugo Yogur, gaseosa, mantequilla, prescripción, leche, detergente, macetas Bolsas de compras/basura, película suelta, empaque de alimentos Empaques plásticos, cubiertos, tazas Baldes, juguetes, bolsos de almacenamiento, muebles
Plástico	Envases/frascos de plástico (Nº 1 a 7 y no identificados) Películas. Poliestireno Otro plástico rígido	Hueso Verduras, carne, pan Pañales desechables Materiales pequeños indistinguibles, generalmente de 0 a 2 centímetros Materiales que no entran en ninguna otra categoría
Residuos alimentarios	Hueso Sobras de comida	Hueso Verduras, carne, pan Pañales desechables
Otros residuos sólidos	Pañales desechables Residuo fino Otros residuos	Materiales pequeños indistinguibles, generalmente de 0 a 2 centímetros Materiales que no entran en ninguna otra categoría
Metal	Trozos de metal Contenedores ferrosos Contenedores no ferrosos	Trozos de metal, tanto ferroso como no ferroso Latas de alimento para mascotas, latas de sopa, aerosoles Latas de refrescos, latas de cerveza Todos los vidrios transparentes Todos los vidrios de color
Vidrio	Vidrio transparente Vidrio de color	Materiales de madera: arbustos, ramas, tocones Follaje, césped, materiales no leñosos Algodón
Residuos de jardinería	Fibra de planta dura Residuos del jardín	Ropa, zapatos, tela, toallas, trapos Cinturones, zapatos, carteras Guantes Teléfonos celulares, radios, computadoras Pintura, baterías, instrumentos médicos cortopunzantes, productos químicos, residuos médicos
Otros productos orgánicos	Algodón Textiles Cuero Caucho	
Electrónica	Electrónica	
Peligroso	Peligroso	
Residuos inertes	Palés/madera aserrada/madera Utensilios de barro/cerámica Materiales de construcción	Palés, trozos de madera Platos, tazas Grava, ladrillos, asfalto, concreto, suciedad.

Nota: Adaptación de *Municipal solid waste*, por EPA (2016). United States Environmental Protection Agency (<https://archive.epa.gov/epawaste/nonhaz/municipal/web/html/>).

Los residuos presentan ciertas características que fluctúan según la ubicación debido al reciclaje y las prácticas de eliminación inadecuadas. La ubicación para la caracterización de los restos debe seleccionarse tomando en consideración el objetivo

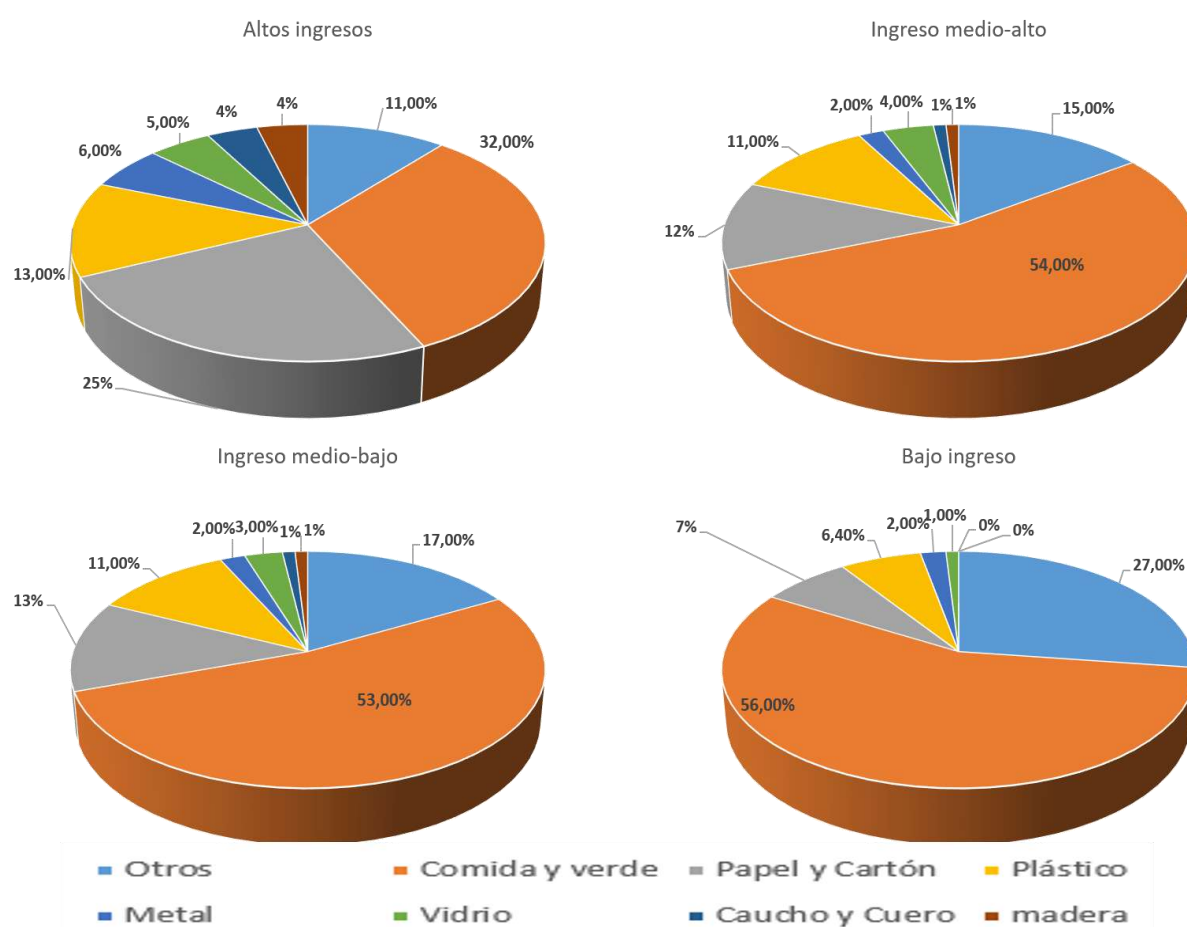
analítico deseado. Los esfuerzos en la caracterización de los restos donde son generados podrían cooperar en la difusión para aquellos que generan residuos, los realizados en los espacios de eliminación podrían ayudar a identificar opciones de tratamiento alternativas, especialmente cuando estos espacios para la eliminación se quedan sin capacidad.

Muchas ciudades han encontrado útil considerar las siguientes tendencias generales orientadas a clasificar los componentes que tienen los restos sólidos al realizar la planificación a un periodo largo cuando se busca una adecuada eliminación de residuos:

- ✓ La porción de restos de papel, plástico (particularmente embalaje) y residuos electrónicos generalmente aumenta mientras mejora la situación económica.
- ✓ La porción de restos de alimentos y residuos verdes generalmente disminuye cuando mejora la condición económica (Ver Figura 4).

Figura 4

Composición global de los residuos por nivel de ingresos



Nota: Adaptación de *What a waste 2.0 A global snapshot of solid waste management to 2050, Fig. 2.9 (p. 30)*, Kaza et al. (2018). World Bank Group, Washington D.C (<https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>).

La densidad de los desperdicios disminuye con niveles crecientes de desarrollo a nivel económico debido al elevado porcentaje en productos plásticos y de papel, junto con una fracción más baja en cenizas y restos de alimentos (Savage et al., 1998).

1.3 Residuos orgánicos y porque enfocarse en ellos

En su investigación Contreras et al. (1995), definen que: “Los residuos orgánicos son biodegradables y se descomponen de forma natural. Estos poseen la cualidad de degradarse rápidamente y de generar un tipo diferente de resto orgánico. Entre ellos están restos de frutas, vegetales, verduras, carnes huevos entre otros” (p.23).

Por tal razón, los residuos orgánicos pueden definirse como los materiales biodegradables, que se desechan de las actividades realizadas a diario, los mismos, sin tratamiento alguno, actúan como contaminantes, por estas razones es fundamental, aplicar técnicas para ser transformados en un producto final de utilidad.

Según la Guía Técnica Colombiana GTC 53-7 del Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC, 2006), los residuos sólidos orgánicos son definidos como aquellos materiales sólidos o también semisólidos que se originan del animal, humano o vegetal que son abandonados, botados, desechados, descartados y rechazados, además son susceptibles de sufrir biodegradación, se incluyen aquellos que son considerados como subproductos orgánicos producto de los procedimientos industriales, toda vez que estos hacen parte del ciclo de vida por el que pasan los restos sólidos.

Cabe destacar que los residuos sólidos orgánicos son generados por actividades como la ganadería, agricultura, agroindustrias, tenería, restos forestales, plantas para el procesamiento de aguas que generan lodos, productos generados de las operaciones comerciales, domésticas y plazas de mercado. Estos restos producidos en cada caso

presentan ciertas características con proporciones diferentes haciéndolas ampliamente variables (Salamanca, 2014).

Los residuos orgánicos en el flujo de los restos sólidos generalmente se dividen en dos categorías:

- **Perdida de alimentos y generación de residuos:** los residuos alimentarios incluyen a los productos sin usar de fuentes previas al consumo (mercados y restaurantes) y los alimentos sobrantes después del consumo. Si los alimentos se dañan son incluidos como productos no utilizados del sector agrícola.
- **Residuos verdes:** incluyen los obtenidos de jardines, paisajismo y poda de árboles

En gran parte de los casos, los residuos orgánicos son recolectados y se eliminan en basureros o vertederos. Esta práctica es preocupante por varios motivos:

- **Costos de recolección, transporte y eliminación:** los residuos orgánicos generalmente son muy densos y tienen un alto contenido de humedad. Transportar cantidades muy grandes de residuos orgánicos desde los lugares de generación hasta los de eliminación aumenta los índices de consumo de combustible y las tarifas de los vertederos.
- **Pérdida de nutrientes:** los residuos orgánicos son una fuente rica de nutrientes que podrían utilizarse para enriquecer tanto la silvicultura urbana como la tierra agrícola.
- **Impacto sobre los lugares de eliminación:** gestionar los lixiviados y gas y lograr un cambio estructural sobre la descomposición orgánica son algunas de las estrategias más costosas en los vertederos. Además, eliminar excesivas cantidades de restos orgánicos en los vertederos reduce la vida útil de esas instalaciones.
- **Impacto Ambiental sobre la calidad del aire local y el cambio climático:** cuando los residuos orgánicos se descomponen, contribuyen a que se contamine el agua, el aire y el suelo. Por ejemplo, cuando los residuos orgánicos se descomponen en condiciones anaeróbicas se produce gas metano. Este gas metano representa un contaminante climático de corta duración y un precursor del ozono, un contaminante del aire a nivel del suelo. Esta liberación de metano que se produce en los vertederos provoca incendios que producen que se contamine el aire local,

así como emisiones de carbono negro que contribuyen al cambio climático. El lixiviado ocasiona que se contamine el agua y el suelo. Finalmente, los restos que son considerados orgánicos al empezar a descomponerse también causan problemas de mal olor.

1.4 Opciones de tratamiento de los residuos orgánicos

Las opciones de tratamiento de los restos orgánicos generalmente se dividen en dos categorías:

- Compostaje: es la descomposición controlada de compuestos orgánicos en presencia de oxígeno. El compostaje requiere tres pasos generales:
 1. Combinar diferentes tipos de residuos orgánicos, como desperdicios alimenticios, restos de jardinería y estiércol.
 2. Agregar virutas de madera, papel triturado u otros agentes de relleno para acelerar la descomposición de los restos orgánicos, y
 3. Permitir que el abono se estabilice y madure mediante la aplicación de un procedimiento de curado.

Las industrias en su mayoría utilizan el compostaje para convertir estos lodos en materia orgánica, o en sólidos estables, reducir su masa, eliminar el volumen excesivo de agua además de destruir todas las bacterias que causen daño. Según Escobar et al. (2012), la colocación de lodos sobre los suelos, permite “una valorización del lodo gracias a los nutrientes que contiene, y mejoran las cualidades del suelo; ya que proporcionan nutrientes, facilitan el transporte de dichos nutrientes, incrementan su capacidad para retener el agua y mejoran el suelo cultivable” (p.13).

- La digestión anaerobia (DA): implica la descomposición de materiales orgánicos por parte de microorganismos en ausencia de aire. Los productos del proceso de DA incluyen el biogás, proporcionan energía que contiene principalmente dióxido de carbono, metano y el digestato. El digestato es el residuo que queda una vez que los materiales orgánicos se digieren de manera anaeróbica, y es rico en nutrientes y puede usarse como fertilizante para los cultivos.

1.5 Pasos para implementar un sistema de gestión de residuos orgánicos

Los pasos para la operacionalización de un sistema para gestionar restos orgánicos incluyen:

- a) Comprender el flujo de residuos: el desvío de residuos orgánicos debe basarse en el tipo de residuo generado y la fuente del residuo. Desde este enfoque, al diseñar un programa de desvío se debe basar en los datos que se obtienen de una caracterización de los residuos.
- b) Promulgar políticas de apoyo: las políticas locales como reglas de separación obligatorias, contribuirán a fomentar los esfuerzos orgánicos de desvío.
- c) Comprender las opciones tecnológicas: las opciones de tratamiento dependerán del tipo de residuo generado y de diversas condiciones locales.
- d) Inclusión de las partes interesadas: las comunicaciones y la difusión son componentes fundamentales de los programas efectivos de desvío de residuos orgánicos, ya que pueden ayudar a impulsar las tasas de desvío.
- e) Garantizar la calidad: los productos, incluido el compost y el digestato obtenidos del procesamiento de los restos orgánicos deben ser de alta calidad para garantizar que no contaminen la tierra donde se aplican.
- f) Garantizar la seguridad: las instalaciones para el tratamiento presentan variedad de peligros, incluidos los mecánicos, las explosiones y los relacionados con materiales sensibles a la combustión.

1.6 Residuos agroindustriales

1.6.1 Concepto de residuos agroindustriales

El sector agroindustrial es uno de los que mayor producción de desperdicios genera y que pueden ser aprovechados, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 1997) define la agroindustria como el conjunto de actividades económicas que favorecen la transformación de los productos que proceden de la agricultura, la pesca, la ganadería y del área forestal.

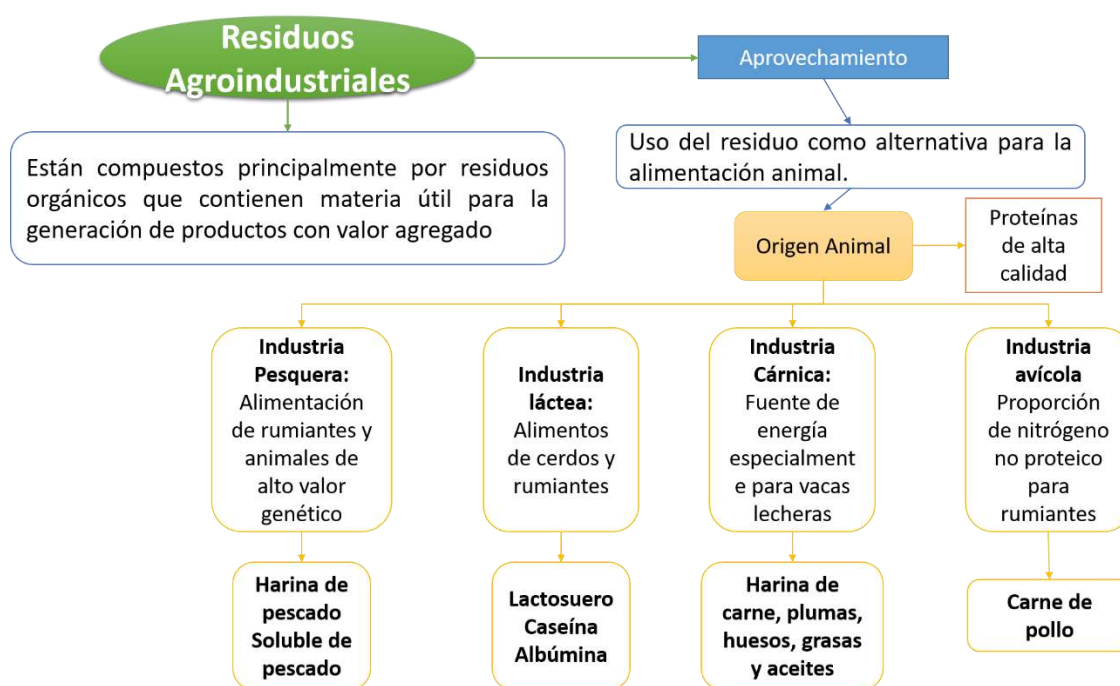
Investigadores como Cury R. et al. (2017), plantearon que los residuos agroindustriales son los obtenidos al someterse a diversos procesos de adecuación o transformación de las materias primas empleadas por la agroindustria, mientras que Mejías-Brizuela et al. (2016), agregan que el número de los procedimientos agroindustriales que generan residuos de distinta naturaleza es cuantioso; puede ser a

nivel primario, como la agricultura, las producciones pecuarias, acuícolas y forestales; o en procesos de transformación con insumos de origen biológico.

En la investigación llevado a cabo por Vargas & Pérez (2018), se menciona que los residuos agroindustriales tienen un potencial alto para que puedan ser aprovechados en procesos diferentes entre los que se incluye la creación de productos nuevos, aporte de mayor valor agregado a los productos originales y la recuperación de las áreas que a nivel ambiental fueron alteradas. Siguiendo ese orden de ideas en las figuras 5 y 6 se pueden apreciar como pueden ser reutilizados los residuos agroindustriales de acuerdo a su origen.

Figura 5

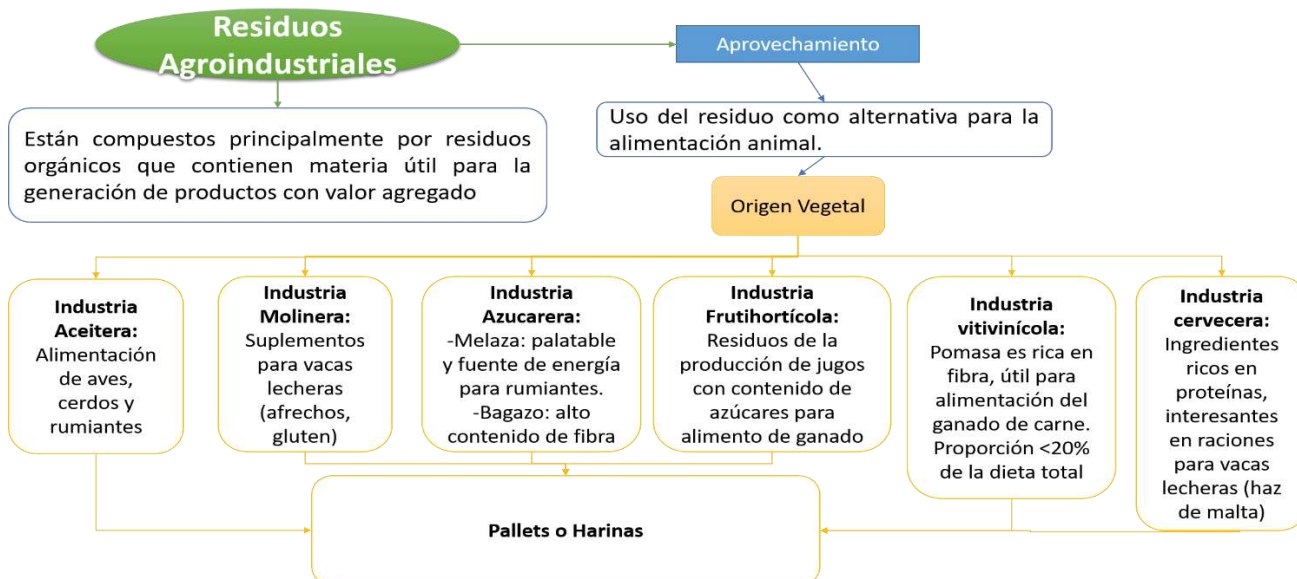
Aprovechamiento de los residuos agroindustriales origen animal



Nota: Elaboración propia, 2022.

Figura 6

Aprovechamiento de los residuos agroindustriales origen vegetal



Nota: Elaboración propia, 2022.

1.6.2 Tipos de residuos agroindustriales y que industria lo genera

Debido a la diversidad de empresas agroindustriales, se generan también una gran variedad de residuos desde la cosecha, acopio, distribución y en su industrialización, comercialización y consumo. Algunas de las agroindustrias y su generación de residuos se nombran a continuación:

- En el sector agrícola, en la cosecha de los cultivos se generan residuos primarios como hojas y tallos de las plantas de maíz, paja de trigo, vainas y tallos de sorgo, paja de cebada, paja de frijol, cáscara de algodón, entre otros. De la postcosecha se generan residuos secundarios durante el procesamiento como mazorcas, bagazo de maguey o agave, pulpa de café, entre otros (Valdez-Vázquez et al., 2010).
- La industria azucarera durante la cosecha se generan desperdicios como puntas y hojas de caña de azúcar, y en el procesamiento se genera residuos coproductos y subproductos tales como bagazos, cachazas, melazas, vinazas, sacarosa y aguas residuales (Zafranet, 2016).
- En la industria para la elaboración de productos como néctares, zumos y mermeladas se utiliza sólo la pulpa y se desecha la piel o cáscara, las semillas, entre otras (Ramos-Casselis, 2015).

- En la industria cafetalera y del cacao se genera cascara, cascarilla, mucílagos y aguas residuales (Abarca et al., 2010).
- La agroindustria de origen animal genera también residuos como los estiércoles, purines y subproductos como pelos o plumas, además de aguas residuales producto del bañado de los animales (Gavilanes, 2016).
- La industria cárnica genera como residuos las pieles de los animales, vísceras, huesos, cascos, pesuñas, sangre, intestinos, pelos, entre otros.
- En la industria de licores: el sector vitivinícola, durante la vendimia genera hojas, tallos, frutos de bajo valor comercial o podridos, durante el proceso de selección se descarta el sarmiento de vid (Hidalgo, 1991). En la producción de tequila se desechan las pencas.
- La industria maderera: aserrín, trozos de madera, potes de pinturas, entre otros.

La producción de residuos en la agroindustria en las distintas fases de sus procesos, se ha convertido en una problemática a nivel mundial, ya que en la mayoría de estas compañías no son dispuestos de forma adecuada, lo cual contribuye con que aumente la contaminación ambiental (Vargas & Pérez, 2018).

Dentro de los daños ambientales más importantes ocasionados por la generación y acumulación de residuos de naturaleza agroindustrial, según Hernández & Román (2016) están:

- Aumento de la polución y la contaminación, lo cual genera inconvenientes en el bienestar de la población.
- Proliferación de vectores epidémicos, ratas, cucarachas, moscas y mosquitos.
- Emisión de los desfavorables gases causantes del efecto invernadero (CO_2 , CH_4 , NO_2).
- Problemas de erosión y desertificación.
- Agotamiento y degradación de los recursos naturales como: agua, suelo, ecosistemas.
- Disminuya la biodiversidad.

1.6.3 Opciones de tratamiento de los residuos agroindustriales

Mayormente los residuos son sometidos a diversos tratamientos con el objeto de reducir su impacto negativo que, por su emisión, vertimiento o disposición, podrían potencialmente generar y los convierten en un producto de mayor utilidad y valor agregado, con lo cual se contribuye a solucionar una problemática y a generar ingresos económicos adicionales (Cury R. et al., 2017).

Los diversos tratamientos que se ejecutan para minimizar el impacto ambiental de los residuos también contribuyen con su aprovechamiento que según Ramírez (2012) es una alternativa para el impulso del desarrollo de nuevas e innovadoras tecnologías orientadas hacia la transformación sustentable de los recursos naturales. Es por ello que el aprovechamiento de los desperdicios provenientes de la agroindustria se plantea como una de las estrategias que guía las operaciones para su manejo, presentándose una gran variedad de alternativas debido a la composición tan variada de estos desperdicios.

Básicamente existen en la actualidad tres grupos de tecnologías para la recuperación de los residuos agroindustriales:

- 1) La valorización biológica y química, permite obtener a partir de residuos orgánicos gases, líquidos o sólidos que son comercializables como lo son las pectinas, enzimas, aceites esenciales, fibra dietaria (alimento para animales y humanos), hongos comestibles, flavonoides y carotenoides, entre otros. Estos productos se pueden obtener mediante procesos biológicos como el compostaje y vermicompostaje. En el vermicompostaje se emplean lombrices como el ente biológico encargado de transformar el residuo orgánico en abono natural que se usará como fuente de materia orgánica para los suelos, o como sustrato para la producción de especies vegetales (Abraham, et al., 2007).
- 2) La obtención de combustibles derivados de los desechos permite obtener combustibles como el biogás el cual es utilizado para diversos fines.
- 3) La valorización térmica, con la que se busca reducir el volumen de los desperdicios y la recuperación de energía a partir de los líquidos, gases y sólidos que son generados, utilizando procesos como la incineración y la pirólisis (S. Yepes et al., 2008).

Los daños ambientales producidos por estos desechos han llevado a que las industrias comiencen a adelantar proyectos o investigaciones que promueven el aprovechamiento

de estos, entre los cuales figuran: obtener hongos que son comestibles, el uso de enzimas y mezclas enzimáticas en frutas para la extracción de compuestos de un valor nutricional alto encontrándose entre estos los compuestos fenólicos, aceites, el uso de proteínas en la industria láctea, uso de los microorganismos para aprovechar el lactosuero, desarrollo de técnicas que aumenten la valorización para poder recuperar de forma efectiva los residuos entre las que se encuentran el compostaje y la lombricultura (Cury R. et al., 2017). Tomando en cuenta todas esas opciones la tabla 3 describe de forma resumida los diversos residuos generados en las diferentes agroindustrias, su posible uso y método de procesado.

Tabla 3

Tipos de residuos generados por las diferentes agroindustrias

Residuos agroindustriales	Industria que lo genera	Composición del medio	Posible uso en reacciones de fermentación y microorganismos implicados	Proceso de obtención y producto final
Melaza	Azucarera	- Sacarosa 60%-63% en peso - Compuestos nitrogenados 2.5% a 4.5% (predominando aspartato y glutamato) - Proteínas 3% y Cenizas 9%	Fuente de azúcares en fermentación anaerobia (<i>Saccharomyces cerevisiae</i>)	- Producto de destilación - Producto final alcohol etílico
Residuos Lignocelulosicos de caña de azúcar	Azucarera	- SST 10.23% - Hemicelulosos 24.42% - Celulosa 51.67% - Humedad 83.2% - Materia orgánica 15% - Minerales 1.8%	Fermentación de hexosas y pentosas por medio de <i>Saccharomyces cerevisiae</i> <i>Bacillus megaterium</i> como precursores de fermentación de materia orgánica	- Proceso de destilación - Producto final bioetanol - Digestión mediante surfactante (sulfato de sodio) y posteriormente centrifugado - Producto final biopolímero 100% biodegradable (polihidroxibutirato)
ALPECHIN	Aceitera			
Residuos de frutos (cáscara o pulpa)	Procesador de frutas y verduras	- Humedad 13.36% - Cenizas 9.62%	Descomposición de materia orgánica por reacción bacteriana metanogénica	- Extracción por medio de biodigestor - Producto final biogás

SISTEMAS DE TRATAMIENTO Y VALORIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

Méndez P., Arcos, J., Ureta, R., Freytez E.

ISBN 978-987-82816-3-6

Residuos agroindustriales	Industria que lo genera	Composición del medio	Posible uso en reacciones de fermentación y microorganismos implicados	Proceso de obtención y producto final
Suero de leche	Quesera	- Proteína 1.4% y Grasa 2.6%	(fermentación anaeróbica)	
		- Fibra 0.84%		
Suero de leche	Quesera	- ELN (extracto libre de nitrógeno) 64.88%		
		- Humedad 92.22%	<i>Ralstonia metallidurans</i> o <i>Bacillus megaterium</i> como precursores de fermentación acidogénica	- Digestión surfactante (sulfato de sodio) y centrifugado
Suero de leche	Quesera	- Proteína 0.8%		- Producto Biopolímero 100% biodegradable
		- Grasa 0.3%		- Extracción por medio de biodigestor
Suero de leche	Quesera	- ST 6.68%		- Producto final biogás
		- Materia orgánica 36.1%	Descomposición de materia orgánica por reacción bacteriana	
Rumen de ganado	Ganadera	- Nitrógeno 1.5% y Fósforo 1.2%	metanogénica (fermentación anaeróbica)	
		- Potasio 1.5% y Calcio 3.2%		
Rumen de ganado	Ganadera	- Magnesio 0.5%		
		- Humedad 55.94%		

Nota: Elaboración propia, 2022.

1.7 Residuos tóxicos o peligrosos

1.7.1 Concepto de residuos tóxicos

Según Martínez (2005) define a los "residuos peligrosos a los residuos que debido a su peligrosidad intrínseca (tóxico, corrosivo, reactivo, inflamable, explosivo, infeccioso, eco tóxico) pueden causar daños a la salud o el ambiente" (p. 18).

Por su parte el United Nations Environment Programme (2009) los define como "residuos no radiactivos que, como consecuencia de su actividad química o características tóxicas, explosivas, corrosivas u otras, suponen o pueden suponer un peligro para la salud o el medio ambiente"

1.7.2 Origen de los residuos tóxicos

La identificación de las fuentes generadoras de los desperdicios o residuos considerados como peligrosos resulta de gran importancia para el manejo adecuado de

estos, lo que permitirá conocer las necesidades en cuanto a las medidas de seguridad y a la infraestructura que se requiera para su tratamiento.

Existe una gran variedad de fuentes generadoras como los son la industria, la agricultura, el comercio, los centros hospitalarios, el hogar, entre otros. Sin embargo, existen las siguientes fuentes o sectores:

- Actividades productivas donde se encuentran el sector industrial, minero, metalúrgico, agroindustrial, entre otros.
- Actividades del sector servicio que incluyen las actividades del sector salud, investigación, laboratorios, transporte, educación, administración pública, entre otros.
- Consumo masivo de productos con características peligrosas como lo son baterías, pilas, solventes, plaguicidas, desechos electrónicos, entre otros.
- Actividades del hogar entre las que se incluye el uso de productos de limpieza, automotrices, fármacos, cosméticos, entre otros.

1.7.3 Tipos de residuos tóxicos

- En base a su estado físico están los residuos sólidos, semisólidos, líquidos y gaseosos.
- De acuerdo a su origen están los residuos
 - ✓ Domiciliarios, urbanos o municipales
 - ✓ Industriales
 - ✓ Agrícolas, ganaderos y forestales
 - ✓ Mineros
 - ✓ Hospitalarios o de Centros de Atención de Salud
 - ✓ De construcción
 - ✓ Portuarios
 - ✓ Radiactivos
- De acuerdo al tipo de tratamiento al que será sometido
 - ✓ Residuos asimilables a residuos urbanos.
 - ✓ Residuos para los cuales la incineración es el tratamiento idóneo.

- ✓ Residuos que se deben disponer en rellenos de seguridad.
- ✓ Residuos generados en grandes cantidades y que requieren de un tratamiento particular.
- ✓ Residuos pasibles de ser sometidos a un proceso de valorización.
- Clasificación por los potenciales efectos derivados del manejo
 - ✓ Residuos peligrosos: aquellos que por su naturaleza son peligrosos, capaces de generar efectos negativos para la salud o para el ambiente.
 - ✓ Residuos peligrosos no reactivos: son aquellos que han perdido su naturaleza de peligrosos debido a que han sido tratados.
 - ✓ Residuos inertes: son aquellos que no experimentan transformaciones físicas, químicas o biológicas significativas.
 - ✓ Residuos no peligrosos: aquellos que no pertenecen a ninguna de las tres anteriores categorías.

1.7.4 Opciones de tratamientos de residuos tóxicos o peligrosos

Las opciones de tratamiento de los residuos peligrosos están dirigidas a modificar las propiedades físicas y químicas de sus componentes. Entre estas opciones se encuentran:

- Tratamiento físico: incluye los procesos de separación y de reducción de tamaño tales como separación manual, cribado, sedimentación, decantación, centrifugado, filtración, entre otros.
- Tratamiento químico: basado en la adición de compuestos químicos para la transformación de los desperdicios, entre estos se encuentran la neutralización, la decoloración, la precipitación, la hidrólisis, entre otros.
- Tratamiento físico-químico: involucra los tratamientos físicos y químicos en la transformación de los desperdicios, entre estos están intercambio iónico, lixiviación, floculación y coagulación, extracción de solventes, separación de la membrana, desorción, entre otros.
- Tratamiento biológico: donde se degradan los residuos por la acción de los microorganismos, tales como la digestión anaeróbica, lodos activados, biológico giratorio, fitorremediación, biorremediación, land farming, entre otros.

- Tratamiento térmico: donde se utilizan altas temperaturas para la destrucción de los desperdicios entre los que se encuentran la pirolisis, incineración, gasificación, co-procesamiento, entre otros.
- Tratamiento de estabilización: donde los componentes tóxicos del desperdicio son transformados en formas menos tóxicas, entre los que se encuentran la absorción, adsorción, intercambio iónico, macro y micro encapsulamiento, transformaciones químicas, entre otros.
- Tratamiento de estabilización: donde se produce una masa sólida monolítica después de haber sido tratados los desperdicios, entre estos se encuentran la absorción, adsorción, intercambio iónico, macro y micro encapsulamiento, transformaciones químicas, entre otros.

Finalmente se puede mencionar que el consumo masivo por parte de los habitantes en las comunidades ha originado un auge en la producción de basura desencadenándose un grave problema a nivel ambiental por la improvisación de botadero de basura en sitios no aptos para ello como son calles y avenidas, terrenos desocupados, entre otros, por lo que los entes gubernamentales han tratado de buscar soluciones las cuales no siempre son amigables con el ambiente.

La mala gestión de la basura específicamente la realizada a los residuos sólidos, ha afectado al ambiente y la salud de los habitantes, por lo que es importante conocer el tipo de desperdicio, el flujo de generación de los mismos, las fuentes de origen, su composición, su caracterización, para así poder determinar cuál será la opción de tratamiento más viable para minimizar su impacto y evitar la proliferación de animales carroñeros, roedores, insectos y por ende enfermedades, además de determinar cuáles son aptos para ser aprovechados.

SISTEMAS DE TRATAMIENTO Y VALORIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

Méndez P., Arcos, J., Ureta,. R., Freytez E.

ISBN 978-987-82816-3-6

CAPÍTULO 2.

Gestión integral de residuos sólidos

1. Introducción

La basura a nivel mundial se ha convertido en un gran problema para la sociedad. En el reporte del Banco Mundial (BM) titulado "What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050" se ha estimado que para el año 2050 se producirán mundialmente más de 3.400 millardos de toneladas de residuos sólidos (Kaza et al., 2018). Esta increíble cantidad de residuos generados representa un peligro de salud para los países y el mundo entero si no se toman acciones: políticas, sociales, tecnológicas, culturales, institucionales, económicas, jurídicas y ambientales que integradas puedan coadyuvar a minimizar el impacto negativo de los desechos sobre el bienestar y la calidad de vida del ambiente a nivel mundial.

Por esa razón desde el año 1992 en la cumbre de Rio de Janeiro (Brasil), organismos internacionales y varios países han impulsado y ejecutado programas de investigación y desarrollo con el fin de crear modelos de gestión para el manejo apropiado de estos residuos en estado sólido. De los diversos modelos propuestos, el modelo de gestión integral de los residuos sólidos (GIRS), es el modelo que más se ha desarrollado e implementado en diversos países de Latinoamérica y el mundo (CARE Internacional-Avina, 2012).

La Gestión Integral de los Residuos Sólidos (GIRS), es definida como la ciencia involucrada en controlar la generación, el almacenamiento, la recopilación, la transferencia, el transporte, el procesamiento y la evacuación de los residuos sólidos de un modo compatible con los fundamentos en los que se basa la salud pública, estéticos, económicos, ingenieriles, conservacionistas y de otros parámetros ambientales, cuya

finalidad es responder a lo que espera el público (Rondón et al., 2016). El objetivo principal del GIRS es alcanzar un manejo adecuado de todos los residuos, minimizando los peligros que pueden acarrear tanto a la salud pública como al medio ambiente, permitiendo a los países la transición hacia un prototipo de desarrollo ambientalmente sostenible.

El GIRS debe entenderse como un proceso compartido por la sociedad en su conjunto, coherente con el enfoque de un crecimiento sostenible, para lograr un avance en la economía que sea compatible y armónico con la justicia social y la protección ambiental; por tanto, dicho modelo, debe considerar el conjunto de componentes que implican el buen manejo que deben recibir los residuos y los desechos sólidos: ambientales, económicos, sociales, institucionales, legales y técnicos. En el presente capítulo se hará un resumen solo de los aspectos políticos, legales e institucionales que afectan significativamente al manejo de residuos.

2. Importancia de gestionar los residuos sólidos

Gestionar en base al procesamiento de estos residuos, si se lleva a cabo de forma inadecuada puede afectar a las ciudades y a sus residentes de muchas maneras. Estos impactos se pueden dividir en tres categorías:

- **Salud humana:** el manejo inadecuado de estos residuos ocasiona graves problemas que tienden a afectar de forma negativa a la salud del ser humano, en este sentido, entre los diversos tipos existentes se encuentran orgánicos que al descomponerse constituyen un caldo de cultivo para microorganismos además de atraer animales como insectos, roedores, entre otros. En algunas ciudades, la materia fecal humana y la orina no se separan de los residuos sólidos, que atraen insectos y gérmenes que propagan enfermedades (p. ej., fiebre tifoidea, colera). Entre los insectos el mosquito representa un agente que genera preocupación, en virtud de que se reproduce rápidamente entre los residuos y pueden ser transmisores de enfermedades que ocasionan efectos secundarios significativos como los generados por el Zika, la malaria, dengue, entre otros. Los residuos sólidos mal gestionados y los vertederos abiertos pueden conducir a la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, que son las fuentes de contaminación comunes para la obtención de agua potable. Al no controlar la quema de residuos se generan emisiones contaminantes, incluidas dioxinas, furanos, carbono negro, metales

pesados, materia particulada, entre otras, muchas de las cuales pueden afectar la salud ya que son tóxicas para las personas (Mavropoulos, 2015). Para las poblaciones que viven en contacto directo con los centros de eliminación de residuos o sus proximidades, estos efectos en la salud pueden ser particularmente graves.

- **Medioambiental:** el lixiviado, el cual es el líquido que fluye de los restos de basura que es de naturaleza orgánica, producen sustancias de naturaleza química, que si no son tratados de forma adecuada pueden contaminar los suelos y cuerpos de agua, lo que influye negativamente en los ecosistemas locales (EPA, 2022a). Los residuos cuando son mal gestionados también afectan a los animales callejeros y la vida silvestre, ya que los animales pueden tratar de consumir residuos que contienen restos o residuos de alimentos. La quema abierta de residuos produce emisiones de carbono negro, un componente de materia particulada que ocasiona un impacto significativo sobre la calidad del aire regional y el clima global. Los centros de eliminación de residuos liberan metano, lo que contribuye a la formación de ozono a nivel del suelo. Además, el metano es un gas de efecto invernadero que contribuye al cambio climático.
- **Socioeconómico:** la gestión inadecuada de los residuos sólidos tiende a resultar muy costosa, lo cual involucra tanto los gastos directos como los costos indirectos. La mala gestión en los procedimientos diseñados para dirigir aquellas actividades relacionadas con los restos en estado sólido es una oportunidad perdida para un crecimiento a nivel económico, incluido el aumento del precio de las propiedades además de estar favorecidos por paisajes turísticos y contar con calles y playas limpias. Los programas diseñados para reducir los desperdicios casi siempre generan ahorros al invertir en transporte y en sustancias requeridas como combustible, y si su implementación se lleva a cabo como debe ser, también es posible recuperar alguna otra inversión. Los cambios favorables al gestionar los restos sólidos pueden beneficiar especialmente a muchas poblaciones altamente vulnerables al conseguir un ahorro de costos en los procedimientos orientados a la salud pública al prevenir problemas respiratorios, enfermedades de la piel y

otros problemas médicos producto de la forma inapropiada de manejar los desperdicios sólidos (Mavropoulos, 2015).

2.1 Desafíos que enfrenta la gestión de los residuos sólidos

Las autoridades competentes en cada ciudad reconocen la diversidad de dificultades que atañen al ambiente, a la salud y otras inquietudes asociadas a las gestiones inadecuadas de los residuos sólidos; sin embargo, enfrentan muchos desafíos que guardan relación con la adecuada gestión diseñada para el control de los mismos. Entre los desafíos se incluyen:

- Capacidad y recursos financieros limitados: muchas ciudades poseen una restringida capacidad para el financiamiento sostenible de las instalaciones o las operaciones. Las ciudades son a menudo responsables del desarrollo de actividades, pero no tienen los medios o la experiencia financiera suficiente además de presentar inconvenientes con los costos al momento de realizar la inversión, preparar las instalaciones, determinar el presupuesto lo suficientemente completo para iniciar los proyectos diseñados para el procesamiento que se debe realizar a los residuos sólidos o si se incrementan costos e ingresos insuficientes durante el aumento del volumen de estos. El objetivo debe ser priorizar una adecuada gestión de estos residuos, generar e implementar estrategias que permitan aminorar los costos, la incorporación de programas para el pago por vertido o impuestos y crear asociaciones con organismos internacionales de inversión son todas opciones para financiar un proyecto para el procesamiento de residuos sólidos viable. Cabe destacar que al inicio se enfrente cierta resistencia sobre la implementación de los programas, así como que se ejecute la recaudación de impuestos o de honorarios, siendo imprescindible tener quien participe como fuente permanente de financiamiento para la gestión más conveniente de residuos sólidos siendo una parte integral que compone un proyecto exitoso.
- Acceso limitado sobre los equipos y conocimiento técnico sobre el mismo: a menudo, el equipo requerido en el procesamiento a realizar a los restos sólidos se importa del exterior y es posible que los operadores no tengan los conocimientos mínimos a nivel técnico o los recursos para un mantenimiento adecuado y

consistente. Si el equipo fue diseñado sin tomar en cuenta las condiciones respecto al clima que posee la localidad donde va a ser instalado, se presentarán incompatibilidades que sumarán más desafíos e inconvenientes al generarse fallas con frecuencia produciéndose una demanda de reparaciones frecuentes y siendo en muchos casos difícil encontrar repuestos. Existen condiciones específicas en ciertas áreas como en las tropicales, donde hay condiciones como la humedad relativa y un persistente calor pueden afectar negativamente al equipo, dando lugar a reparaciones frecuentes.

- Deficientes conocimientos a nivel técnico y práctico: la dirección a nivel local no posee el personal capacitado para evaluar las tecnologías o soluciones con el objeto de identificar las más idóneas para su situación. Este desconocimiento puede acarrear serios problemas al momento de llevarse a cabo alguna obra donde una vez celebrado el contrato con los organismos encargados para adquirir una determinada tecnología, las empresas con capital privado abandonan el proyecto si los encargados no pueden respetar ni llevar a buen término los términos del contrato. Por ejemplo, muchos contratos de proyectos dirigidos hacia el tratamiento que deben dársele a los residuos incluyen requisitos donde la ciudad pueda garantizar una materia prima limpia o constante. Si los organismos representantes no cumplen con estos requisitos, las empresas particulares o con capital privado pueden abandonar el trabajo. Las ciudades no siempre anticipan estos desafíos y, como consecuencia, los proyectos pueden fallar: suele ocurrir que quienes toman las decisiones no están lo suficientemente capacitados respecto a cuáles serán las actividades más adecuadas que se han ejecutado con éxito en otras ciudades y en situaciones similares. La intervención de este personal responsable de llegar a acuerdos en los intercambios organizados por la Asociación Internacional de Residuos Sólidos (ISWA), tanto nacionales como internacionales mejorará considerablemente los conocimientos a nivel técnico y sobre las prácticas más idóneas.
- Capacidad limitada de personal: muchas ciudades carecen de personal suficiente dedicado a abordar los contratiempos que son atribuidos a la gestión dirigida al

procesamiento de los desperdicios en estado sólido. Este personal tiende a enfocarse en abordar emergencias inmediatas que tienen que ver con estos restos careciendo de tiempo o personal para participar en organizar los planes en un plazo prolongado y de la ejecución de estrategias.

- Rotación política: la rotación de personal en las administraciones puede ocasionar que los funcionarios entrantes den por finalizados proyectos o los alteren radicalmente, y que se reasigne personal clave en proyectos importantes, incluidos los proyectos que están orientados con la gestión dirigida a los tratamientos de residuos sólidos. Esto ocasionaría que los promotores de proyectos con considerable experiencia técnica no están disponibles para completar los proyectos. El diseño y la ejecución de una legislación orientada a la adecuada gestión de estos residuos sólidos, en todo el territorio nacional o subnacional, el establecimiento de sistemas sostenibles durante un período no muy corto que continúen vigentes durante las diferentes administraciones, puede contribuir a se supere esta barrera. Mantener al personal en los proyectos y las operaciones dirigidas a una administración eficiente de estos residuos sólidos también puede contribuir a minimizar estas interrupciones.
- La deficiente planificación y evaluación a nivel del territorio nacional y de cada municipio puede afectar negativamente el éxito en el inicio de procedimientos orientados al procesamiento de residuos sólidos. Los marcos o regulaciones nacionales son una pieza clave que permite facilitar la planificación en un plazo no inmediato, establecer estándares nacionales, y proporcionar incentivos para programas de reducción, reciclaje o compostaje para sus residuos. Se ha hecho frecuente pasar por alto la planificación a nivel municipal, donde ocurre la implementación, esto tiende a generar obstáculos más adelante. Esto es especialmente prevalente cuando hay interrupciones no planificadas, como desastres naturales. Crear un plan tanto nacional como local que incluya estrategias de monitoreo y verificación, ayudará a elaborar un sistema estable de gestión para el procesamiento a ejecutar en dichos residuos.

- Coordinación gubernamental vertical y horizontal limitada o faltante: el establecimiento de actividades orientadas al procesamiento de los restos en estado sólido pertenece a la jurisdicción de varios ministerios u otros organismos que se ubican en varios niveles de gobierno, donde las agencias gubernamentales responsables del medioambiente, el desarrollo urbano y habitacional o la agricultura pueden estar todas involucradas en diferentes partes del sistema sobre los trámites relacionados con estos residuos, pero pueden no tener marcos formales que involucren la colaboración. Además, los organismos locales son responsables de implementar regulaciones nacionales, y los organismos encargados por parte de la nación tienen un rol relevante en la creación de entornos propicios para que se ejecuten los proyectos locales y sean exitosos. Un mecanismo que permita la coordinación entre agencias o departamentos y con los estratos del gobierno permite la fundación de un sistema holístico.
- Dificultades en las condiciones para el trabajo: los trabajadores que laboran en el procesamiento de estos restos sólidos, en el caso particular de los de países en desarrollo suelen recibir una deficiente capacitación además de un pago insuficiente (United Nations Environment Programme, 2005). Sin la capacitación y los implementos de protección personal adecuados, estos trabajadores se enfrentan a la amenaza de sufrir algún accidente o alguna enfermedad. Los estudios demuestran que un porcentaje elevado de operarios que manipulan residuos, y aquellas personas que viven cerca de los sitios de eliminación, están en riesgo de infectarse con gusanos o parásitos (United Nations Environment Programme, 2005). Las condiciones difíciles de trabajo también resultan en una falta de motivación para los trabajadores y en tasas bajas de retención de empleados. Una comunicación limitada o el que no haya comunicación entre las partes involucradas, incluidos los residentes, pueden conducir al vertido ilegal, a un uso indebido y al daño de los recipientes que sirven para contener, a resistir las tarifas y a una separación indebida de los restos sólidos, entre otros.
- Una comunicación coordinada con campañas de difusión contribuiría a garantizar que las partes interesadas estén informadas y equipadas para lograr responder a

los requisitos locales para el procesamiento de los residuos sólidos. El sector informal es un grupo de interesados el cual ha de estar muy presente, e incluir durante ciertos pasos cuando se planifica un programa destinado al procesamiento de los residuos sólidos. El sector informal consta de individuos, grupos, empresas que son pequeñas y que ejecutan servicios informales de residuos donde incluyen recolectar y vender posteriormente aquellos residuos que sean reciclables, generalmente con intermediarios (Aparcana, 2017). Los trabajadores obtienen ingresos al vender estos materiales que son reciclables, suministrándolos a una red donde participan distribuidores privados formales y zonas para reciclar que también son privados (Aparcana, 2017; Wilson et al., 2009); en otros casos, los trabajadores pueden vender el material a otros trabajadores del sector informal que lo reutilizan como insumo para otro proceso o producto (p. ej., partes usadas para la reparación de equipos). Este sector suele ejercer un rol importante cuando sea necesario realizar actividades para separar dichos residuos, además de determinar cuáles se deben recolectar.

- Terreno limitado disponible: con el auge prolongado en las zonas urbanas y las poblaciones, disminuye la porción de espacio disponible para las instalaciones dispuestas al procesamiento de los residuos sólidos, los sitios locales donde son recolectados y los sitios de transferencia. Es posible la deficiencia de espacio, o que las parcelas que estén disponibles tengan un precio muy elevado o que los habitantes locales quieran evitar la fundación de instalaciones debido al temor a que olores emanados disminuya el precio solicitado por la propiedad. Sin embargo, ubicar estas instalaciones lejos de las poblaciones, donde hay más tierra disponible y ésta es menos costosa, crea un nuevo conjunto de desafíos, ya que transportar residuos a largas distancias puede llevar mucho tiempo y ser costoso. Quienes son los autorizados de gestionar estos residuos sólidos poseen la capacidad para trabajar en conjunto con Líderes locales y regionales para crear un plan para el procesamiento de los residuos sólidos que destaque la importancia una planificación de rutas y ciudades. Los procedimientos de desviación o separación también desempeñarán un rol relevante en la disminución de la cantidad de dichos residuos recolectados.

- Condiciones climáticas, geográficas y topográficas influyen de forma considerable en la elección, oferta y costo de los equipos, al igual que en la factibilidad de las tecnologías, los costos operativos y otros elementos que son pieza clave en el procesamiento a los residuos sólidos, donde las ciudades ubicadas en zonas tropicales podrán adaptar las estrategias que contribuyan con el procesamiento de estos residuos teniendo presente que las temperaturas son más elevadas y la tasa de descomposición también son más rápidas que las de las localidades con climas más fríos. Las características geográficas y topográficas también pueden presentar desafíos para gestionar estos residuos. Las islas, en particular, enfrentan desafíos significativos debido al espacio limitado para poder eliminar los desperdicios, además de sus capacidades y acceso al reciclaje. Por otra parte, aquellas ciudades ubicadas en áreas montañosas pueden requerir diseñar centros de eliminación que sean resistentes a las fallas de la pendiente.
- Normas culturales: la inclinación a seguir determinadas tendencias culturales tiende a complicar todos los esfuerzos que se han hecho con respecto al tratamiento de los residuos sólidos. Un ejemplo clásico se muestra cuando al aumentar la riqueza y al disminuir los costos de los bienes trajo como resultado el aumento en el consumo y a originar desperdicios a un crecimiento dramático a nivel mundial. Quienes son responsables de gestionar estos residuos enfrentan las consecuencias debidas a estas tendencias, es por ello que se requiere la participación activa de las partes involucradas para abordar estas normas culturales durante la organización de la administración de dichos residuos.

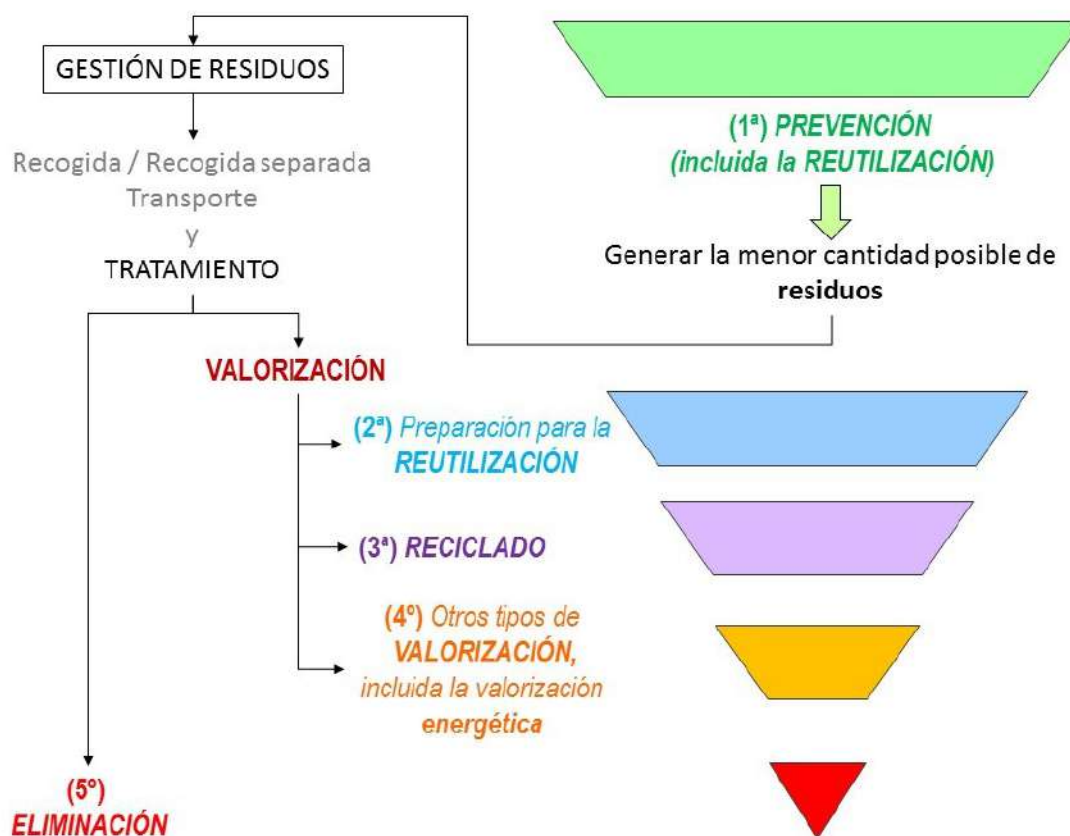
2.2 Jerarquización de enfoques para gestionar residuos sólidos

Los análisis de la gestión dirigida al procesamiento de residuos sólidos no se consideran adecuados para gestionar todo lo relacionado con los materiales y flujos de residuos aun si se tiene presente ciertas circunstancias. Los gobiernos de la localidad deben trabajar para crear un plan de cumplimiento a lo considerado necesario y ciertas condiciones que son específicas. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos desarrollo una jerarquía de la gestión de residuos sólidos, como se evidencia en la figura 7, en reconocimiento de esta realidad, la cual suministra un sistema donde se

clasifican las diferentes estrategias diseñadas en el procesamiento de residuos sólidos, haciendo hincapié en sentido descendente sobre la más adecuada seguida de la menos adecuada desde la perspectiva ambiental, y hace énfasis en reducir, en reutilizar y a reciclar (EPA, 2022b). Los pasos previos al desecho de residuos en basureros como parte del procesamiento de residuos sólidos se describen en la figura 7 la cual a su vez muestra la jerarquía de dicho procesamiento:

Figura 7

Jerarquización de los residuos sólidos



Nota: Adaptación de *Sustainable materials management: non-hazardous materials and waste management hierarchy*, por EPA, (2022b), EPA United States Environmental Protection Agency (<https://www.epa.gov/smm/sustainable-materials-management-non-hazardous-materials-and-waste-management-hierarchy>).

- Reducción y reutilización en origen: la reducción en origen, también conocida como prevención de residuos, hace referencia a reducir el volumen de residuos producidos. Reducir donde se originan los residuos es la estrategia preferida desde la perspectiva ambiental (EPA, 2022b). Las personas están capacitadas para

minimizar el volumen de residuos que generan al comprar productos duraderos y reutilizables o buscar productos que se hayan diseñado teniendo presente su reducción.

- **Reciclaje y gestión de residuos de naturaleza orgánica:** el reciclaje constituye todas aquellas actividades que incluyen recolectar artículos usados, reutilizados o no utilizados que de otro modo se considerarían residuos; la clasificación y procesamiento de los artículos reciclables en insumos; además de utilizar insumos reciclados para refabricar nuevos productos (EPA, 2022b). El sector informal es un participante fundamental en la estructura para el reciclaje en el mundo. Para gestionar estos residuos se maneja el desvío y luego procesar los residuos orgánicos aplicando el compostaje y la digestión anaeróbica (DA). El abono es un material de naturaleza orgánica que al agregarlo al suelo contribuye con el crecimiento apropiado de las plantas. La DA es un proceso que genera biogás, además constituye una fuente para suministrar energía la cual es renovable, siendo utilizados los residuos de naturaleza orgánica como insumos. El compostaje o la utilización de la DA para procesar los residuos de alimentos, restos de jardinería y otros restos orgánicos mantiene estos materiales retirados de los vertederos, donde ocupan espacio y liberan metano, el cual es un gas muy potente que produce el efecto invernadero.
- **Recuperación energética:** la recuperación energética consiste en convertir aquellos materiales que no son reciclables en una fuente para suministrar calor, combustible o electricidad siendo así reutilizables, con la aplicación de diversos procesos. Este se fundamenta en convertir los residuos que no son reciclables en electricidad y calor, proporcionando energía y reduciendo las emanaciones de carbono al contrarrestar las necesidades existentes de energía que proviene de fuentes fósiles, reduciendo así que produzca metano en los sitios donde son vertidos (EPA, 2022b). Los establecimientos de energía producida por residuos ameritan de una cuantiosa inversión inicial y tanto su operación como mantenimiento son costosos. Además, las emisiones tóxicas de dichas unidades deben ser controladas. Cuando se combinan con controles efectivos que impiden

que se contamine el aire (es decir, controles colocados en una instalación que trata los gases previos a que ingresen al ambiente) y técnicas de eliminación de residuos cuando finaliza el proceso, estas estaciones pueden reducir potencialmente tanto el volumen elevado de residuos como la propagación de gases responsables de ocasionar que se eleve la temperatura de la atmosfera (USAID, 2018). Al planificar el diseño de una estación para producir energía mediante la reutilización de residuos sólidos, la cual se considera entre las mejores opciones para gestionar los mismos, deben considerarse planes para un financiamiento adecuado y los controles efectivos de contaminación.

- Tratamiento y eliminación: el tratamiento contribuye a aminorar tanto el volumen de los residuos como de su toxicidad previo a ser eliminados. Los tratamientos pueden ser físicos (p. ej., trituración), químicos (p. ej., incineración) o biológicos (p. ej., AD) (EPA, 2022b). Los vertederos constituyen un componente importante dentro del sistema integrado para gestionar los residuos de naturaleza sólida. Los residuos que no puedan reciclarse deben ser desechados en vertederos debidamente diseñados, contruidos y gestionados, donde se encuentren contenidos de manera segura para limitar su impacto ambiental (EPA, 2002). Diversos subproductos son obtenidos por la descomposición que sufren los residuos estando el gas metano, el cual puede ser recolectado para posteriormente usarse de combustible y de esta manera generar energía. Una vez que un vertedero se tapa, la tierra puede ser utilizada para otros fines, como sitios recreativos.

3. Gestión integral de residuos sólidos

3.1 Concepto de GIRS

A nivel de política ambiental se hace necesario contemplar la implementación de la gestión integral de residuos sólidos, la cual según Rodríguez (2012), son todas aquellas actividades orientadas al manejo apropiado de los residuos en una comunidad, ciudad, país, y tiene como objetivo su administración de forma tal que sea amigable con el medio ambiente y los principios que sirven de base a la salud pública.

Por su parte, Tchobanoglous et al. (1998), la define como una disciplina orientada hacia el control en las diferentes etapas que experimenta un residuo desde su generación

hasta su disposición definitiva en sitios apropiados, en concordancia con los principios que rigen la salud pública, la ingeniería, la economía, la estética, la conservación y el ambiente, incluyendo todas las actividades relacionadas con la función administrativa, financiera, legal, de ingeniería y de planificación necesarias para la solución de los problemas que puedan ocasionar los residuos sólidos.

3.2 Etapas en la gestión integral de residuos sólidos

La GIRS engloba diversas actividades para el procesamiento apropiado de los residuos en estado sólido generados en las diferentes fuentes a nivel domiciliario, comercial, hospitalario, industrial entre otras, las cuales involucran el control en la generación, su separación en subproductos, el reciclaje de aquellos que son susceptibles a este proceso y su aprovechamiento, el almacenamiento como subproductos, el almacenamiento que se les haga de forma temporal, la recolección y el transporte, su transferencia al sitio donde serán tratados, su tratamiento y su disposición definitiva o final una vez que hayan sido tratados.

Para Rodríguez (2012), la GIRS está constituida por una serie de etapas que contribuyen a obtener un desperdicio lo menos contaminante posible y amigable con el medio ambiente y la salud en general. Entre estas etapas se encuentran de una forma jerárquica: la reducción en el origen, el aprovechamiento y la valorización, el tratamiento y la transformación y la disposición final de forma controlada.

En la figura 8, se muestra el diagrama de flujo que sigue la secuencia de la gestión integral de residuos sólidos GIRS, la cual inicia con la generación de residuos y finaliza con la disposición final. Estas etapas serán descritas a continuación.

Figura 8

Etapas de la Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS)



Nota: Figura de *Gestión integral de residuos sólidos* (p.24), por Tchobanoglous et al., (1998), McGraw Hill México (https://scholar.google.co.ve/scholar?q=tchobanoglous.+g.+1998.+gestion+integral+de+residuos+s%C3%B3lidos&hl=es&as_sdt=0%2C5&as_vis=1&lookup=0&as_ylo=1998&as_yhi=1999)

a) Generación de residuos

La generación constituye la acción de producir los desperdicios o residuos por medio del desarrollo de diversos procesos productivos o por el consumo. Estos pueden provenir de actividades de los animales y de los humanos, su composición habitualmente no es homogénea, y su cantidad tiende a variar dependiendo de la localidad influyendo a la vez una serie de factores tales como el desarrollo económico, el nivel de ingreso, la estación del año, el sector de actividad que predomina, los patrones de consumo, el tamaño de la población en la localidad, la densidad poblacional, entre otros (Tchobanoglous et al., 1998).

Es importante resaltar que en esta etapa muchos de los desperdicios que son producidos pueden utilizarse como recurso o insumo en otra área, pudiendo de esta manera ser aprovechables, reutilizados o reciclados.

Entre las diferentes fuentes generadoras de desperdicios se encuentran el propio ser humano y su forma de vida sedentaria, los hogares, los comercios, los hospitales y clínicas, las industrias, la minería, los escombros y desperdicios de la construcción, subproductos de animales, entre otras, tal como se mostró en el capítulo anterior (ver figura 1 capítulo 1).

b) Almacenamiento y procesamiento en el origen

El almacenamiento consiste en depositar los desperdicios en recipientes o contenedores en el momento en que son generados hasta que se realiza la recolección de estos.

El almacenamiento de los desperdicios se puede realizar de dos formas:

- Almacenamiento in situ: es el realizado por quien genera el desperdicio, reteniéndolo en un sitio destinado para tal fin por un corto tiempo, siendo utilizados para este tipo de almacenamiento bolsas plásticas, botes de plástico, cajas de cartón, entre otras. Sin embargo, las bolsas plásticas tienden a representar un problema en el sistema debido a que son poco resistentes. Se rompen al trasladar los residuos al camión recolector, lo cual baja la eficiencia del proceso por los tiempos de espera, incrementa los costos, contamina y da mala imagen a los municipios (Tchobanoglous et al., 1998).
- Almacenamiento temporal: es definido como la retención de forma temporal de los desperdicios desde la fuente donde son generados hasta su recolección, siendo utilizados recipientes contenedores de mayor tamaño y de diferentes capacidades (185L, 500L, 660L, 1500L, 4500L, 8000L, entre otras).

En esta etapa es recomendable realizar el depósito de los residuos separados por subproductos, en contenedores adecuados y en la medida de lo posible higienizados, con el propósito de evitar la acumulación de roedores u otros animales, además de malos olores.

Según Domínguez (2006), las características que deben tener los contenedores de desperdicios sólidos son:

- Suficiente capacidad.
- Poseer tapa con la intención de evitar que ingresen los animales o se liberen malos olores.

- Carecer de aristas afiladas y de esta manera ser seguros para los usuarios
- Fácil manejo para su mantenimiento y desinfección.
- Estar elaborados con un material resistente contra los agentes externos (calor, humedad).

Generados los desperdicios por lo general tanto en los hogares como en las otras fuentes se busca que el almacenamiento de los desperdicios ocupe el menor espacio posible y en algunos casos reutilizarlos de alguna forma, por lo que proceden a reducir el tamaño de los mismos o reciclar aquellos que lo permitan.

Es importante resaltar que los desperdicios no deben permanecer almacenadas in situ por más de dos o tres días antes de su recolección y transporte, debido a que muchos de estos desperdicios están constituidos por compuestos orgánicos que suelen descomponerse con la producción de lixiviados que contienen contaminantes disueltos que dificultan su transporte posterior (Jiménez, 2001).

c) Recolección

Los programas efectivos para separar y recolectar todos los desperdicios son un componente crítico del conjunto integrado para gestionar los restos sólidos. Estas actividades involucran a una diversidad de interesados, desde hogares individuales hasta operadores de flotas de recolección; muchas ciudades han verificado que tan importante es establecer métodos claros para comunicarse y coordinarse entre ellos. Una separación, recolección y el traslado efectivo de los residuos implica una diversidad de clases de infraestructura, incluyendo receptáculos para separar y almacenar residuos, y vehículos como carros, bicicletas o triciclos y camiones.

Los residuos que no suelen ser recolectados producen basura, vertidos ilegales y quemas, capaces de causar graves impactos en la salud y a nivel ambiental. Estos incluyen:

- Basura marina: los plásticos que viajan por los cuerpos de aguas residuales y pluviales terminan en distintos lagos, ríos, entre otros que fluyen hacia los océanos.
- Inundaciones locales: los desperdicios al no ser recogidos pueden obstruir los desagües y desacelerar o detener el libre recorrido de las aguas procedentes de la lluvia hacia afuera de una localidad.

- Pérdida de valor inmobiliario: los restos cuando son arrojados en calles o lotes abiertos traen como consecuencia una disminución en el precio de dicha tierra.
- Propagación de enfermedades: las alimañas tales como parásitos, roedores y cerdos son atraídas por los restos que no son recolectados y pueden transmitir diversas enfermedades.
- Contaminación local del agua: el lixiviado de los residuos que son vertidos en espacios abiertos puede contaminar las fuentes de agua locales.
- Contaminación local del aire: cuando se queman los restos al no ser recolectados contribuye a aumentar las concentraciones locales de contaminantes nocivos, como partículas finas y compuestos orgánicos volátiles.
- Cambio climático global.: la descomposición de los restos orgánicos en condiciones anaeróbicas conduce a emisiones de metano, un poderoso gas de efecto invernadero. Además, el quemar restos que no son recolectados contribuye a que produzca la emisión de carbono negro, el cual es uno de los constituyentes de las partículas finas. Este carbono es un contaminante del clima que es de corta duración cuyos impactos son significativos a nivel global.

La frecuencia para la recolección varía, las ciudades generalmente recolectan residuos a intervalos diferentes, los cuales van a depender de diversos factores. Las consideraciones clave al especificar la frecuencia de recolección de los restos incluyen:

- Costo: si el servicio se presta con más frecuencia (p. ej., diariamente, semanal), más costoso será operar el sistema para recolectar.
- Expectativas y plazas del cliente: muchas ciudades han encontrado útil coordinar el recoger los restos en las áreas comerciales al momento cuando se lleven a cabo las operaciones comerciales en estas áreas (p. ej., la recolección puede ocurrir después de hacer el cierre de los mercados). Muchas ciudades también organizan recolectar en los horarios con menor tránsito vehicular.
- Limitaciones de capacidad: resulta habitual que las flotas encargadas de recoger los restos necesiten recolectar residuos con mayor frecuencia en vecindarios donde los contenedores comunitarios o domésticos alcanzan rápidamente su capacidad.
- Clima: algunas ciudades con climas tropicales tienden a recolectar sus residuos producidos diariamente, dado que entre los restos hay biodegradables que se

descomponen más rápido en estos climas, comenzando a oler y a atraer moscas y otros seres capaces de originar enfermedades. Aquellas ciudades que se ubican en zonas climáticas templadas pueden recolectar residuos quincenal o semanal.

Optimizar las rutas para recolectar reduce los costos inherentes al personal, combustible y del mantenimiento requerido por los medios de transporte. Además, el reducir los tiempos de cada viaje contribuye para que dichos vehículos generen menos emisiones, lo cual da como resultado el obtener beneficios para la salud y el ambiente. Optimizar las rutas se logra en cuatro pasos (Shuster, 1974):

1. Revisar las políticas existentes para comprender las funciones y responsabilidades del departamento responsable de gestionar los residuos sólidos. Esta evaluación incluye comprender quién financia recolectar los restos, las leyes laborales que afectan a los que recolectan y el espacio de servicio.
2. Establecer los recorridos a nivel general para las áreas donde se prestará el servicio o determinar cómo se asignan los recorridos diarios para recolectar, fundamentado en una revisión de los lugares de procesamiento y vertederos existentes. Este cálculo incluye cuál es la cantidad optima de residuos que pueden procesarse y eliminar cada día, y separar el lugar para recolectar en subsecciones o distritos donde los grupos para recolectar puedan atender de manera apropiada estas subsecciones o distritos en un determinado día.
3. Equilibrar los recorridos y realizar una delimitación en los distritos que permita garantizar que sea distribuida la carga de trabajo de forma equitativa entre los equipos para recolectar.
4. Establecer los recorridos a nivel particular para los lugares de servicio o analizar detalladamente un lugar de servicio para determinar los recorridos que realizarán los vehículos durante la recolecta. Esta revisión sirve de base para optimizar los recorridos dirigidos a recolectar la totalidad de los restos, lo cual podría generar ahorros significativos en los costos. El determinar los recorridos a nivel particular hay que tener presentes muchos factores, incluidas las características geográficas, las consideraciones demográficas, el diseño del vehículo, las particularidades del sitio para recolectar, los requerimientos para que los residentes y las empresas saquen sus desperdicios a la calle y en la frecuencia para recolectar. Resulta

importante que en las ciudades se puedan considerar los ajustes en los recorridos basados en los cambios estacionales o del aumento poblacional.

El seleccionar los medios de transporte apropiados que se utilizarán para recolectar los residuos sólidos puede tener un gran impacto en conseguir de forma eficiente los objetivos que puedan plantearse al aplicar un programa que fue diseñado para tal fin. Las ciudades generalmente tienen presente los siguientes factores al seleccionar los vehículos adecuados:

- **Tamaño de los vehículos:** es considerada una buena práctica basar el tamaño que deben tener los vehículos con el volumen de residuos que serán recolectados. Los camiones compactadores grandes son adecuados solo si se recogen un volumen de residuos relativamente grandes en cada parada. Los camiones grandes no son los más apropiados para las recolecciones frecuentes de volumen de residuos consideradas pequeñas donde un camión pequeño o un triciclo motorizado serían más rentables. Los camiones grandes tampoco son factibles en callejones angostos o espacios vehiculares limitados.
- **Tipo de residuo recolectado:** los residuos segregados al recolectarse pueden requerir vehículos con múltiples compartimentos, en base al grado de segregación.
- **Frecuencia de paradas:** las veces en que se repitan las paradas generalmente orienta la selección que realizan las ciudades, de esta forma los vehículos arranquen y se detengan constantemente, moviéndose a bajas velocidades en condiciones climáticas típicas (calurosas, húmedas, polvorientas) o en carreteras sin pavimentar.
- **Capacidades de peso que puede sostener el vehículo:** las ciudades pueden estimar a cuantos hogares pueden servir sus vehículos hasta completar su capacidad, y establecer un objetivo que implique que el medio de transporte trabaje a un poco menos que esa cantidad.
- **Emisiones de los medios de transporte:** existe en las partes más pobladas una gran preocupación cada día por las emisiones originadas por los medios de transporte pesados que contribuyen a que se contamine del aire local. Las flotas encargadas de recolectar los residuos sólidos contribuyen con que se emitan cantidades sustanciales de material particulado al ambiente en la localidad, especialmente porque operan a diario, cubren grandes distancias hasta los vertederos, pueden no

estar bien mantenidos y pasan durante mucho tiempo detenidos en medio del tráfico o en los lugares de recolección. Por estas razones, muchas ciudades consideran usar vehículos de combustibles alternativos o de bajas emisiones para sus flotas de recolección.

- **Mantenimiento del vehículo:** muchas ciudades han descubierto que seleccionar vehículos que están comúnmente disponibles o tiende ser fácil su mantenimiento (USAID, 2018), aumenta la fiabilidad de cualquier vehículo. Las reparaciones pueden ser realizadas más rápidamente si las piezas se pueden comprar fácilmente a minoristas locales donde no haya necesidad de cambiar divisas o de realizar una importación. El monitorear los requerimientos de cada vehículo mediante controles de rutina permite a los operadores reemplazar los componentes previos a que presenten alguna falla.

Existe un amplio espectro relacionado con las clases de medios de transporte destinados a recolectar los diferentes residuos, que van desde carros de mano sin mecanizar hasta grandes camiones compactadores:

- **Carretillas de mano:** las carretillas de mano se pueden utilizar para recolectar los desperdicios de casa en casa en calles angostas donde un camión ancho no puede entrar. El carro recoge los residuos para luego ser llevados a un camión ubicado donde finaliza la calle. El utilizar carretillas de mano aumenta el número de personal necesario, pero garantiza que todos los residentes tengan acceso a la prestación del servicio. Las carretillas de mano generalmente cuentan con cajas abiertas y están diseñados para recoger o vaciar los residuos recolectados directamente dentro del camión destinado para tal fin. recolectar los residuos.

Figura 9

Carretilla de mano para recolectar desperdicios



Nota: Tomado de *Carretilla de mano plástica grosor 3.5mm 55lts*, por Google Images (2022d) (<https://images.app.goo.gl/UHrFQiDbBMnqR9nJA>).

- Bicicletas a pedal a triciclos: estos rodados a pedal han aumentado tanto la velocidad como la disponibilidad para poder llegar a más residentes en menos tiempo. Estos rodados a menudo tienen un accesorio ubicado delante o detrás donde se almacenan los residuos (United Nations Environment Programme, 2005).

Figura 10

Bicicleta o triciclo para recolectar desperdicios



Nota: Tomado de *bicicleta o triciclo para recoger desperdicios*, por Google Images (2022a) (<https://www.google.com/search?q=bicicleta+o+triciclo+para+recoger+desperdicios&hl=es-sclient=img>).

- Carros tirados por animales: con el uso caballos, mulas y burros para transportar residuos en carros. El usar estos carros para animales puede ser beneficioso ya que no requieren combustibles fósiles, tienen costos operativos y de capital muy

bajos si se comparan con los vehículos motorizados y hacen menos ruido que los medios de transporte recolectores grandes. Los carros están diseñados para que su contenido sea volcado en un sitio para la transferencia o de almacenamiento (United Nations Environment Programme, 2005).

Figura 11

Carro tirado por animal



Nota: Tomado de *carro de desperdicios tirado por animal*, por (Google Images, 2022e) (<https://www.google.com/search?q=carro+de+desperdicios+tirado+por+animal&tbm=isch&ved=>).

- Triciclos motorizados: una motocicleta de tres ruedas es otra variante que se utiliza para hacer la recolecta de los residuos originados por los residentes por caminos angostos en áreas urbanas. Su diseño se asemeja a los rodados con pedales y se utilizan comúnmente en Asia. Los triciclos motorizados usan menos combustible fósil que medios de transporte de mayor tamaño, pueden cargar más peso y moverse a mayores velocidades que las carretillas de mano o los rodados con pedales.

Figura 12

Triciclo motorizado



Nota: Tomado de *Triciclo motorizado de desperdicios*, por Google Images (2022g) (<https://www.google.com/search?q=triciclo+motorizado+para+desperdicios&tbm=isch&ved=2ahUKEwiS>).

- Sistemas de tractores y remolques: estos sistemas permiten transportar cantidades mayores de residuos los cuales son retirados fácilmente desmontando el remolque. Esta capacidad hace que estos procedimientos se hagan con un tractor-remolque y que sea una opción muy adecuada, especialmente para contenedores comunales de recolección.

Figura 13

Tractores remolques



Nota: Tomado de *Tractores remolques*, por Google Images (2022f) (<https://www.google.com/search?q=tractores+remolques&tbm=isch&ved=2ahUKEwjD25vLxdX7AhUexikDHWAhCvcQ2>).

- Camiones: los camiones comerciales también pueden recolectar residuos, especialmente aquellos de contenedores comunitarios. El diseño generalmente

incluye un remolque grande con paredes por todos lados y abierta por arriba, con una bisagra trasera. Estos camiones no fueron elaborados para recolectar residuos y deben estar provistos de una escalera o que alguien los arroje y elimine manualmente.

Figura 14

Camiones comerciales



Nota: Tomado de *Camión volteo aseo*, por Google Images (2022c) (<https://www.google.com/search?q=cami%C3%B3n+volteo+aseo&tbm=isch&ved=2ahUKEwiDmOK0ytX7AhXjdN8KHWe4B1kQ2>).

- Camiones con tolva: este diseño permite subir la carga ubicada detrás de manera fácil y, además pueden transportar mucha cantidad de residuos densos. En estos camiones un fragmento que tienen detrás puede inclinarse tanto para adelante como para atrás y de esta manera compactar los restos o descargar su contenido cuando se encuentre en el lugar de eliminación. Estos camiones a menudo son adecuados en los países que presentan un porcentaje grande de contenido denso y húmedo.

Figura 15

Camiones con tolva



Nota: Tomado de *Camión con tolva para residuos*, por Google Images, (2022b) (<https://www.google.com/search?q=camión+C3%B3n+con+tolva+para+residuos&tbm=isch&ved=2ahUKEwjJsZPrzNX7AhVLh->).

d) Transferencia y transporte

En muchos países, los grandes sitios de eliminación están ubicados lejos de las localidades densamente pobladas. En tales casos, una planta para la transferencia es utilizada como punto intermedio donde son agregados todos los residuos recolectados (y clasifican, si corresponde) para después ser transferidos al vertedero. Estos restos a veces son compactados dentro de los establecimientos de transferencia con el objetivo de minimizar la cantidad de viajes a los vertederos.

Beneficios de los establecimientos para transferencia:

- Consolidar cargas de vehículos para recolectar más pequeños, incluidas bicicletas y carros, en vehículos para la transferencia más grandes ayuda a minimizar los gastos derivados del transporte al permitir que los equipos para recolectar pasen menos tiempo viajando hacia y desde vertederos distantes, y más tiempo recolectando residuos. Esta estrategia también reduce los gastos que se derivan del combustible y las emisiones, los costos relacionados con el mantenimiento del vehículo para recolectar, desgaste de la carretera y el tráfico general.
- Los establecimientos para transferir también pueden servir como un sitio para clasificar y recuperar residuos (EPA, 2022a).
- Realizar actividades de clasificación y recuperación en los establecimientos de transferencia contribuye a ahorrar combustible, disminuir el desgaste al que son sometidos los camiones y a reducir los viajes a los vertederos (USAID, 2018).

Las estaciones para transferir pueden incluir a instalaciones pequeñas, altamente descentralizadas y no mecanizadas, tales como lotes vacíos que sirven como terrenos de eliminación temporal, donde los residentes y los comercios pueden desechar sus residuos o donde los recolectores primarios (p. ej., recolectores que utilizan carros de mano y bicicletas) depositan todos los restos que han recolectado.

Las estaciones para transferir más grandes y robustas se pueden utilizar como un lugar donde agregar, clasificar y cargar cantidades mayores de residuos. Los residuos trasladados a estas estaciones pueden provenir directamente de los residentes y de las compañías, o de recolectores secundarios que recogen los restos en otras estaciones para

transferir más pequeñas o procedentes de camiones que recolectan en la localidad, los cuales recolectan los restos directamente donde es producido.

Estas instalaciones de transferencia deben ubicarse lejos de aquellos drenajes que son abiertos para evitar que sean obstruidos por los residuos los sistemas de drenaje y entren en las redes cloacales, y deben construirse o ubicarse sobre superficies impermeables. Otras consideraciones de selección del sitio incluyen las distancias que los medios de transporte más pequeños deben recorrer desde el sitio de recolección principal hasta el establecimiento para transferir, y la distancia que los medios de transporte más grandes deben recorrer desde el establecimiento para transferir hasta el vertedero.

e) Separación procesamiento y transformación

La separación o segregación de desperdicios, antes o al momento de su recolección, aumenta la eficiencia y reduce los costos porque minimiza los gastos relativos a la contratación de los trabajadores e infraestructura necesarios para segregar aquellos residuos que son mixtos. Los residuos suelen ser separados por diferentes partes en cada paso del proceso durante su recolección:

- Generadores de residuos: algunas ciudades proporcionan contenedores codificados por colores a los residentes y solicitan que los residuos sean separados en origen. Como ejemplo, las Normas municipales para gestionar los residuos sólidos de la India, establecen requisitos nacionales para gestionar los restos sólidos en la localidad. Estas reglas dictan que: los contenedores verdes se utilicen para residuos orgánicos, los contenedores blancos se usen para colocar restos reciclables y los contenedores negros para los demás residuos. Los establecimientos comerciales a veces tienen múltiples contenedores para separar papel, plástico, residuos orgánicos, vidrio y metal.

Figura 16

Contenedores de desperdicios en locales comerciales



SISTEMAS DE TRATAMIENTO Y VALORIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

Méndez P., Arcos, J., Ureta, R., Freytez E.

ISBN 978-987-82816-3-6

Nota: Tomado de *Contenedores de reciclaje: tipos, colores y significado*, por Nabalía (2018) (<https://nabalíaenergia.com/blog/contenedores-reciclaje/>).

- Recolectores de residuos: estos recolectores cuelgan varias bolsas de sus carritos de empuje, carritos de bicicleta o vehículos, y las usan para ir separando los residuos mientras los recolectan de los hogares. Usualmente, separan los desperdicios que son reciclables en bolsas y depositan en un recipiente para contener los no reciclables donde se incluyen también los restos que son orgánicos. Si la ciudad tiene una instalación para procesar aquellos residuos que son orgánicos (compuesto o digestor anaeróbico), el recolector también puede separarlos al momento de recolectar los desperdicios.

Figura 17

Separación de desperdicios durante la recolección



Nota: Tomado de *De la separación primaria a la avanzada, historia del reciclaje en la CDMX*, por SEDEMA (s. f.) (<http://data.sedema.cdmx.gob.mx/nadf24/separacion.html>).

- Contenedores comunitarios especializados: algunas ciudades proporcionan contenedores comunales en complejos de viviendas multifamiliares o en vecindarios para de esta manera los residentes individuales eliminen sus residuos. Muchas ciudades tienen segregación por medio de contenedores codificados por colores (p. ej., azul para papel y artículos de papel, marrón para residuos orgánicos, blanco para vidrio transparente, verde para vidrio de color, amarillo o naranja para material de empaque reciclable y gris o negro para otros residuos).

f) Disposición final

Esta es la última etapa del sistema y es la acción que consiste en depositar de forma permanente los desperdicios que ya no tienen ninguna utilidad, la materia residual que

queda después de la separación de residuos sólidos en las actividades de recuperación de materiales y la materia residual restante después de la recuperación de productos de conversión o energía en sitios o instalaciones que garantizan una disposición final controlada y que cuentan con ciertas características capaces de prevenir efectos dañinos a la salud de las personas y al medio ambiente (H. Rodríguez, 2012).

Entre las instalaciones que más comúnmente son utilizadas para disponer de forma permanente estos desperdicios se encuentran los rellenos sanitarios, las cuales son instalaciones de ingeniería utilizadas para colocar dichos desperdicios sólidos en el suelo, ubicados en sitios que suelen estar retirados de las poblaciones para evitar incomodidades o peligros a la salud pública.

Entre los rellenos sanitarios según Gutiérrez (2006), existen tres tipos, en los cuales se debe impermeabilizar el terreno para luego poder depositar los desperdicios sólidos sobre él, estos son:

- De zanja: es el más utilizado en regiones que son planas. Consiste en realizar excavaciones de zanjas donde son depositados los desperdicios y son acomodados para su posterior compactación y ser cubiertos con tierra.
- De área: son realizados en superficies que no son completamente planas, donde las celdas son construidas con una pequeña inclinación para evitar deslizamientos y lograr una mejor estabilidad a medida que aumenta el relleno.
- Combinado: es más utilizado en terrenos que ofrecen la pendiente y la profundidad para depositar los desperdicios, sin la necesidad de tener que excavar una zanja o una pendiente, combinándose los dos tipos de rellenos.

4 Importancia de la Prevención y minimización de residuos

Las ciudades han descubierto que prevenir la producción de basura cuando se recolectan los residuos representa una estrategia muy importante. Cuando se recolectan y se cargan los residuos, es frecuente que se dispersen cantidades moderadas de estos en la carretera. La coordinación del trabajo asignado a los equipos encargados de recolectar y los barrenderos puede garantizar que se elimine inmediatamente cualquier residuo que haya quedado. Los residuos cargados en los medios de transporte para recolectar que son abiertos pueden cubrirse por una red u otro material para evitar que dichos residuos se escapen.

Prevenir y disminuir los residuos, así como ejecutar procedimientos y prácticas destinados a conseguir la reducción de la magnitud de desperdicios producidos, es considerada una de las prácticas más apropiadas en los procedimientos para gestionar los residuos sólidos. Reducir los desperdicios y reutilizarlos es beneficioso para el ambiente y para la salud además de permitir ahorrar dinero.

Prevenir que sean producidos desperdicios, lo que habitualmente es llamada reducción en origen, significa reducir que se produzcan desperdicios. La prevención y aminorar los desperdicios pueden direccionarse hacia los residuos alimentarios, material de empaque y productos desechables, siendo estos una porción de los productos típicos en los flujos de residuos.

- Los residuos alimentarios pueden abordarse redistribuyendo alimentos que de otro modo se desperdiciarían. Algunos ejemplos incluyen usar aplicaciones que vinculen a los donantes de alimentos, como restaurantes, proveedores de alimentos y tiendas de comestibles, con bancos de alimentos; el usar refrigeradores comunitarios donde los hogares más necesitados puedan acceder al excedente de alimentos de otro hogar; y campañas de concientización que promueven el aumento del consumo de frutas y verduras que, de otro modo, se desperdiciarían porque no tienen la forma, el tamaño o el color ideales.
- Se puede minimizar el material usado para el empaque mediante el uso de productos que tengan un empaque mínimo e instituyendo tarifas para las bolsas que son de plástico y papel.
- Utilizar productos desechables se puede minimizar al fomentar el adquirir productos duraderos y resistentes.
- Prevenir que se produzcan desperdicios suele ser tan simple como cambiar de productos desechables a reutilizables, o tan compleja como rediseñar un producto para que utilice menos materias primas o que sea más duradero.

A causa de que la prevención para producir desperdicios evita la multiplicación de estos, ha pasado a ser una actividad de preferencia y más rentable si de gestionar los residuos sólidos. Prevenir o minimizar los residuos conserva los recursos (p. ej., al reducir los gastos que implica ser recolectados y transportados), protege al ambiente y evita la liberación de gases causantes del efecto invernadero (EPA, 2022b).

Las partes interesadas en todos los niveles desempeñan un rol relevante en la prevención y la minimización de los desperdicios, y las estrategias para prevenir y la minimización deben tener presente todas las reglas y prácticas sociales del medio, y las condiciones económicas y del mercado.

Muchos países ya han puesto en marcha estrategias para reducir los residuos porque las personas valoran los materiales de manera diferente según su cultura. Reparar y reutilizar, reciclar, revender, intercambiar y entregar bienes usados como regalos son prácticas que en varias partes en el mundo son fomentadas (United Nations Environment Programme, 2005). La reducción que es realizada al volumen producido de restos y que posteriormente serán trasladados y eliminados está entre las prácticas más recomendadas en los proyectos para gestionar los residuos sólidos. Todos estos residuos pueden recuperarse en origen, durante el transporte o al estar en el sitio donde son vertidos. La separación temprana es preferible porque conduce a materiales más limpios y de mayor calidad y también reduce los costos relacionados con el transporte y eliminación. Los incentivos que integran y fomentan la participación del sector informal pueden ser esenciales para disminuir los residuos (USAID, 2018).

Anteriormente se mencionó que la mejora a nivel económico generalmente conduce a un aumento del gasto en nuevos bienes (especialmente los productos electrónicos). Muchas ciudades, han encontrado de gran utilidad tener presente las proyecciones de desarrollo a nivel económico al momento de planificar estrategias para prevenir y disminuir los residuos.

Finalmente se puede mencionar que la Gestión Integral de los Residuos Sólidos (GIRS), corresponde a un sistema que permite controlar la generación, el almacenamiento, la recopilación, la transferencia, el transporte, el procesamiento y la eliminación de los residuos sólidos de una forma que cumplan con los principios básicos establecidos para la salud de los seres humanos, a través de métodos y estrategias que permitan su manejo adecuado por medio de una serie de etapas que contribuyen de forma segura a minimizar el impacto al ambiente y a la salud pública, tomando en cuenta las limitaciones o desafíos que están presente como la carencia de recursos financieros, las deficiencias en cuanto a equipos de avanzada y conocimientos sobre el manejo de estos equipos, la falta de planificación, entre otros.

Este sistema contempla una serie de etapas que cumplen con una jerarquización que permite el direccionamiento respecto al procesamiento de los desperdicios sólidos, etapas que son consideradas como las más ecológicas para tratar los desperdicios antes de ser descartados en los basureros, las cuales son la reducción y reutilización (prevención) en el origen, el reciclaje, la recuperación, el tratamiento y la eliminación. Etapas que garantizan una buena gestión en el manejo de los residuos sólidos.

CAPÍTULO 3.

Procesos físicos aplicados en el tratamiento de residuos sólidos

1. Introducción

Para realizar una adecuada gestión de residuos sólidos, es necesario conocer sus propiedades físicas, químicas y biológicas, en virtud a la influencia que tienen en la determinación de los procesos y equipos que se requieren para la separación, tratamiento, transformación y posterior recuperación de materia y energía (Ormaza, 2015). Las propiedades físicas más importantes que hay que considerar para el procesamiento de los residuos son: la densidad, la humedad y la granulometría.

La densidad, conocida como la cantidad de Kg de material por unidad de volumen (m^3), determina la capacidad de los equipos de recogida y el espacio requerido para el almacenamiento de los residuos, y está condicionada por el grado de compactación, localización geográfica, clima, componentes y tiempo de almacenamiento (Ormaza, 2015).

La humedad de los residuos reviste gran importancia por estar presente en un rango que oscila desde un 25 hasta un 60% en peso. Tiene gran influencia en los procesos de compresión, lixiviación, transporte, transformación, incineración, recuperación

energética y procesos de separación de residuos en las plantas de reciclaje (Ambientum, 2022a).

La granulometría, constituye el grado de segregación de los materiales y el tamaño físico de los componentes elementales de los residuos urbanos, y tienen un valor imprescindible para el dimensionado de los procesos mecánicos de separación y, en específico, para la definición de cribas, trommeles y elementos asociados a la separación relacionada con el tamaño (Ambientum, 2022a).

Adicionalmente, es importante resaltar que previo al procesamiento de los residuos, la primera actividad que se lleva a cabo es la selección que permite separar y clasificar los residuos que irán a reciclaje de los que no irán. Dicha selección puede realizarse de varias maneras, estas son: selección manual, granulométrica y densimétrica (RECYTRANS, 2013).

La separación manual, la realizan los operarios que retiran manualmente los residuos fáciles de identificar y de retirar. Puede realizarse sobre una cinta transportadora. La granulométrica, consiste en separar los residuos por tamaño, lo cual se logra con un cilindro de malla o “trommel” que gira y provoca la caída de dichos residuos. La densimétrica consiste en separar los residuos en base a sus densidades y se realiza en equipos de captación neumática y el separador balístico (RECYTRANS, 2013).

En el desarrollo de este capítulo se estarán presentando los diferentes procesos físicos aplicados al procesamiento de los residuos, su concepto, objetivo y equipos involucrados en la operación.

2. Procesos de separación, procesamiento y transformación de los residuos sólidos.

En la gestión para el manejo de los residuos sólidos existen una serie de procesos de transformación que se pueden utilizar para el aprovechamiento de los constituyentes de los residuos sólidos, para lo cual es necesario cumplir una serie de etapas que involucran operaciones que van desde la separación, para posteriormente iniciar su proceso de transformación.

La separación puede ser realizada de forma manual o mecánica dependiendo de la cantidad de desperdicios que se vayan a tratar, y es recomendable que se haga donde es generado el desperdicio o fuente de generación, llevándose a cabo una serie de actividades que están asociadas a la gestión de los desperdicios sólidos las cuales van a depender del

tipo de material, si va a ser reutilizado o reciclado y de la frecuencia en que sea necesaria la separación, para posteriormente ser almacenados antes de ser trasladados al centro de acopio. Las operaciones que comúnmente se realizan in situ a nivel domiciliario son la trituración (material orgánico), compactación, compostaje e incineración en chimeneas (Tchobanoglous et al., 1998).

En el centro de acopio se realiza la separación (en caso de que no se haga en la fuente de generación), separando los componentes de los desperdicios como papel, aluminio, vidrio, madera, plástico, entre otros.

Posteriormente se procede al procesamiento, lo cual según Tchobanoglous et al.(1998) se realiza por tres principales razones, como lo son el reducir el volumen de los desperdicios, recuperar aquellos materiales que sean reutilizables y alterar físicamente a los desperdicios para facilitar su adecuado manejo. En este procesamiento los desperdicios son sometidos a una transformación que puede ocurrir por medios físicos, termoquímicos y/o biológicos, hasta su disposición final, en la figura 18 se puede observar los procedimientos de acuerdo al medio.

Figura 18

Procesos de separación, procesamiento y transformación de los residuos sólidos

Físicos	Termoquímicos	Biológicos
• Reducción de tamaño • Separación por tamaño • Compactación	• Incineración • Pirolisis • Recuperación de energía	• Digestión anaerobia • Compostaje • Recuperación de materia y energía

Nota: Elaboración propia, (2022).

3. Procesos físicos

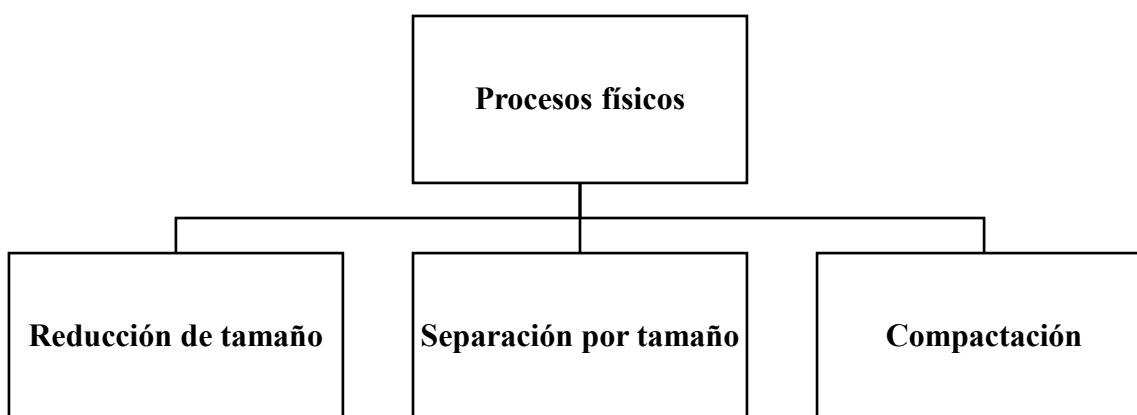
Los procesos físicos que son más utilizados para el tratamiento de los residuos, se emplean fundamentalmente para llevar a cabo la separación del residuo en base a su tamaño. Estos tratamientos no modifican la constitución de los componentes, sino su forma de presentación y pueden utilizarse para facilitar la aplicación de otros métodos u

operaciones. Por otra parte, no implican un cambio de fase (por ejemplo, sólido a gas), como ocurre con los procesos químicos y biológicos (Tchobanoglous et al., 1998).

Los principales procesos físicos que pueden producirse en la implementación de los sistemas de gestión de residuos sólidos de acuerdo con la figura 19 incluyen: 1) reducción de tamaño 2) separación por tamaño, y 3) compactación.

Figura 19

Procesos físicos de tratamiento aplicado a los residuos sólidos



Fuente: Elaboración propia, (2022).

3.1 Reducción de tamaño

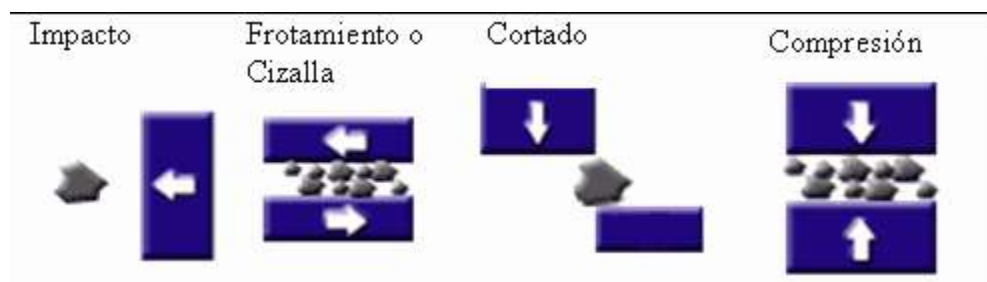
La reducción de tamaño de los residuos sólidos para la recuperación de materia y energía, constituye una operación unitaria que consiste en la aplicación de una fuerza de compresión, impacto o de abrasión, cuya finalidad es disminuir las dimensiones de las partículas hasta la magnitud requerida para su posterior procesamiento (Pérez, 2013). El propósito de esta operación es disminuir y homogenizar el tamaño de los residuos, para facilitar su posible procesamiento, tratamiento o disposición final (Ministerio del Medio Ambiente Colombia, 2002).

El termino reducción de tamaño es aplicado a aquellas formas donde las partículas de sólidos pueden ser cortadas o fracturadas en trozos de menor tamaño. Es una de las operaciones unitaria donde el tamaño promedio de los residuos sólidos puede ser reducidos por medio de la utilización de fuerzas de impacto o choque, por compresión, frotamiento y cortado (Pérez, 2013).

La compresión se emplea cuando se trata de residuos sólidos duros de tamaño mayor al deseado. El impacto se usa cuando se desea producir diferentes tamaños, desde gruesos hasta finos; y la abrasión, también llamada cizalla, cuando se desean partículas finas y tamaños prefijados. En la Figura 20 se muestran las diferentes fuerzas que se emplean para la reducción del tamaño de las partículas.

Figura 20

Fuerzas para la reducción del tamaño de los residuos sólidos



Nota: Tomado de *Reducción de tamaño*, por Pérez (2013), *Operaciones Unitarias I* (<https://sites.google.com/site/opecristina1/home/reducciondetamano>).

La finalidad de realizar la reducción del tamaño resulta de importancia por lo siguiente:

1. Permite extraer de forma fácil algún constituyente que se requiera y que se encuentre formando parte del sólido.
2. En base a los requisitos de un determinado alimento pueden obtenerse partículas de un tamaño específico.
3. Se incrementa la relación superficie-volumen, aumentando a su vez las velocidades de calentamiento, de enfriamiento y de extracción de un determinado soluto.
4. Favorece la mezcla de sólidos con menor tamaño y homogéneo, como por ejemplo la elaboración de formulaciones, sopas deshidratadas, entre otros.

La reducción del tamaño generalmente es realizada mediante unos equipos llamados molinos, que dependiendo del tamaño final alcanzado pueden clasificarse de acuerdo a como se presenta en la tabla 4:

Tabla 4*Tipos de molinos de acuerdo al tamaño del producto final*

Rango de reducción de tamaño	Nombre genérico del equipo	Tipo de equipo
Grueso e intermedio	Molinos de gruesos: “Crushers”	De rodillos
Intermedio y fino	Molinos de finos: “Mills o Grinders”	• De martillo • Disco de atrición • De rodillos
Fino y ultrafino	Molinos de ultrafinos: “Ultrafine grinders”	• De martillo • De bolas

Nota: Tabla de *Handling and processing of food powders and particulates, de Encapsulated and Powdered Foods* (p.118), por Ortega-Rivas (2005), Taylor & Francis Group, Boca Raton (<https://epdf.tips/encapsulated-and-powdered-foods-food-science-and-technology.html>).

El termino molino se utiliza para describir una gran variedad de máquinas de reducción de tamaño para servicio intermedio. El producto procedente de un triturador con frecuencia se introduce como alimentación de un molino en el que se reduce a polvo. Todos estos molinos contienen un rotor que gira a gran velocidad en el interior de una coraza cilíndrica. Por lo general el eje es horizontal, la alimentación entra por la parte superior de la coraza, se trocea y cae a través de una abertura situada en el fondo. En un molino de martillos, se rompen las partículas por medio de unos martillos que son giratorios y ubicados en serie y que están acoplados a un rotor. Una partícula de alimentación que entra en la zona de molienda no puede salir sin ser golpeada por los martillos (Ortega-Rivas, 2005).

Se rompe en pedazos que se proyectan contra la placa yunque estacionaria situada dentro de la coraza, rompiéndose todavía en fragmentos más pequeños, siendo pulverizados por todos estos martillos y luego son impulsados a través de una rejilla o un tamiz que protege la abertura por donde se hace la descarga. Por lo general son montados varios discos de rotores sobre un mismo eje con un diámetro de 150 a 450 mm y con 4 a 8 martillos. Los martillos suelen estar constituidos por diversas barras que son rectas y de metal que poseen extremos que pueden ser planos o de forma alargada o también tienden a ser afilados que forman un borde que es cortante (Ortega-Rivas, 2005).

Los molinos que son de martillo para reducir el tamaño a un nivel intermedio dan como resultado un producto con partículas de tamaño de 25 mm a 20 mallas. Los molinos que son de martillo para obtener una molienda fina, poseen una velocidad periférica en

los extremos de dichos martillos que alcanza los 110 m/seg. Los requerimientos de capacidad y el gasto de energía necesarios para un molino de martillo varían mucho con la naturaleza del material con que se alimenta y no se pueden estimar con confianza a partir de las consideraciones teóricas, sino que es preferible obtener estos valores a partir de información publicada.

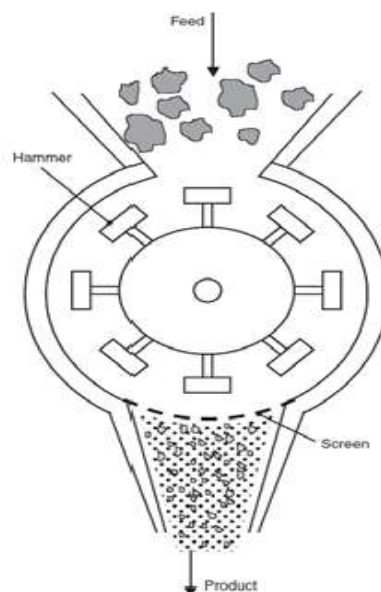
Operacionalmente un molino que es de martillos es un dispositivo de impacto donde se acoplan flexiblemente un número de martillos a un eje o disco central que gira a altas velocidades. Por la fuerza centrífuga, los martillos se extienden radialmente desde el eje central. Cuando los residuos sólidos entran en el molino de martillos, son golpeados con suficiente fuerza como para ser aplastados o rasgados con tanta velocidad que no se adhieren a los martillos.

Se reduce todavía más el tamaño de los residuos cuando se golpean contra placas rompedoras o barras cortantes fiadas alrededor de la periferia interna de la cámara interior. La acción cortante sigue hasta que el material tiene el tamaño deseado y cae fuera por el fondo del molino. Se pueden diseñar molinos de martillos con configuraciones de eje horizontal o eje vertical. Se ha comprobado que las máquinas con eje horizontal son más fiables.

Según Ortega-Rivas (2005), los molinos de finos “Mills” o Grinders”, reducen el tamaño que tienen las partículas de intermedio a fino, pudiendo emplear molinos de martillo, de discos de atrición y de rodillos. En la Figura 21 se puede apreciar la estructura y funcionamiento de un molino de martillo.

Figura 21

Molino de martillo



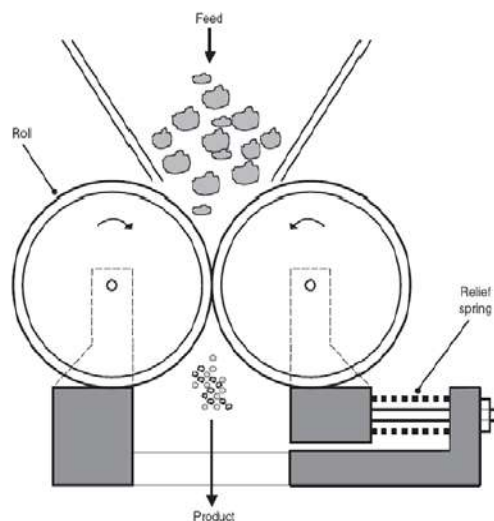
Nota: Figura de *Handling and processing of food powders and particulates* (Figura 24), de *Encapsulated and Powdered Foods* (p.120), por Ortega-Rivas (2005), Taylor & Francis Group, Boca Raton (<https://epdf.tips/encapsulated-and-powdered-foods-food-science-and-technology.html>).

El molino de martillo tiene entre sus componentes un rotor. El rotor, dotado de una cadena con un determinado número de martillos en la periferia, gira a gran velocidad en el interior de una carcasa de forma cilíndrica. La ruptura se da principalmente por fuerzas de impacto y, en menor grado, por desgaste mecánico.

Los molinos de gruesos “Crushers”, están constituidos por dos cilindros o rodillos de acero que rotan en sentido contrario, atrapando las partículas y provocando así su ruptura y consecuente disminución a tamaños de gruesos a intermedios (Ortega-Rivas, 2005). Una aproximación a su funcionamiento se puede apreciar en la Figura 22:

Figura 22

Molinos de gruesos o Crushers

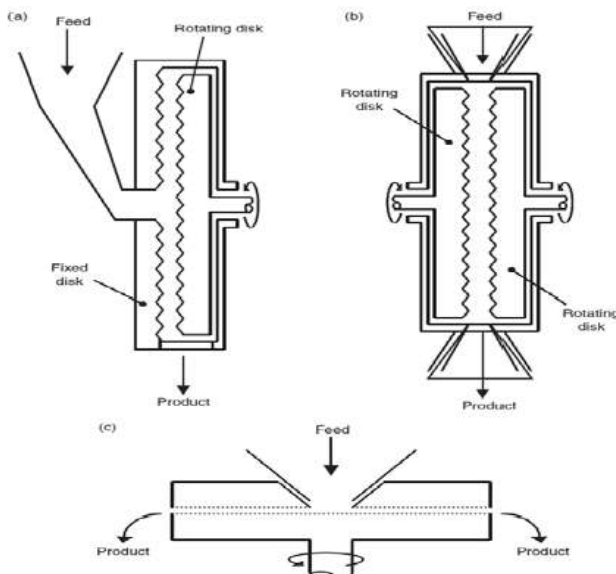


Nota: Figura de *Handling and processing of food powders and particulates* (Figura 23), de *Encapsulated and Powdered Foods* (p.119), por Ortega-Rivas (2005), Taylor & Francis Group, Boca Raton (<https://epdf.tips/encapsulated-and-powdered-foods-food-science-and-technology.html>).

En cuanto a los molinos compuestos por disco de atrición, mostrados en la Figura 23, son usados para obtener partículas más finas empleando una fuerza de corte. Pueden ser de varios tipos: el de un disco rotatorio y uno fijo (a), el de dos discos rotatorios (b) y el molino tipo Buhr (c), el más antiguo de todos, que consiste en dos discos montados en un eje vertical, donde el de arriba se encuentra fijo, mientras que el disco de abajo es el que rota.

Figura 23

Molinos de atrición

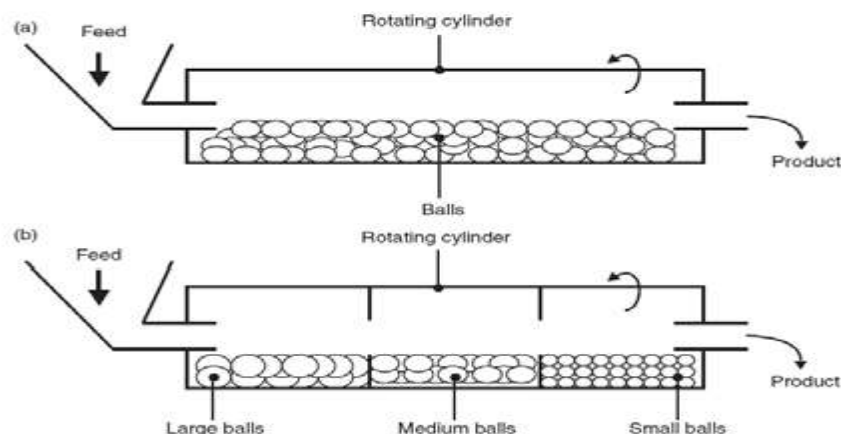


Nota: Figura de *Handling and processing of food powders and particulates* (Figura 25), de *Encapsulated and Powdered Foods* (p.121), por Ortega-Rivas (2005), Taylor & Francis Group, Boca Raton (<https://epdf.tips/encapsulated-and-powdered-foods-food-science-and-technology.html>).

Los molinos de ultrafinos (ultrafines grinders) son empleados cuando se desea obtener una molienda fina. Están constituidos por un tambor de forma cilíndrica ubicado de forma horizontal el cual, rota a una velocidad baja, y se encuentra lleno de forma parcial de bolas o en algunos casos de barras Ortega-Rivas (2005), tal como se muestra en la Figura 24 parte (a). A veces se les coloca unos separadores para obtener diferentes tamaños, tal como se evidencia en la Figura 24 parte (b).

Figura 24

Molinos de ultrafinos

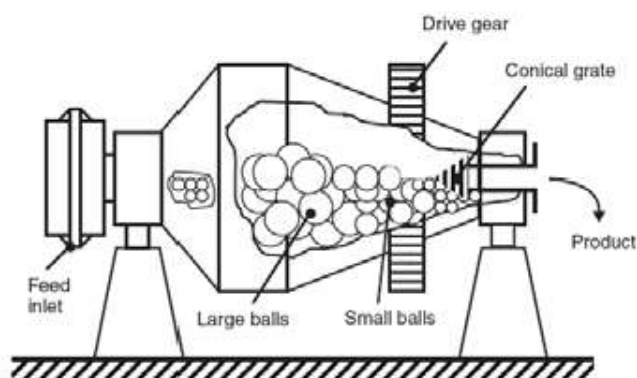


Nota: Figura de *Handling and processing of food powders and particulates* (Figura 26ab), de *Encapsulated and Powdered Foods* (p.122), por Ortega-Rivas (2005), Taylor & Francis Group, Boca Raton (<https://epdf.tips/encapsulated-and-powdered-foods-food-science-and-technology.html>).

En esta categoría también están los tambores cónicos, que al girar provocan que las partículas de mayor tamaño se desplacen hacia el sitio de mayor diámetro o tamaño y las más pequeñas lo hagan hacia la salida del equipo, tal como se muestra en la Figura 25.

Figura 25

Molinos de ultrafinos cónico (ultrafine grinders)



Nota: Figura de *Handling and processing of food powders and particulates* (Figura 26c), de *Encapsulated and Powdered Foods* (p.122), por Ortega-Rivas (2005), Taylor & Francis Group, Boca Raton (<https://epdf.tips/encapsulated-and-powdered-foods-food-science-and-technology.html>).

Adicionalmente, cabe señalar que el equipo requerido dependerá del proceso y del tipo de material que lo requiera. De allí que en el mercado existan equipos específicos para los diferentes tipos de materiales, vidrio, plásticos, metales. Por ejemplo, para los metales y vidrio se emplean las conocidas machacadoras de mandíbula, trituradoras de cono y de rodillos y molinos de impactos y de martillo, mientras que para el plástico se usan máquinas cortadoras y peletizadoras (Ministerio del Medio Ambiente Colombia, 2002).

Existen trituradoras de eje simple que poseen una estructura reforzada y están equipadas con placas intercambiables más grandes que otros modelos, porque incorporan un exclusivo cojinete parachoques con el fin de reducir las roturas, lo que garantiza un rápido mantenimiento además de un considerable incremento en la productividad (FOR REC, 2022b). El criterio para diseñar los equipos requeridos, en cuanto a tamaño, potencia y concepción, va a depender del tipo y cantidad del residuo que se desea procesar (Ministerio del Medio Ambiente Colombia, 2002).

Existen una serie de factores que según Mavares et al. (2018), se deben tener en consideración en la selección de un equipo para la reducción de tamaños:

1. Materiales para ser triturados: deben conocerse las características mecánicas del material tales como resistencia al corte (resistencia a los esfuerzos cortantes), ductibilidad (alargamiento a tracción relativamente hasta llegar al punto de rotura).
2. Requerimientos de tamaño para los materiales triturados según componentes: los molinos que son de martillos tienden a producir un producto no uniforme en cambio las trituradoras cortantes producen un material más uniformemente triturado.
3. Características operacionales: requisitos de energía, requisitos de mantenimiento rutinario y especializado, simplicidad de operación, rendimiento y fiabilidad comprobada generación de ruido y requisitos para controlar la contaminación atmosférica y de agua.
4. Consideraciones de localización: disponibilidad de suelo y altura, acceso y consideraciones ambientales.

3.3 Separación por tamaño

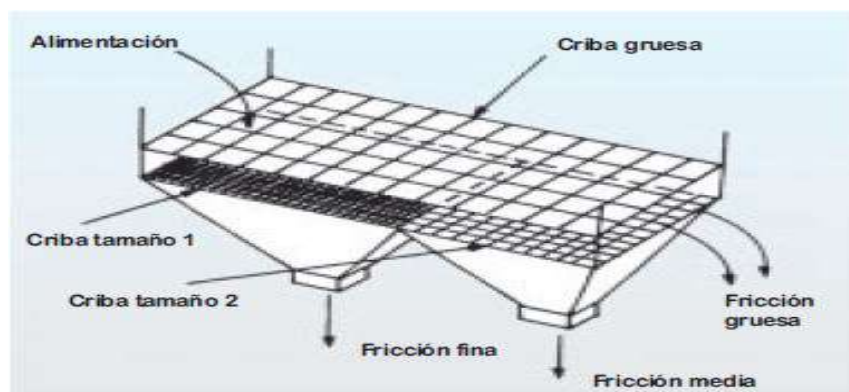
La separación o clasificación de residuos por tamaño, es la actividad que sigue a la fragmentación o trituración y se realiza para facilitar la manipulación, el transporte y posible tratamiento posterior. Existen dos tipos básicos de separadores que son las cribas, para separaciones gruesas, y los tamices o clasificadores para separaciones más finas.

La separación por tamaño o cribado implica la separación de una mezcla de materiales en 2 o más porciones mediante el uso de una o más superficies de criba que se utilizan como tamaños de selección. Puede llevarse a cabo la reducción por tamaño mediante la utilización de una vía seca o una vía húmeda, siendo la primera la más común en sistemas de procesamiento de residuos sólidos.

En las Figuras 26 y 27 se presentan dos tipos de cribas para separar los residuos sólidos: la criba vibradora y la giratoria Trommel (Ministerio del Medio Ambiente Colombia, 2002).

Figura 26

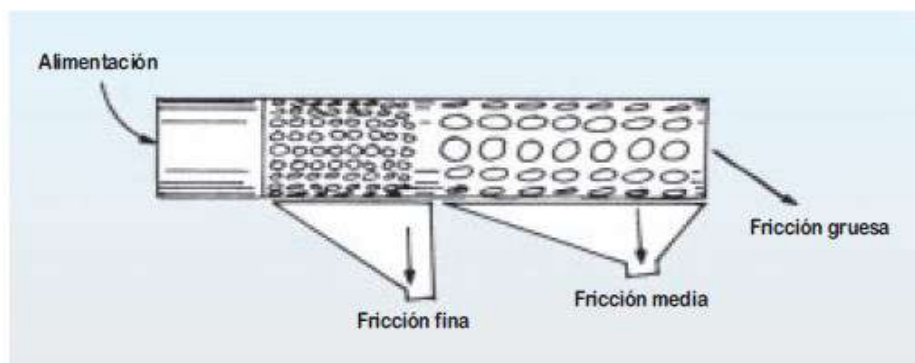
Criba vibradora



Nota: Figura de *Guía para selección de tecnologías de manejo integral de residuos sólidos. Algunas alternativas tecnológicas* (p.8), por Ministerio del Medio Ambiente Colombia (2002), (http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=8409&shelfbrowse_itemnumber=8901).

Figura 27

Criba giratoria Trommel



Nota: Figura de *Guía para selección de tecnologías de manejo integral de residuos sólidos. Algunas alternativas tecnológicas (p8)*, por Ministerio del Medio Ambiente Colombia (2002), (http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=8409&shelfbrowse_itemnumber=8901).

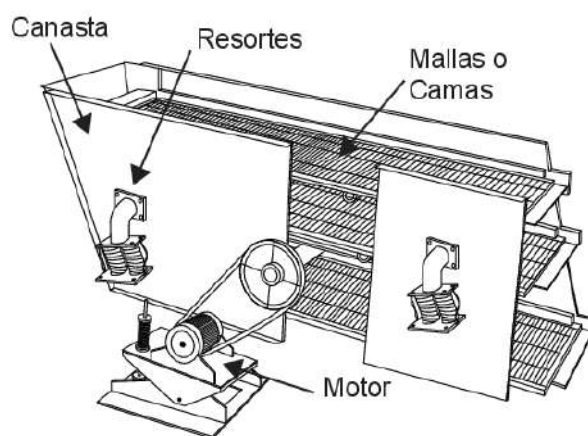
Las cribas están conformadas por barreras físicas que permiten separar los trozos de residuos por tamaños, usando superficies o láminas perforadas de diversos materiales, actuando como un calibrador que permite o no el paso de material (Ministerio del Medio Ambiente Colombia, 2002).

Se han utilizado cribas antes de la trituración y después de la misma, y también después que se hace la clasificación neumática en el procesamiento de combustible derivado de residuos (CDR). También se utilizan en el procesamiento de compost para conseguir un producto más uniforme. Este es un método de separación de partículas basado exclusivamente en el tamaño de las mismas. Las partículas de menor tamaño o finos pasan a través de las aberturas. En la figura 28 se puede observar algunas partes generales de una criba.

En relación a los equipos que se usan y resultan los más indicados para la clasificación de los residuos por tamaño, son los del tipo de caída libre que pueden ser hidráulicos o neumáticos, según usen agua o aire como fluido para la clasificación (Ministerio del Medio Ambiente Colombia, 2002).

Figura 28

Partes de una criba



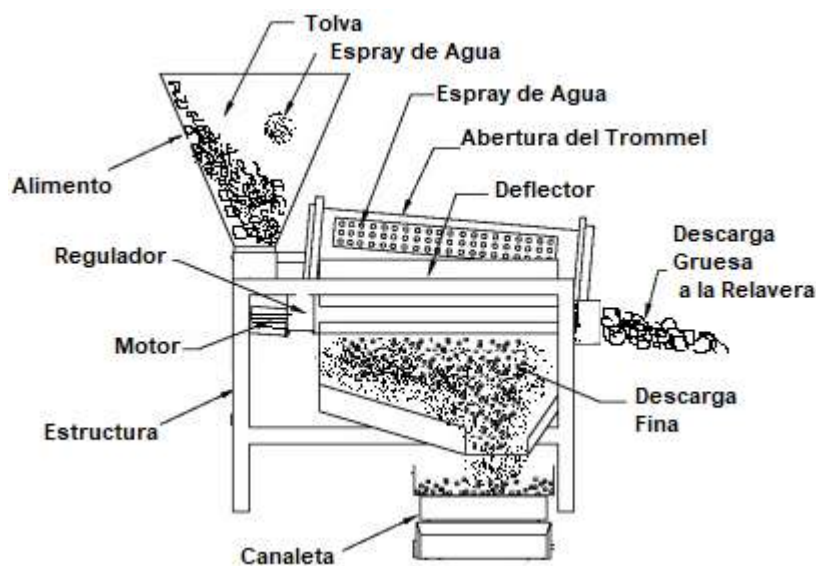
Nota: Figura de Cribas, por TYMSA (2015), (<https://www.trituracionymolienda.com.mx/cribas/>).

Tipos de cribas:

- Cribas vibratorias: muy a menudo se utilizan las cribas vibratorias para separar materiales relativamente secos como vidrio y metales. También se han utilizado las cribas vibratorias para separar astillas de madera que se utilizan como agregado en el compostaje de fangos a partir del compost ya elaborado y para separar trozos de fragmento de hormigón a partir de residuos de construcción.
- Cribas trómel: es un tipo de criba muy versátil a la hora de procesar residuos sólidos. Consiste en una criba de gran diámetro (normalmente 3 m) formada por un cilindro girando sobre un eje ubicado de forma horizontal, como se puede apreciar en la figura 29. Este tipo de criba son muy utilizadas en la separación de materiales menos pesados y que tienden a adherirse como gomas, residuos de alimentos con alto contenido de humedad, entre otros.

Figura 29

Criba trommel

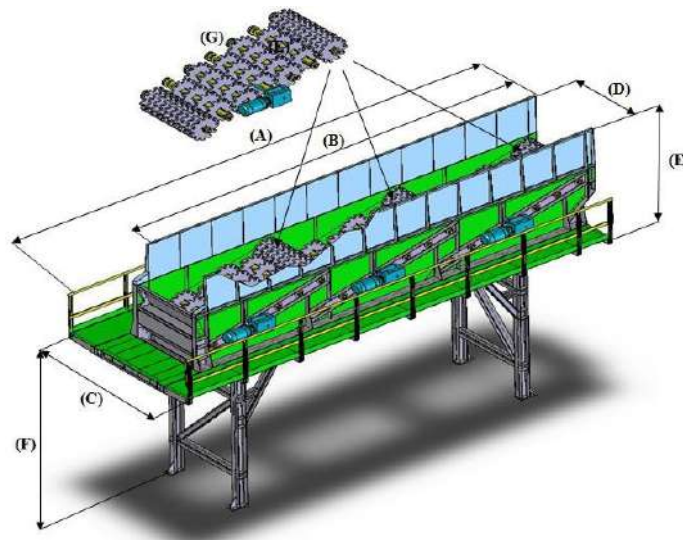


Nota: Figura de *Planta gravimétrica para lavado de oro de minería aluvial*, por 911metallurgist (2022), (<https://www.911metallurgist.com/metallurgia/mineria-aluvial-planta-gravimetrica-lavado-oro-aluvial/>).

- Cribas de disco: son una alternativa a las cribas giratorias. Los materiales que hay que separar caen entre los espacios y los materiales grandes se llevan por encima de los discos en una cinta transportadora, tal como se observa en la figura 30. FOR REC (2022a) describe una criba de discos, como un equipo que está compuesto por una serie de ejes de acero en los que están acoplados unos discos poligonales de diferentes diámetros y anchura dependiendo del material que se deba tratar, tamaño y caudal requerido. Tiene varias ventajas sobre las cribas vibratorias incluyendo autolimpieza y capacidad de ajuste.

Figura 30

Criba de discos



Nota: Figura de OUTCART, por Hofmann Group (s. f.), (<https://www.hofmanngroup.com/vagli/vaglio-a-dischi/outcart>).

Entre los diversos factores que se tienen que tomar en cuenta para la selección del equipo de cribado están:

1. Características de los residuos: tamaño de partícula, forma, peso específico bruto, contenido en humedad, distribución de partículas por tamaño, tendencia a amontonarse, propiedades reológicas (ciencia de deformación y el flujo de materiales).
2. Parámetros de diseño de la criba: tamaño de las aperturas (cm), porcentaje de espacios abiertos, área de cribado superficial total (m^2), velocidad rotacional para trómeles (rpm) ángulo de elevación de trómeles y tasas de carga.
3. Eficacia de separación: recuperación, eficacia y pureza (porcentajes)
4. Características operacionales: requisitos energéticos (cv), mantenimiento, complejidad de operación, ruido, emisiones atmosféricas y aguas residuales.

3.3 Separación por densidad

La separación por densidad es una técnica que se emplea para desagregar materiales en base a su densidad y sus características aerodinámicas, por medio de la utilización de diversas tecnologías como son la clasificación neumática, la flotación, uso de separadores

inertes o stoners y la separación de medios densos, siendo la clasificación neumática la de mayor uso (Ministerio del Medio Ambiente Colombia, 2002).

La separación por densidad se ha aplicado a la separación de RSU triturados en base a dos componentes principales:

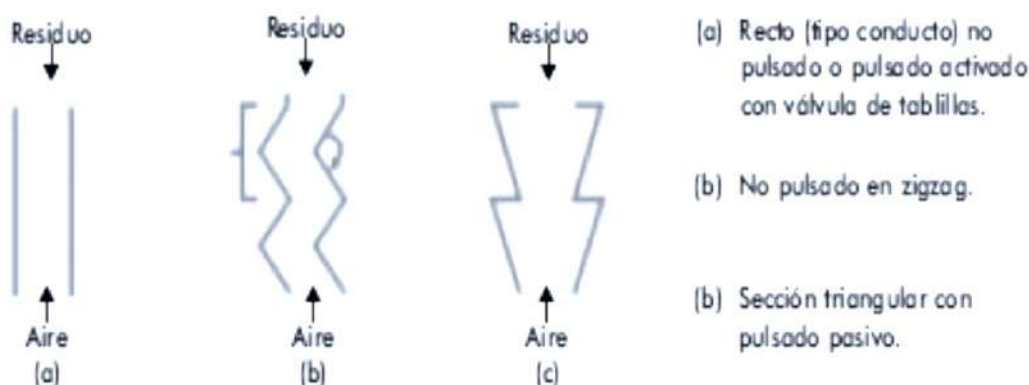
1. La fracción ligera, compuesta principalmente de papel, plástico y orgánicos.
2. La fracción pesada constituida principalmente por metales y otros materiales inorgánicos que son relativamente más densos.

Equipos utilizados:

- Clasificadores neumáticos: la clasificadora neumática está conformada por una o más transportadoras, un clasificador y un ciclón separador. Emplea aire como medio de transporte, el cual es o puede ser suministrado por compresores o ventiladores de baja presión. La flotación, emplea un fluido que se encarga de separar dos componentes con diferentes densidades y medios densos. Es muy empleada para separar materiales tan densos como el aluminio. Los separadores inertes, solo funcionan como separadores por densidad porque el criterio de separación solo lo constituye la velocidad límite y no el peso o la densidad; se emplean para separar la gravilla pesada del material orgánico (Ministerio del Medio Ambiente Colombia, 2002). En la Figura 31 se presentan tres diseños funcionales de clasificadores neumáticos utilizados para separar las fracciones ligeras y pesadas de los residuos sólidos (Ministerio del Medio Ambiente Colombia, 2002).

Figura 31

Diseños funcionales de clasificadores neumáticos



Nota: Figura de *Guía para selección de tecnologías de manejo integral de residuos sólidos. Algunas alternativas tecnológicas* (p.7), por Ministerio del Medio Ambiente Colombia (2002), (http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=8409&shelfbrowse_itemnumber=8901).

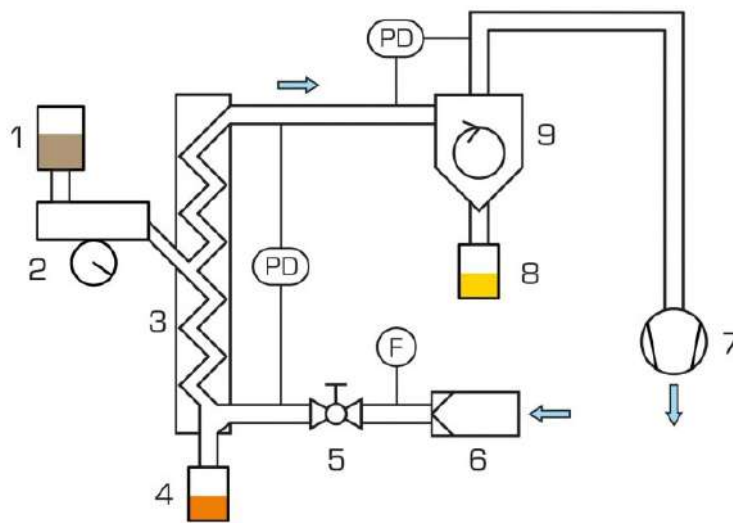
En los tipos más sencillo de clasificadores neumáticos, los residuos sólidos triturados se dejan caer por un conducto vertical. El aire que sube desde el fondo del conducto se utiliza para transportar los materiales más ligeros hasta lo alto del conducto. Como el flujo de aire ascendente es insuficiente para transportar los materiales más pesados, estos caen al fondo. Se consigue controlar la distribución porcentual entre las fracciones ligeras y pesadas mediante la variación de la tasa de carga de residuos, la tasa de flujo de aire y la sección del conducto.

Tipos de clasificadores neumáticos:

- Clasificador neumático zigzag: está formado por una columna vertical continua con deflectores internos en zigzag por donde sube el aire a una alta velocidad. Los residuos después de ser triturados son introducidos por la parte alta de la columna y posteriormente se introduce por el fondo el aire. En teoría la dirección del flujo en forma de zigzag crea turbulencias en el flujo de aire que a continuación provoca que se volteen los residuos y esta acción hace que los residuos que están pegados se rompan, en la Figura 32 se puede apreciar la dirección y recorrido de los residuos en este equipo.

Figura 32

Clasificador en zigzag

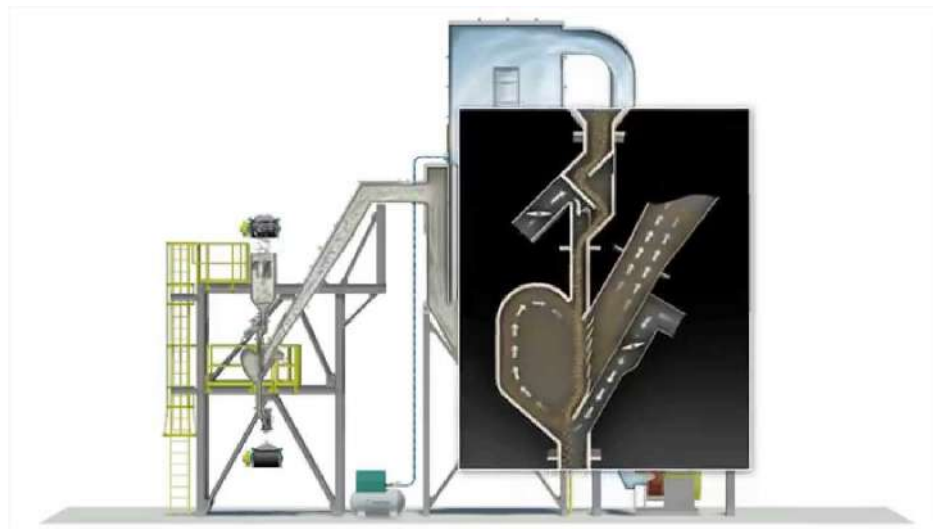


Nota: Figura de CE 275 Windsichtung (p.2), por Gunt Hamburg (2019) (https://www.gunt.de/images/datasheet/24/CE-275-Windsichtung-gunt-24-pdf_1_de-DE.pdf).

- Clasificador neumático de aire pulsado: es un invento reciente que utiliza una velocidad de aire variable en vez de constante. El clasificador de aire con pulsaciones logra una mayor discriminación entre materiales, debido a que la velocidad de la partícula que cae está en función del tiempo hasta que alcanza la velocidad límite. Un clasificador neumático de aire pulsado activo utiliza una sencilla sección recta como en un clasificador neumático convencional. Al variar la velocidad del flujo del aire se consigue el efecto de mantener las partículas cayendo dentro de un rango de velocidad que permite que se puedan separar más completamente las partículas con velocidades límites similares. Un sistema de clasificación completo neumático está formado por una o más transportadora, un clasificador y un ciclón separador. Se necesitan las transportadoras para llevar residuos procesados a la tolva de alimentación y al clasificador neumático. Después el clasificador neumático se utiliza un ciclón separador para separar la fracción ligera del aire portador (Ministerio del Medio Ambiente Colombia, 2002). En la figura 33 se puede observar el recorrido del aire a presión y el recorrido que seguirían los residuos en el equipo.

Figura 33

Clasificador de aire pulsado

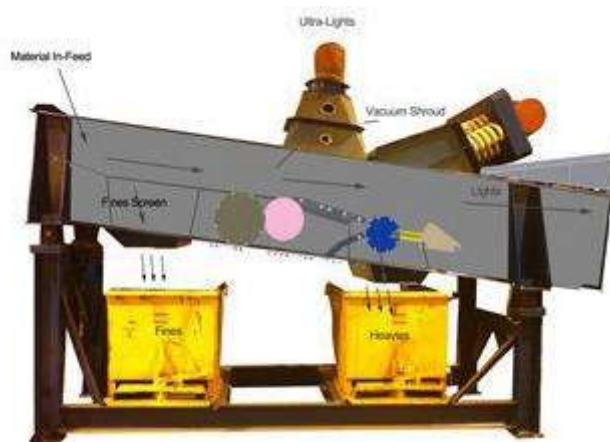


Nota: Figura de Clasificador de Aire Metso, por GECOLSA CAT (2015), (<https://www.youtube.com/watch?v=8jwCS6nLbLo>).

- Stoner: el Stoner se diseñó originalmente para separar piedras y otros rechazos pesados de productos como el trigo. El Stoner básico está constituido por una parrilla la cual es porosa y de mecanismo vibratorio por donde se sopla aire. La parrilla vibra en línea recta en sentido ascendente. Los materiales que se van a separar son alimentados por encima de la parrilla en un punto entre el centro y el tercio más alto de la parrilla. El aire a baja presión que sube por medio de la parrilla fluidiza y estratifica el material que se va a separar según las diferencias en la velocidad límite que desarrollan las partículas. El material ligero que sube por el aire fluidizante, circula hacia abajo mientras que el material más pesado se queda sobre la superficie de la parrilla y asciende por la acción vibratoria de la parrilla. La figura 34 muestra las partes de un equipo Stoner de una cuchilla, se puede apreciar la dirección del flujo de los materiales.

Figura 34

Clasificador Stoner



Nota: Figura de *Clasificador neumático de -Stoner de una sola cuchilla*, por General Kinematics (s.f.), (<https://www.generalkinematics.com/es/producto/destoner-air-classifier-2/>).

Es muy importante al momento de diseñar las instalaciones que se usarán para la separación y clasificación por tamaños o densidad, tener en cuenta las cantidades, volúmenes y composición de los desperdicios que se procesarán; así como las condiciones requeridas para llegar al sitio o proceso posterior, y poder garantizar que sean cumplidas las características de calidad que dan confiabilidad al proceso integral. En los sistemas de clasificación neumática para los residuos sólidos, el diseño se fundamenta en la relación aire/sólidos ($\text{Kg aire} / \text{Kg material residual}$) y la velocidad fluidizante, recomendándose una relación aire/sólido de 2 a 7 (Ministerio del Medio Ambiente Colombia, 2002).

A continuación, se enumeran ciertos factores que se deben considerar en la selección de equipos de separación por densidad:

1. Características del material producido por trituradora u otros dispositivos de separación: tamaño de partícula, forma, peso específico bruto, contenido de humedad, distribución de partícula por tamaño, tendencia al amontonamiento y contenido de fibra.
2. Especificaciones requeridas por los materiales que serán sometidos a la fracción ligera: tamaño de partícula, distribución de partículas por tamaño.
3. Parámetros de diseño para clasificador neumático: relación aire/sólido, velocidades fluidizantes, capacidad de unidad, flujo de aire total y caída de presión.

4. Parámetros de diseño para Stoner: pendiente de lecho, aire fluidizante, aire de escape.
5. Características operacionales: requisitos energéticos, mantenimiento, complejidad de operación ruidos y emisiones atmosféricas.

3.4 Separación por cambio eléctrico y magnético

La separación por cambio eléctrico y magnético, utiliza la carga y permeabilidad de los residuos para separar los metales que son férreos de aquellos que no son férreos, aun cuando también puede separar materiales plásticos del papel y vidrio de material triturado. Es una operación relativamente sencilla de realizar y económica (Ministerio del Medio Ambiente Colombia, 2002).

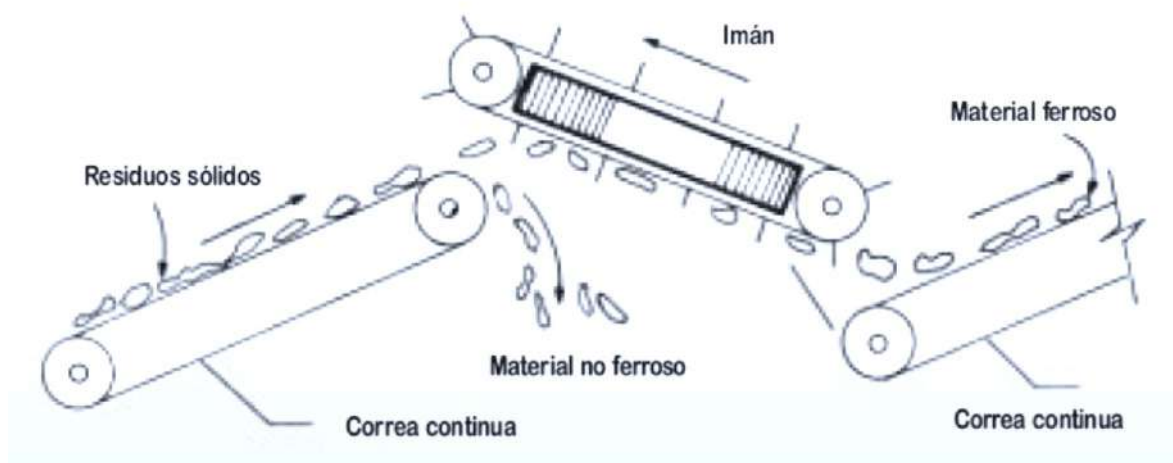
El proceso se fundamenta en el comportamiento de los materiales en un campo magnético, el cual está determinado por la propiedad conocida como Principio de Susceptibilidad Magnética. De acuerdo con dicha propiedad, los materiales pueden ser: a) paramagnéticos, cuando son atraídos a lo largo de las líneas de flujo magnético hacia los puntos de mayor intensidad del campo, y b) los diamagnéticos, que son repelidos hacia los puntos de menor intensidad (Ministerio del Medio Ambiente Colombia, 2002).

Los métodos de separación magnética y por campo eléctrico utilizan las propiedades eléctricas y magnéticas de los materiales residuales, como son la carga eléctrica y la permeabilidad magnética para separar materiales. La separación magnética es la tecnología más comúnmente utilizada para separar metales ferrosos de metales no férreos. La separación electrostática puede utilizarse para separar plástico de papeles, en base a las distintas características de carga superficial de dos materiales (Ministerio del Medio Ambiente Colombia, 2002).

En cuanto a los equipos empleados, pueden ser los de alta y baja intensidad. Los de intensidad alta, son de menor uso que los de baja intensidad por su baja capacidad; se utilizan en seco. Los de baja intensidad, se emplean para materiales ferromagnéticos o paramagnéticos de alta susceptibilidad magnética; se emplean con mayor frecuencia en húmedo que en seco (Ministerio del Medio Ambiente Colombia, 2002). La Figura 35 se puede apreciar el funcionamiento de dichos equipos.

Figura 35

Diseño funcional de separadores magnéticos



Nota: Figura de *Guía para selección de tecnologías de manejo integral de residuos sólidos. Algunas alternativas tecnológicas* (p.5), por Ministerio del Medio Ambiente Colombia (2002), (http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=8409&shelfbrowse_itemnumber=8901).

Las unidades están constituidas por carcasas giratorias, tipo tambor que llevan acoplado los imanes permanentes, montados en la periferia del tambor. Mientras el tambor se somete a un movimiento giratorio, los imanes que permanecen fijos se encargan de atraer el material ferroso. Para obtener un producto más limpio son varios los fabricantes que han desarrollado una línea especial de separadores magnéticos. Estos separadores consisten en unidades tipo cinta transportadora o tipo herradura que atraen las partículas ferrosas hacia un solenoide o ejercen una acción de repulsión, tendiendo a generar un producto más limpio. Se pueden utilizar electroimanes o imanes permanentes en una de sus diversas configuraciones (Ministerio del Medio Ambiente Colombia, 2002).

En sistema de cinta multietapa diseñado para funcionar al final de una transportadora, se emplean tres imanes. El primero se utiliza para atraer el metal, el imán de transferencia se utiliza para llevar el material atraído alrededor de una curva y agitarlo. Cuando el material que fue atraído alcanza una zona donde ya no existe magnetismo, cae libremente y cualquier material no férreo atrapado contra la cinta por el metal no férreo cae también. Entonces el metal férreo es atraído nuevamente a la cinta por el último imán y se descargara a otra transportadora o a contenedores de almacenamiento.

El primer imán es el elemento de recogida y los imanes subsiguientes presentan una disposición secuencial de polo inverso. Como algunos materiales como el estaño pueden magnetizarse debido a este proceso, el polo opuesto se encarga de atraerlos y enviarlos fuera de la cinta transportadora, mientras que los materiales ferrosos sufren una rotación o un giro, debido al cambio de polo magnético, pero continúan adheridos a la cinta transportadora. En algunos casos es dejado un determinado espacio entre el imán de recogida y el imán siguiente para permitir que cualquier objeto arrastrado por los materiales ferrosos caigan fuera de la cinta transportadora (Ministerio del Medio Ambiente Colombia, 2002).

En cuanto a la selección del equipo, es fundamental tomar en cuenta las propiedades de los desperdicios, el producto terminado requerido y las propiedades intrínsecas de los equipos e instalaciones disponibles.

Dentro de los factores que se deben considerar para seleccionar los equipos se pueden mencionar:

1. Características del material que se va a separar: tamaño de partícula, forma, distribución del procesado, contenido en humedad, composición del material.
2. Especificaciones de calidad para los materiales separados: pureza, recuperación, y requisitos de eficacia.
3. Parámetros de diseño del dispositivo: capacidad de la unidad (t/h), requisitos de energía (Voltaje, amperaje), fuerza del imán, fuerza del campo electrostático.
4. Características operacionales: requisitos de energía, mantenimiento, complejidad de operación, ruidos y emisiones atmosféricas.
5. Factores de localización: espacio de suelo, y espacio vertical disponibles, acceso.

3.5 Compactación

La compactación de residuos sólidos es una operación que consiste en reducir el volumen de dichos residuos haciéndolos pasar por una prensa industrial, ejerciendo sobre ellos una presión que hace que adquieran una forma cúbica. Se realiza en unas máquinas que permiten recuperar y dar valor a los residuos, con una capacidad de hasta el 90% de reducción de su volumen. Un factor que debe considerarse para lograr una buena compactación, es que el peso específico bruto final de los residuos compactados depende

del peso específico inicial y de la humedad, por lo que a veces se requiere adicionar agua para facilitar el proceso (Ministerio del Medio Ambiente Colombia, 2002; Vilet, 2021).

Figura 36

Compactador estacionario



Nota: Figura de *Compactador de basura estacionario CS series*, por *Virtual Expo Group* (2022), (<https://www.directindustry.es/prod/bob-sistemi-idraulici-spa/product-164907-1985980.html>).

La compactación también es conocida como densificación y es una operación básica que incrementa la densidad de los materiales residuales para almacenarlos o transportarlos más eficazmente. Son conocidas diversas tecnologías de las que se disponen para la densificación de residuos sólidos y materiales recuperados, incluyendo el empacamiento y la peletización.

De acuerdo con Ministerio del Medio Ambiente Colombia (2002), existen diversos tipos de compactación en función a los volúmenes trabajados. En ese sentido se encuentran:

- ✓ Estacionarios, tal como los que se utilizan en los vehículos para recolectar la basura, donde los residuos son cargados en una compactadora manual. Cuando se llevan residuos y se cargan en una compactadora manual o mecánica es estacionaria (Ver figura 36).

Las compactadoras estacionarias según su aplicación se pueden describir como:

1. De trabajo ligero, como aquellas utilizadas para los RSU ligeros, domésticos y comerciales.
 2. De comercio o industria ligera
 3. De industria pesada
 4. De estación de transferencia. Las cuales se pueden dividir según la presión de compactación en baja presión (menos de 700 KN/m^2) y alta presión (700 KN/m^2 o más)
- ✓ Móviles, los que están dotados de un mecanismo de compactación con ruedas y orugas como los encontrados en un relleno sanitario controlado, son altamente especializados y se emplean cuando se requiere una alta compactación en el sitio. Generalmente se caracterizan por ser equipamientos con ruedas y con orugas utilizado para colocar y compactar residuos sólidos en un vertedero sanitario es clasificado como móvil (Ministerio del Medio Ambiente Colombia, 2002). En la Figura 37 se observa un compactador móvil de uso frecuente en zonas urbanas.
 - ✓ De altas presiones, representado por compactadoras con un mecanismo de empaque que se pueden encontrar en el mercado como compactadoras o prensas embaladoras verticales y horizontales para diferentes tipos de materiales (Ver Figura 38). Así se tienen prensas para papel, prensas para plástico, prensas para biomasa. Las empacadoras son una alternativa al equipamiento de compactación. Operando con una alta presión, normalmente de 700 a 1400 KN/m^2 , producen balas compactadas de residuos sólidos o materiales recuperados relativamente pequeñas. Los tamaños normales de balas varían de $1,20$ a $1,8 \text{ m}$. las balas tendrán un peso que va a depender del material variando desde 500 a 800 Kg para los fardos pequeños y grandes de cartón ondulado (Ministerio del Medio Ambiente Colombia, 2002).

Figura 37

Compactador móvil



Nota: Figura de *Conoce los beneficios de una gestión de RSU responsable*, por ASECA (2020), (<https://aseca.com/conoce-los-beneficios-de-una-gestion-de-rsu-responsable/>).

Figura 38

Compactador de alta presión



Nota: Figura de *Compactador de rodillos de doble tambor de alta presión para granulación de fertilizante compuesto*, por Made in China (2022), (https://es.made-in-china.com/co_fuyimt/product_High-pressure-double-drum-roller-compactor-for-compound-fertilizer-granulation_hnrnhhygg.html).

- ✓ Equipamiento de peletización: la formación de pellets finos y gruesos es una tecnología que puede ser utilizada para producir combustible densificado derivados de residuos para ser quemado en sistemas de incineración, gasificación o pirolisis. Las máquinas utilizadas para producir pellets finos y gruesos funcionan bajo un

principio similar. El papel residual es extraído a través de moldes de extrusión con una rueda extrusora giratoria excéntrica. Un sistema completo de peletización requiere una trituradora, una transportadora y un sistema para controlar la humedad. Los pellets gruesos o finos se aglomeran por el calor causado por la fricción mientras se extruyen. Los pellets gruesos son aproximadamente de 7,5 cm por 2,5 cm². Los pellets finos son cilíndricos y normalmente son de 1,25 a 2 cm de diámetro por 1,25 a 2,5 cm de largo (Ministerio del Medio Ambiente Colombia, 2002). La Figura 39 muestra una línea completa de compactación con peletización.

Figura 39

Compactador de peletizado



Nota: Figura de *Peletizadora con compactadora*, por ACERETECH (s. f.), (<https://www.aceretech.com/webls-tran-c/Cutter-Compactor-Recycling-Pelletizing-System.html>).

En ese sentido, *las prensas para papel* son prensas industriales cuyo funcionamiento está determinado por diversos factores, tales como la humedad, densidad y el flujo másico, es decir, la cantidad de masa o material por unidad de tiempo (Vilet, 2021).

Las prensas para plástico, pueden emplearse para tereftalato de polietileno (PET), polietileno de alta densidad (HDPE), film, plástico rígido o plásticos mezclados (Vilet, 2021). En la Figura 40 se presenta una compactadora o prensa para plástico.

Figura 40

Prensa para plástico



Nota: Figura de *¿Qué es la compactación de residuos y para qué sirve?*, por Vilet (2021), (<https://gtaambiental.com/compactacion-residuos/>).

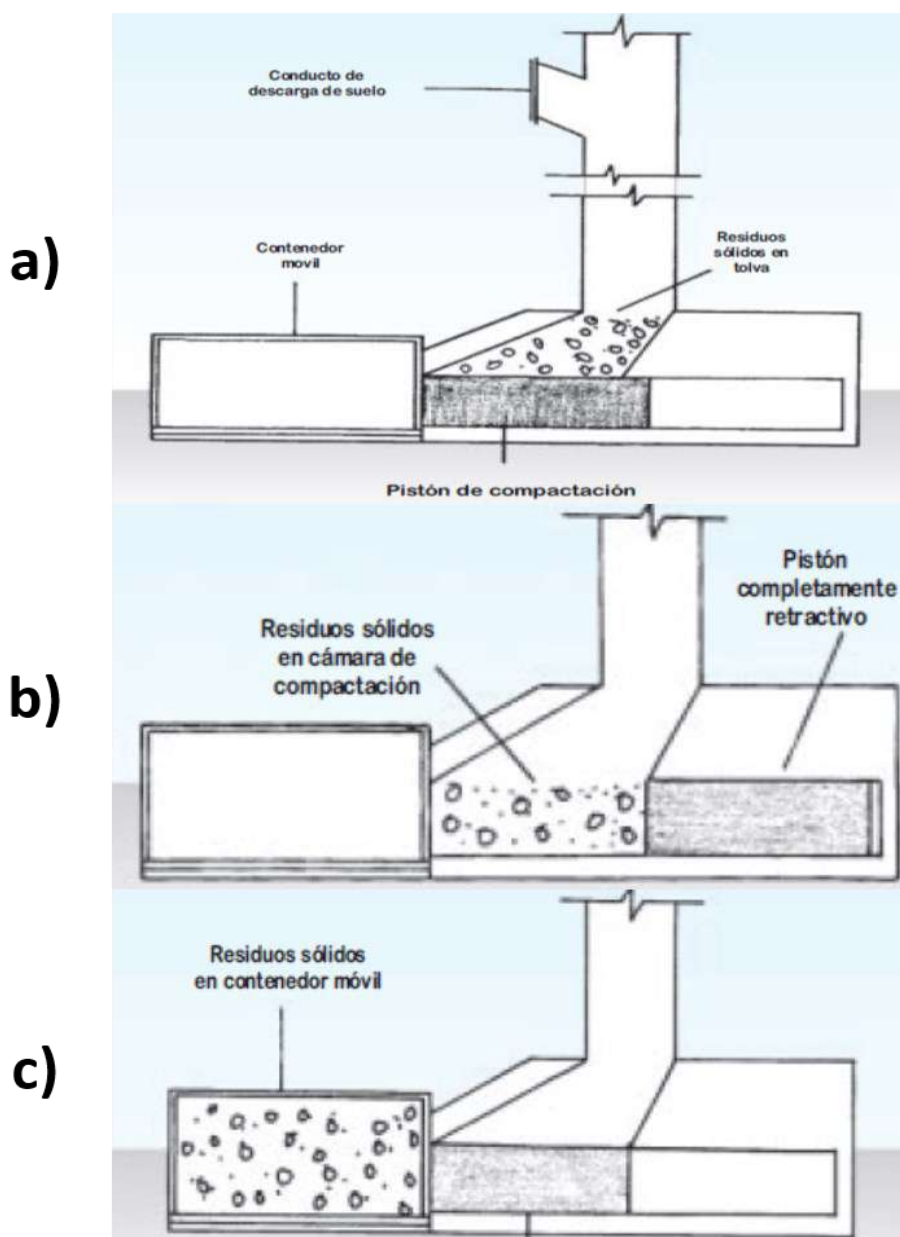
Las *prensas para Biomasa*, permite compactar la biomasa para obtener energía, además de que permite reducir los líquidos contenidos por la misma generando un aumento del poder calorífico (Vilet, 2021).

El diseño de los equipos requeridos depende de las propiedades que tengan los desperdicios (humedad, peso específico, tamaño y tipo de las partículas), composición del material, volúmenes de material a manejar, rendimiento del producto determinado en toneladas por hora (t/h) y de las limitaciones mecánicas de la instalación. En la Figura 11 se muestra un diseño en secuencia del proceso de compactación (Ministerio del Medio Ambiente Colombia, 2002).

En la Figura 41 parte a) se observan los residuos en la tolva antes de ser sometidos a la compresión, en la 41 parte b), los residuos son colocados en la cámara de compactación donde serán comprimidos por el pistón de compactación y en la Figura 41 parte c), el pistón está completamente extendido y los residuos fueron compactados y se encuentran en el contenedor móvil.

Figura 41

Proceso de compactación



Nota: Figura de *Guía para selección de tecnologías de manejo integral de residuos sólidos. Algunas alternativas tecnológicas* (p.5), por Ministerio del Medio Ambiente Colombia (2002), (http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=8409&shelfbrowse_itemnumber=8901).

La compactación de residuos favorece el valor económico, por cuanto contribuye a optimizar el espacio requerido para su manejo y almacenamiento. Por otro lado, facilita el transporte al permitir un mejor uso del espacio, apilamiento, reducción del número de viajes necesarios para mover los residuos de un sitio a otro, lo cual se traduce en la

minimización del gasto en gasolina, reducción de emanaciones de gases que producen el efecto invernadero y menor tiempo invertido en el traslado.

Para Rojo (1988), los factores a considerar en la selección de un equipo de compactación:

1. Finalidad de la densificación: equipamiento de compactación para el procesamiento de RSU, equipamiento de peletización, equipamiento de embalaje para el procesamiento de reciclables.
2. Características del material que va a ser procesado: tamaño de la partícula, forma, distribución de partícula, contenido de humedad, composición del material y peso específico.
3. Parámetros de diseño de equipamiento: capacidad de la unidad (t/h), requisitos energéticos (volta, amperaje, caballos), relación de compactación, peso específico unitario, peso específico bruto y presión de operación.
4. Características operacionales: requisitos de energía, mantenimiento, complejidad de operación, ruidos y emisiones atmosféricas.

Finalmente se puede mencionar que el conocimiento de las propiedades físicas, químicas y biológicas de los residuos sólidos permiten determinar los procesos y equipos requeridos para su procesamiento, los cuales a su vez permitirán un manejo apropiado de los mismos. Antes del procesamiento de estos residuos, es necesario realizar una selección con la intención de separar y clasificar los residuos que son aptos para ser reciclados, la cual puede ser realizada de forma manual, granulométrica y densimétrica.

Los procesos físicos contribuyen a modificar las características físicas de los residuos sólidos y permiten un mejor manejo y traslado de los mismos por medio de la reducción de tamaño, su separación por tipo de material y tamaño y de su compactación. Estos procesos facilitan los procesos posteriores en el procesamiento o transformación de estos residuos, por medio de la utilización de maquinarias diseñadas para tal fin como lo son los molinos, las cribas y las compactadoras, que permiten disminuir el tamaño de los residuos, su selección y compactación para minimizar a su vez los requerimientos de espacio para su almacenamiento y disposición final.

CAPÍTULO 4.

Procesos termoquímicos aplicados en el tratamiento de residuos sólidos

1. Introducción

El incremento desproporcionado en la generación de residuos sólidos originado por el crecimiento acelerado de las ciudades en los países considerados en vías de desarrollo, ha despertado preocupación en el público debido al impacto que ocasionan sobre la salud y el medio ambiente, ya que en la actualidad los desperdicios producidos por aproximadamente 3 mil millones de personas son depositados de forma inadecuada (Wilson et al., 2015).

Actualmente la recuperación de materiales que son reciclables ocupa un porcentaje muy bajo, teniendo como destino final los rellenos sanitarios, lo cual representa una pérdida en la oportunidad de aprovecharlos como insumos en procesos productivos, así como el ocupar más espacio en los rellenos y generar metano por la degradación de los desperdicios.

En este sentido, las comunidades debido a los cambios climáticos y catástrofes naturales que se han experimentado, están adquiriendo conciencia sobre la gestión de los residuos, informándose o recibiendo información y capacitación sobre el aprovechamiento de los mismos, en especial los residuos sólidos urbanos.

El aprovechamiento de los residuos a nivel energético (Waste-to-Energy o WtE), surge como una de las alternativas más atractivas ya que es posible la obtención de un producto para el uso en las mismas comunidades, sin embargo, esto requiere del empleo de tecnologías modernas y por ende de una gran inversión para lograr aprovechar los desperdicios en un menor tiempo y con la menor contaminación posible (Mutz et al., 2017).

Las tecnologías más apropiadas para el aprovechamiento de los residuos suelen presentarse como una opción muy oportuna para resolver los problemas de disposición de los mismos, así como también la escasez de energía eléctrica en algunas ciudades, la escasez de espacios para rellenos sanitarios, y para minimizar las emisiones de gases que producen el efecto invernadero (Wilson et al., 2015).

Cabe destacar que la incorporación de tecnologías de avanzada según Mutz et al. (2017), puede enfrentar ciertos obstáculos, tales como “la falta de sistemas tarifarios para fondear los costos de inversión y de operación, la aplicación insuficiente de la legislación ambiental y el número limitado de personal calificado para la operación eficiente y efectiva de los sistemas instalados” (p. 6).

La gran oposición manifiesta por las comunidades que se encuentran próximas a los rellenos sanitarios y el cierre técnico de algunos han causado que sean valoradas otras opciones de tratamiento de residuos que incorporan estas tecnologías de avanzada, tomado gran auge los tratamientos termoquímicos.

A lo largo del presente CAPÍTULO se estará desarrollando tres grandes tecnologías o procesos alternativos reconocidos a nivel mundial, que son los más apropiados para el aprovechamiento de los desperdicios, tales como: la incineración, la pirolisis y la recuperación de energía, los cuales son tratamientos termoquímicos que presentan ciertas variaciones particulares en sus condiciones de operación además de obtenerse productos finales diferentes. De estas tres tecnologías la incineración ha sido la más utilizada a nivel internacional.

2. Procesos termoquímicos

La preocupación generada por los recursos naturales limitados, además de la gestión incorrecta de residuos que contribuyen a que se incrementen los efectos negativos del calentamiento global y la escasez de fuentes para la generación de energía eléctrica han originado disertaciones sobre el uso de los residuos como un sustrato para la recuperación de energía.

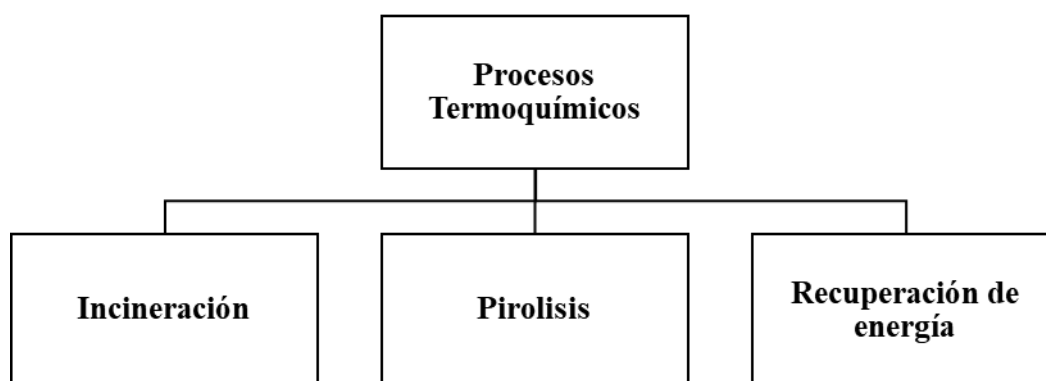
Es en este momento que toma importancia para los principales afectados la implementación de procesos que contribuyan a mejorar el problema antes citado, y donde las tecnologías y los procesos para el aprovechamiento energético de residuos pueden mejorar la gestión de estos.

Los tratamientos termoquímicos son utilizados como complemento y en apoyo para la gestión integral de los residuos sólidos, siendo de gran relevancia la recuperación de estos para la obtención de energía, y entre estos se encuentran como se señaló en párrafos anteriores la incineración, la pirolisis y la recuperación de energía (Figura 42), que permiten el aprovechamiento de los componentes con mayor capacidad calórica entre los que se encuentran los materiales orgánicos como restos de comida en especial aquellos

que contienen bajo porcentaje de humedad, el plástico, el papel, el cartón, entre otros (Wilson et al., 2015).

Figura 42

Procesos termoquímicos aplicados en el tratamiento de residuos sólidos



Nota: Elaboración propia, (2022).

3. Incineración

3.1 Concepto de incineración

La eliminación de residuos sólidos constituye uno de los problemas más graves a los que se enfrentan las zonas urbanas en la actualidad. Uno de los métodos empleados para atenuar estos problemas consiste en someter los residuos sólidos a un proceso de incineración antes de disponerlos en un vertedero.

La incineración forma parte de las tecnologías que conforman la gestión integral de residuos, que puede aplicarse tanto a la fracción rechazada proveniente del reciclaje, como a todos los residuos para cuya disposición final se requiere la reducción de su peligrosidad. En ese sentido, existen instalaciones conocidas como “instalaciones de coincineración”, cuyo combustible habitual o complementario son los residuos, y aun cuando logran su eliminación como consecuencia del tratamiento térmico, su objetivo fundamental es la generación de energía o fabricación de productos materiales (Romero, 2010).

La incineración es la combustión completa de la materia orgánica hasta su conversión en cenizas, utilizada sobre todo en el tratamiento de basura. Es el procesamiento de los residuos sólidos mediante oxidación química en exceso de oxígeno. La incineración utiliza altas temperaturas, una atmosfera oxidante y en ocasiones agitación para destruir

los residuos. Los productos finales son básicamente gases de combustión, efluentes líquidos y cenizas.

Según INCINEROX (2018), es una técnica que permite modificar el tamaño y el peso de los residuos y transformar su composición, mediante un proceso de oxidación a elevada temperatura o combustión controlada, que libera calor, gases y material inerte en forma de ceniza.

Según Romero (2010), el proceso de incineración consiste en una reacción química exotérmica de oxidación entre un combustible y un comburente a elevada temperatura, donde el comportamiento cinético de dicha reacción depende de la heterogeneidad de los residuos y de la evolución de la temperatura.

De acuerdo con Soto (2020) y Romero (2010), por acción del calor, la fracción orgánica de los residuos reacciona con el oxígeno presente en el aire transformándose en dióxido de carbono, agua y algunas nanopartículas y emisiones tóxicas, tales como metales pesados, dioxinas y furanos.

El empleo de la incineración como método para el tratamiento de residuos, inició a comienzos del siglo XX, aun cuando se reseña que el primer incinerador se instaló a finales del siglo XIX en la ciudad de Nottingham, ubicada en la Región de las Tierras Medias Orientales de Inglaterra en el Reino Unido, tomando gran auge a partir de 1921, con la primera instalación en Governors Island en Nueva York (Ambientum, 2022b).

Las condiciones de operación de estas instalaciones eran muy precarias y provocaban la disminución del poder energético de los residuos, lo que condujo al desuso de la incineración para su tratamiento. Sin embargo, como consecuencia de la aparición de nuevas tecnologías de combustión, de depuración de gases y al enriquecimiento en la composición de los residuos desde el punto de vista energético, resurge nuevamente el interés sobre esta técnica por el aumento del poder calorífico de los mismos, siendo actualmente ampliamente utilizada en países como Alemania, Suiza y Japón (Ambientum, 2022b). En un proceso de incineración cuando esta adecuadamente diseñado y operativo se produce la combustión del material combustible presente en los residuos sólidos produciéndose un residuo esencialmente libre de material orgánico.

Los beneficios conseguidos por este proceso incluyen una reducción del volumen de los residuos sólidos, así como una disminución del potencial de contaminación de las aguas subterráneas debido a los residuos orgánicos o peligrosos.

3.2 Naturaleza del combustible

Los residuos sólidos residenciales y de actividades comerciales están compuestos por materiales combustibles, no combustibles y humedad. Los materiales que constituyen los residuos combustibles son en su mayoría desperdicios de papel, junto con cantidades de madera, materiales vegetales y desperdicios de origen animal, tela, cuero, cauchos y plásticos, mientras que la fracción combustible está constituida por metales, vidrios, polvo, piedras y otros materiales.

3.3 Productos de la combustión:

- Gases N, CO₂, y vapor de agua (gases calientes)
- Partículas no combustibles (cenizas)
- Calor

3.4 Tipos de incineración:

Los sistemas de incineración de residuos sólidos pueden diseñarse para operar con dos tipos de combustibles de residuos sólidos: residuos sólidos no seleccionados (quemados en bruto) y residuos sólidos procesados en forma de combustible derivado de residuos (CDR quemado). El tipo predominante son los sistemas de incineración en bruto.

1. Sistemas de incineración de combustión en bruto: en estos sistemas se da un procesamiento mínimo a los residuos antes de colocarlos en la tolva de alimentación del sistema. El operario de la grúa, responsable de cargar la tolva de alimentación, puede rechazar objetos que sean inservibles. Sin embargo, debe suponer que cualquier cosa dentro del flujo de residuos sólidos puede entrar finalmente en el sistema, incluyendo artículos voluminosos demasiado grande y no combustibles e incluso residuos potencialmente peligrosos entregados al sistema a propósito o de forma accidental. Por estas razones el sistema debe diseñarse para manipular estos residuos incómodos sin causar daños al equipamiento o al personal operario. El contenido energético de los residuos quemados en bruto puede ser extremadamente variable según el clima, la estación y el origen de los residuos. A pesar de estas desventajas potenciales, la incineración de quemado en bruto se ha convertido en la tecnología elegida por la

mayoría de los sistemas existentes y en proyecto. Uno de los componentes más cruciales de este sistema son las parrillas. Este sistema de parrillas sirve para diversas funciones, incluyendo el movimiento de los residuos a través del sistema, la mezcla de los residuos, y la inyección de aire para la combustión. Son muchas las variantes posibles de parrillas en base a elementos de alternancia, oscilación y rotativos.

2. Sistemas de incineración alimentados con CDR: en estos sistemas generalmente se quema el CDR sobre una alimentadora de parrilla móvil. La parrilla proporciona una plataforma en la que el CDR puede quemarse teniendo en cuenta la introducción de aire secundario para provocar turbulencias y una combustión uniforme. Los mejores resultados se han obtenido con sistemas de incineración específicamente diseñados para CDR, pero algunas calderas alimentadas con carbón han sido modificadas con éxito para quemar CDR o mezclas de CDR/carbón. Por el mayor contenido energético del CDR comparado con los RSU en bruto, los sistemas de incineración alimentados con CDR pueden ser físicamente más pequeños que los sistemas de combustión en bruto valorados comparativamente.
3. Incineración con lecho fluidizados (ILF): es una alternativa a los sistemas convencionales de incineración. En su forma más sencilla un sistema de ILF consiste en un cilindro vertical de acero, normalmente forrado con refractario, un lecho de arena, una placa rejilla de apoyo y toberas de inyección de aire. Cuando se refuerza el aire hacia arriba a través de las toberas, el lecho se fluidiza y se expande hasta dos veces su volumen de reposo. Se pueden inyectar combustibles sólidos como carbón o CDR en el reactor por encima o por debajo del lecho fluidizado. La acción hirviente del lecho fluidizado provoca turbulencias y favorece la mezcla y transfiere calor al combustible. Cuando se pone en funcionamiento se utiliza combustible auxiliar para subir la temperatura operacional. Después del arranque, normalmente no hace falta combustible auxiliar de hecho, el lecho permanece caliente hasta 24 horas, lo que permite un arranque rápido sin combustible auxiliar. Estos sistemas son bastante versátiles y pueden ser operados sobre una amplia variedad de combustibles, incluyendo RSU, fangos, carbón y numerosos residuos químicos. El material del lecho puede ser

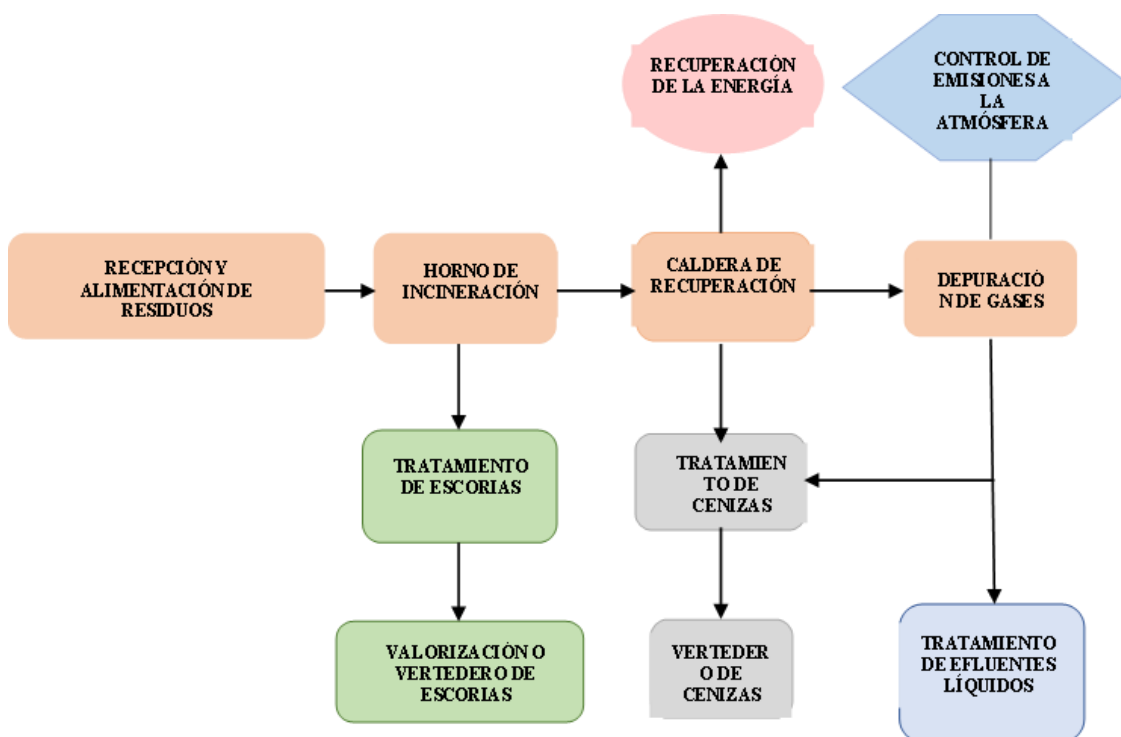
arena o caliza. Cuando se utiliza caliza, esta reacciona con oxígeno y el dióxido de azufre para emitir dióxido de carbono y formar sulfato de calcio, un sólido que se puede separar con la ceniza. El uso de caliza para el material del lecho permite la combustión de carbón con un alto contenido de azufre y tener mínimos emisiones de dióxido de azufre.

3.5 Instalaciones de incineración

Las instalaciones de incineración están conformadas por una serie de elementos que se pueden ver representados en las Figuras 43 y 44.

Figura 43

Elementos que conforman una instalación de incineración



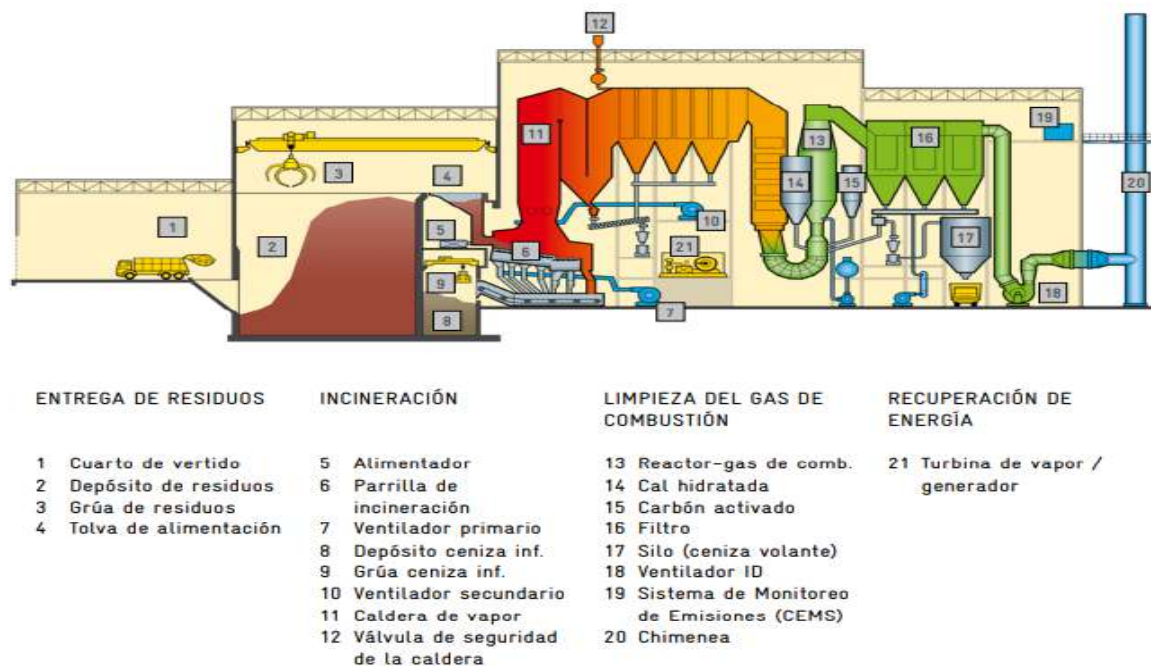
Nota: Figura 1 de *La incineradora de residuos: ¿está justificado el rechazo social?* (p.176), por Romero (2010), Revista Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 104(1) (<https://rac.es/ficheros/doc/00913.pdf>).

Como puede observarse, los elementos fundamentales que conforman una instalación de incineración son: a) el área de recepción y alimentación de residuos, b) el horno de incineración, donde se producen las escorias; c) la caldera de recuperación donde se producen las partículas; d) los filtros donde se encuentran las cenizas, reactivos sin transformar y productos de la depuración de los gases y e) la chimenea por donde sale la corriente gaseosa, una vez depurada, y donde se realizan las mediciones correspondientes para determinar las concentraciones de los principales contaminantes (monóxido de

carbono, hidrocarburos no quemados, óxidos de azufre, metales pesados, compuestos de cloro y de flúor, dioxinas y furanos, identificados estos últimos como los más representativos y peligrosos) y permiten tomar las medidas pertinentes para un adecuado control ambiental del proceso (Romero, 2010).

Figura 44

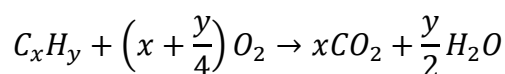
Esquema de un incinerador con elementos para la recuperación de energía



Nota: Figura de *Opciones para el aprovechamiento energético de residuos en la gestión de residuos sólidos urbanos. Guía para los responsables de la toma de decisiones en países en vías de desarrollo y emergentes*, Figura 5 (p.22), por Mutz et al. (2017), GIZ, Eschborn, Alemania (<https://www.giz.de/en/downloads/Guia%20GIZ%202017%20WasteToEnergy%20-%20SP.pdf>).

a) **Área de recepción y alimentación de los residuos:** lo primero que debe hacerse es determinar si los residuos cumplen con las características deseadas para ser incinerados. Estas son:

- ✓ Contenido de materia hidrocarbonada, en virtud a que está directamente relacionado con la reducción de volumen y de masa de los residuos, considerando que, como consecuencia de la combustión, se produce dióxido de carbono y agua, de acuerdo con la siguiente reacción:



- ✓ Poder calorífico (PCI), es el calor de combustión por unidad de masa del combustible. Permite calcular la cantidad de energía que puede obtenerse en el

proceso de incineración. El parámetro es conocido como poder calorífico inferior, PCI, cuando en el proceso de combustión se considera que el agua formada está en fase vapor.

Una vez hecha esta determinación se procede a la recepción y descarga de los residuos en la tolva de almacenamiento y su selección para ser introducidos en el horno de incineración a través de un conducto de alimentación.

b) **Hornos de incineración:** los residuos son introducidos al horno a temperaturas que oscilan desde 850°C hasta 1000°C. La reacción de oxidación durante el proceso de incineración ocurre en varias etapas:

- ✓ Una primera etapa es la del secado o deshidratación, donde el agua que se encuentra atrapada en la estructura de los residuos (ocluida), adsorbida en la superficie o forma parte del mismo, es eliminada. Normalmente esto ocurre cuando la temperatura en todos los puntos del residuo se encuentra a 350°C.

- ✓ Una segunda etapa, entre los 300 y 950°C, donde se produce la descomposición de la materia orgánica, formando productos gaseosos y residuos de naturaleza carbonada. En esos intervalos de temperatura y debido a la presencia de otros productos químicos, se produce la oxidación de los sulfuros entre los 300 y 600°C; y a partir de los 900°C, la de los óxidos de nitrógeno al reaccionar el nitrógeno atmosférico con el oxígeno.

- ✓ Una tercera fase, a partir de los 1000°C, donde se producen las transformaciones físicas o químicas de las cenizas y escorias (sustancias vítreas provenientes de los metales que se funden) formadas a partir de los residuos, durante la incineración. Estas transformaciones son: a) volatilización a partir de los 1000°C, b) la sinterización, es decir, la formación y compactación de los materiales por acción del calor y de la presión a temperaturas por debajo del punto de fusión del componente principal, a temperaturas comprendidas entre 750 y 1000°C, y c) fusión de las escorias por encima de 900°C. En esta etapa es muy importante tener en cuenta que la evolución de las transformaciones depende de tres factores: la composición de las escorias, la temperatura alcanzada y el tiempo de permanencia en el horno (Ministerio del Medio Ambiente Colombia, 2002; Romero, 2010).

Existe un conjunto de requerimientos que deben reunir las instalaciones dedicadas a la incineración, y su cumplimiento determina el tipo de horno que pudiera emplearse (Romero, 2010). Estos son:

- ✓ Deben permitir un adecuado contacto sólido-aire de forma tal de poder garantizar que la temperatura de combustión sea la óptima para la transformación de los reactantes en los productos propios de la reacción.
- ✓ Deben garantizar que el tiempo de permanencia de los sólidos en el horno sea el apropiado, es decir, mayor o igual que el necesario para la conversión completa. Esto conlleva a la obtención de un rendimiento energético elevado, disminución de las posibilidades de generar compuestos mal quemados, disminución de la emisión de contaminantes y facilidad para depurar la corriente de gases que deben ser evacuados.
- ✓ Deben permitir que las cenizas y escorias puedan extraerse continuamente, si es un proceso continuo, o antes de cada operación, si es por cargas, para evitar que la fracción no combustible se acumule en el interior del horno.
- ✓ Deben permitir una adecuada distribución de la temperatura en el horno, para garantizar la ocurrencia de los distintos procesos propios de la combustión y evitar que se produzcan los fenómenos no deseados que causan problemas en la operación.

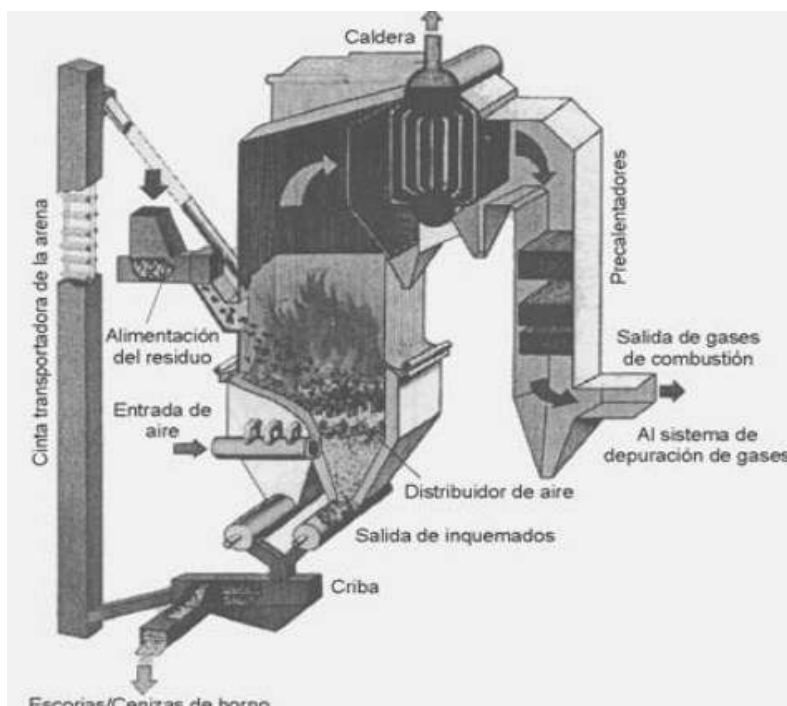
En ese sentido, los hornos que pueden encontrarse para cumplir con los requerimientos especificados pueden ser: a) hornos de base fija o de aire controlado. Sirve para todo tipo de residuos excepto lodos; b) hornos de lecho fluidizado, tal como se muestra en la Figura 45, que mantienen las partículas suspendidas de manera continua a través de aire inyectado a presión; funciona para los residuos de formas regulares y de pequeño tamaño y que no contengan compuestos aromáticos halogenados, y c) hornos rotatorios que por su versatilidad funcionan para diferentes tipos de residuos. Todos los hornos tienen ventajas y desventajas; todo dependerá del tipo de residuo a tratar, el tamaño de la instalación y de la legislación aplicable (Ministerio del Medio Ambiente Colombia, 2002; Romero, 2010).

Desde el punto de vista tecnológico, según Ministerio del Medio Ambiente Colombia (2002), el horno rotatorio es el más recomendable por su accesibilidad al

nivel de desarrollo ingenieril y versatilidad de uso para residuos de diferente composición, lo que lo hace ser de fácil mantenibilidad (referida a la facilidad para conservar y restaurar el equipo y a la facilidad para encontrar los repuestos requeridos).

Figura 45

Horno de lecho fluidizado circulante y caldera de recuperación del calor de combustión para obtener vapor



Nota: Figura de *La incineradora de residuos: ¿está justificado el rechazo social?*, figura 3 (p.181), por Romero (2010), *Revista Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 104(1) (<https://rac.es/ficheros/doc/00913.pdf>).

Según Romero (2010), los factores que se consideran más importantes para determinar el comportamiento de los hornos de incineración son:

- ✓ Calidad de la incineración, establecida como la fracción de compuestos inquemados en los gases y en las escorias y cenizas de hogar.
- ✓ Adaptación al poder calorífico, humedad y contenido en cenizas del residuo.
- ✓ Facilidad de operación: elementos móviles, puesta en marcha y parada, paredes del horno.
- ✓ Prevención y retención en origen de contaminantes, tales como los óxidos de nitrógeno, introducción de reactivos.

- ✓ Consumo energético, establecida con base en las necesidades energéticas para su funcionamiento.
 - ✓ Contaminantes en la corriente de gases de escape, las técnicas de depuración y el sistema de recuperación de energía.
- c) **Caldera de enfriamiento de gases y recuperación de energía:** tal como se observa en la Figura 43, en el horno se generan los gases de combustión los cuales pasan por una caldera o intercambiador de calor, generando, por las altas temperaturas que alcanzan, vapor a alta presión. Dicho vapor puede hacerse pasar por una turbina de vapor para obtener energía o, en algunos casos, para calentar agua. Cuando el poder calorífico de los residuos es superior a 13 MJ/Kg (mega joule por kilogramo), se obtiene un rendimiento energético estimado entre un 20 y 30% (Romero, 2010).
- d) **Equipos para la depuración de los gases de combustión:** la principal fuente de contaminación de las instalaciones incineradoras la constituyen las emisiones gaseosas. Dichas emisiones están representadas por los agentes contaminantes presentes en los gases de combustión, como son algunos compuestos de cloro, flúor, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, ciertas sustancias orgánicas, partículas y las dioxinas y furanos, siendo estos dos últimos los de mayor peligrosidad. Cada país establece sus normativas para controlar el proceso de incineración. Estas varían con el tiempo y tipo de residuo.

Las dioxinas y furanos son compuestos clorados de la dibenzoparadioxina y del dibenzofurano, cuyas características los hacen considerar de alta peligrosidad. Entre dichas características están: a) su carácter bioacumulable, es decir, son compuestos cancerígenos, más solubles en las grasas que en el agua, que se acumulan en los alimentos que consume el ser humano, además de que, según ELIKA (2021), afectan principalmente el sistema nervioso, siendo el grupo más vulnerable el de los recién nacidos; b) son refractarios, es decir, son estables a temperaturas tan elevadas como los 600°C, y c) son persistentes ya que no se destruyen significativamente en las condiciones ambientales (Romero, 2010).

En virtud a que estos compuestos tóxicos una vez acumulados en los alimentos no pueden eliminarse, la única forma de evitar su exposición al ser humano es reduciéndolos en el origen, es decir, minimizando su presencia en el medio ambiente a través del establecimiento de estrictos controles de los procesos industriales que los originan (Romero, 2010).

3.6 Técnicas para la retención o transformación de contaminantes

Es fundamental que las incineradoras establezcan técnicas para la retención o transformación de los contaminantes generados durante el proceso de incineración, de forma tal de cumplir con los límites establecidos por la legislación del país del que se trate, los cuales son cada vez más bajos de acuerdo con el peligro potencial de cada uno de estos contaminantes.

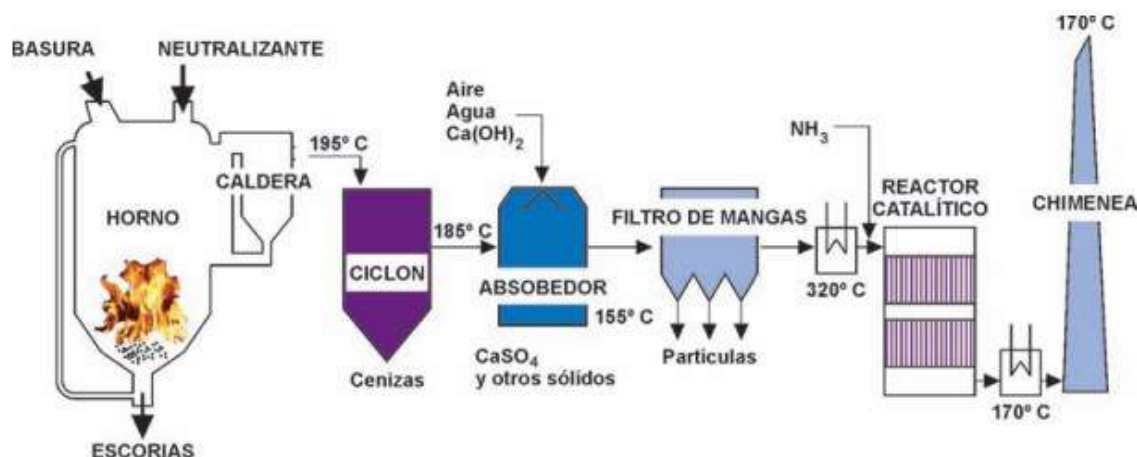
En ese sentido, sostiene Romero (2010), existen diversas técnicas que pueden emplearse, dependiendo del objetivo, del tipo de contaminante sobre el que se quiere actuar y del modo de acción. En función de ello, se han establecido cuatro (4) técnicas de depuración, según Romero (2010): a) Técnicas de retención de partículas, b) métodos para retener compuestos ácidos, c) métodos de retención sobre adsorbente, y d) métodos para transformar los compuestos en N_2 , CO_2 y H_2O . Un sistema de depuración apropiado, dependerá de una adecuada selección y combinación de estas técnicas. En la Figura 16 se puede observar una incineradora con distintos equipos de depuración.

a) Las técnicas de retención de partículas más empleadas son: los ciclones, los precipitadores electrostáticos, filtros de manga y filtros cerámicos. La eficacia de estos equipos varía con el tamaño de las partículas que se desean retener. La elección de una técnica o mezcla de ellas, dependerá del nivel de depuración deseado, del tipo de incinerador utilizado en el tratamiento de los residuos, de las características de los residuos, de las condiciones de operación del horno y de las propiedades de la corriente de gases generados; mientras que la cantidad de partículas dependerá de la velocidad de los gases que están en contacto con el sólido del horno, del tamaño y densidad de las partículas y de la composición de

los reactivos y alimentación que se empleen para retener a los contaminantes (Romero, 2010).

Figura 46

Incineradora con distintos equipos de depuración



Nota: Figura de *La incineradora de residuos: ¿está justificado el rechazo social?*, figura 5 (p.185), por Romero (2010), *Revista Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 104(1) (<https://rac.es/ficheros/doc/00913.pdf>).

- b) Los métodos para la retención de compuestos ácidos contenidos en la corriente de gases, dióxido de azufre, cloruro de hidrógeno y fluoruro de hidrógeno, se basan en la reacción de estos compuestos con otro compuesto básico, pudiendo efectuarse en fase sólida, líquida o en ambas simultáneamente.

En fase sólida es un proceso lento. Se introducen los reactivos sólidos básicos en la corriente de gases para lograr su neutralización. El tiempo de contacto no debe ser excesivamente prolongado ya que se requerirían instalaciones de gran tamaño, lo cual lo haría técnicamente inviable. Debido a ello, debe garantizarse el empleo de materiales con la granulometría y reactividad apropiada. Como producto resultante de la reacción de neutralización se obtienen sales, completamente secas y estables químicamente, lo cual facilita su posterior eliminación. Es un método poco eficiente y con bajo rendimiento del reactivo básico, por lo que su empleo es limitado, aun cuando a pequeña escala pueden obviarse dichas limitaciones (Romero, 2010).

En fase húmeda, las reacciones de neutralización son más rápidas y eficientes. Se ponen en contacto la corriente de gases con soluciones acuosas de reactivos

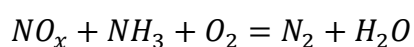
básicos, tales como el hidróxido de sodio y de calcio, en torres diseñadas para tal fin. Otra de sus bondades es que el producto de las reacciones puede fraccionarse para ser reutilizado. El principal inconveniente de este método, es la necesidad de depurar las aguas contaminadas que se producen. A pesar de este inconveniente, es uno de los métodos más utilizados, quizás porque fue el primer sistema de depuración que se empleó porque es sencillo, efectivo, de bajo costo y produce un efecto sinérgico de retención de otras partículas contaminantes, óxidos de nitrógeno, dioxinas y furanos (Romero, 2010).

Con relación a los procedimientos que se efectúan en la fase sólida y húmeda simultáneamente o *semisecos*, conocidos como métodos o técnicas de absorción por rociado, la corriente de gases se pone en contacto con un agente neutralizante en forma de lechada el cual contiene un reactivo básico, tal como la cal. A través de unos inyectores, se rocía la lechada sobre la corriente de gases, en forma de una nube de gotas finas. La neutralización y la evaporación del agua presente en la lechada ocurren simultáneamente. Esto provoca, por un lado, el aumento del contenido de humedad de la corriente de gases y una disminución de su temperatura, lo cual viabiliza el contacto del absorbente con los gases facilitando la absorción de los gases ácidos, y, por otro lado, al evaporarse el agua se forman sólidos secos que son eliminados en equipos de retención de partículas. Los porcentajes de retenciones por esta técnica son distintos para los diferentes compuestos, pudiendo estar en valores de 95% para el ácido clorhídrico (HCl) y para el fluoruro de hidrógeno (HF) y de 75% para el dióxido de azufre (SO₂) (Romero, 2010).

- c) El método de retención sobre adsorbente se emplea básicamente para la retención de dioxinas, las cuales se encuentran en pequeñas concentraciones. El adsorbente más utilizado es el carbón activado, el que por sus propiedades adsorbe también otros contaminantes como el mercurio, que puede encontrarse en la corriente de gases. El adsorbente debe tener una distribución de tamaño de poro que se adapte bien al gran tamaño de las moléculas de dioxinas. La técnica más empleada es la inyección en polvo del adsorbente, conocido como método de corriente volante y consiste en retener las partículas inyectadas a través del uso de filtros de mangas

o filtro cerámico, lo cual permite aumentar el tiempo de contacto entre los gases y el carbón (Romero, 2010).

- d) En los métodos para transformar los compuestos en N_2 , CO_2 y H_2O , se emplean procedimientos catalíticos para disminuir los niveles de emisión de óxido de nitrógeno. Uno de estos procesos catalíticos es conocido como “Reducción catalítica selectiva” – SCR- y consiste en la transformación del óxido de nitrógeno en nitrógeno y agua al reaccionar con el amoníaco, en presencia del oxígeno, a temperaturas que oscilan entre 240 y 300°C, según la siguiente ecuación estequiométrica:



Los catalizadores empleados facilitan la destrucción de las dioxinas y furanos, siempre que se incorporen materiales que viabilicen la oxidación. Una de las ventajas de este método es que, al no utilizarse carbón activado como si lo hace el método anterior, las dioxinas no se incorporan a las cenizas retenidas en los filtros y no hay consumo de adsorbentes, lo que lo hace más económico (Romero, 2010).

3.7 Ventajas y desventajas de la incineración

Respecto a las ventajas y desventajas de la incineración, Ministerio del Medio Ambiente Colombia (2002) considera lo siguiente:

Ventajas:

- ✓ Reduce el volumen de los residuos hasta en un 90%
- ✓ Posibilita la recuperación de energía en forma de calor
- ✓ No se requiere combustible auxiliar cuando solo se desea reducir el volumen de los residuos
- ✓ Requiere relativo poco espacio, en relación con el requerido para un relleno sanitario
- ✓ Es la mejor opción para tratar residuos altamente tóxicos, persistentes e inflamables

Desventajas:

- ✓ Exigen equipos especiales para el control de las emisiones, en función al tipo y toxicidad de los residuos
- ✓ Altos costos de adquisición y operación
- ✓ Altas tarifas de manejo
- ✓ Presenta restricciones en cuanto a la localización, según las normas ambientales

- ✓ Si su objeto es la producción de vapor de agua o el contenido de residuos es insuficiente, se requiere un combustible complementario, casi siempre gas.
- ✓ Deben cumplir con los estándares de emisiones fijados y con los requerimientos de permisos expedidos
- ✓ El vertido de aguas y efluentes son un problema, así como lo es la descarga de cenizas
- ✓ Presenta dificultad para extraer las partículas finas tóxicas emitidas a la atmósfera.

3.8 Criterios de diseño de los sistemas de incineración

- ✓ Tamaño del residuo
- ✓ Naturaleza del residuo
- ✓ Estado del residuo
- ✓ Naturaleza de la combustión
- ✓ Posibilidad de recuperación de energía del residuo.

En cuanto a las experiencias de países con el uso de esta tecnología, Brasil, EEUU y Japón son los países donde la incineración es el método más utilizado para el tratamiento final de los residuos (Ministerio del Medio Ambiente Colombia, 2002).

A nivel de Latinoamérica este proceso lo realizan en Panamá, Chile, Costa Rica, Guatemala, Perú y Ecuador. Específicamente en Chile la empresa Hidronor realiza el tratamiento y eliminación de los compuestos orgánicos persistentes tales como pesticidas, residuos halogenados, Bifenilos policlorados, gases refrigerantes, entre otros, utilizando la incineración a altas temperaturas con el control de gases que garantizan la eliminación de los compuestos persistentes para posteriormente tener como disposición final su exportación a Europa donde están ubicados establecimientos de tratamiento y eliminación los cuales se rigen por estándares de calidad además de poseer tecnologías de avanzada (Hidronor, 2021).

4. Pirólisis

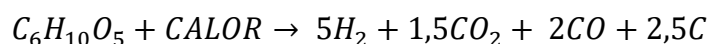
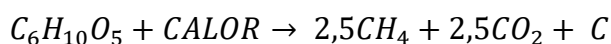
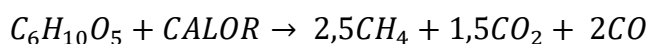
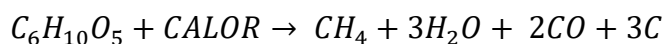
4.1 Concepto de pirolisis

Se conoce como pirólisis, a veces también llamada termólisis, al procesamiento termoquímico de residuos que provoca la degradación química de la biomasa en ausencia del oxígeno, empleando una fuente de combustible. En el caso específico de la pirólisis de los residuos, si se encuentran pequeñas concentraciones de oxígeno, ya sea como parte

del que se encuentra atrapado dentro de los residuos, o incluso en sistemas al vacío en los que se elimina el aire o en la composición química de los propios residuos, como es el caso de la celulosa (Ministerio del Medio Ambiente Colombia, 2002; Salud Sin Daño, 2022).

La pirólisis no es una tecnología nueva. Su uso más antiguo tal vez se remonta al craqueo térmico del petróleo crudo en 1913, siendo utilizada también para la producción de químicos como el cloruro de vinilo en los años 60, para la producción de carbón vegetal por medio del uso de las retortas, estando actualmente en desuso por haber sido sustituida por tecnologías más económicas. Se usan sistemas de pirolisis y gasificación para convertir los residuos sólidos en combustibles gaseosos, líquidos y sólidos. La diferencia principal entre los dos sistemas consiste en que los sistemas de pirolisis utilizan una fuente de combustible externa para conducir las reacciones endotérmicas de pirolisis en un ambiente libre de oxígeno, mientras que los sistemas de gasificación se sostienen sin aportes externos y usan aire u oxígeno para la combustión parcial de los residuos sólidos.

Según Salud Sin Daño (2022), no existe una única reacción de la pirólisis; son muchas reacciones que se producen simultáneamente o en secuencia. Tomando como ejemplo la celulosa, las reacciones de la pirólisis son, entre otras:



Como se desprende de las ecuaciones mostradas, la pirólisis es una reacción endotérmica, es decir, no genera calor, sino que lo requiere para que las reacciones sean sostenidas. Se generan tres fracciones de componentes: una corriente de gases que contiene, entre otros, hidrógeno, metano, monóxido de carbono; una corriente líquida que contiene alquitrán o aceite y una fracción sólida (cenizas) –coque- que es carbono casi puro (Ministerio del Medio Ambiente Colombia, 2002; Salud Sin Daño, 2022).

4.2 Descripción del proceso

Como la mayoría de las sustancias orgánicas son térmicamente inestables se pueden romper con un calentamiento en un ambiente libre de oxígeno, mediante una combinación de desintegración térmica y reacciones de condensación en fracciones gaseosas, líquidas

y sólidas. Pirolisis es el término utilizado para describir este proceso. Al contrario de los procesos de combustión y gasificación que son extremadamente exotérmicos, el proceso de pirolisis es altamente endotérmico, requiriendo una fuente de calor externa. Por esta razón a menudo se utiliza el termino destilación destructiva como termino alternativo a pirolisis.

Las tres fracciones de componentes más importantes producidas mediante pirolisis son las siguientes:

1. Una corriente de gas que contienen principalmente hidrogeno, metano, monóxido de carbono y diversos gases, según las características del material que es pirolizado.
2. Una fracción liquida que consiste en un flujo de alquitrán o aceite que contienen ácido acético, acetona, metanol e hidrocarburos oxigenados complejos. Con un procesamiento adicional, la fracción liquida puede utilizarse como aceite combustible sintético sustituyendo al aceite combustible convencional.
3. Coque inferior que consiste en carbono casi puro más cualquier material inerte originalmente presente en los residuos sólidos.

4.3 Tipos de pirolisis

Según el Centro Europeo de Postgrado y Salud Sin Daño (2022), existen diversos tipos de pirólisis según la temperatura y tiempo de contacto: a) la pirólisis rápida o pirólisis fast, b) la pirólisis convencional y c) pirólisis flash o instantáneas. Al respecto:

- a) La pirólisis rápida puede realizarse a temperaturas relativamente bajas, entre 400 y 500°C, por periodos breves. Se emplea para la biomasa y otras aplicaciones. conocida como fast pirólisis. Se incluyen los sistemas de polvo en suspensión.
- b) La pirólisis convencional se emplean equipos rotatorios o de lecho móvil e incluso horno de parrilla. Se realiza a temperatura y velocidad de calentamiento bajas.
- c) La pirólisis instantánea o pirólisis flash es la que ocurre a temperaturas y velocidad de calentamiento altas.

Por su parte, Portillo (s. f.) reseña que la pirólisis puede ser acuosa y al vacío, dependiendo de las condiciones físicas en las que se lleve a cabo. La acuosa, ocurre en presencia de agua, como el craqueo al vapor de aceites o la despolimerización térmica de

residuos orgánicos en crudos pesados; y al vacío, consiste en el calentamiento de compuestos orgánicos al vacío. Su objetivo es disminuir los puntos de ebullición y evitar reacciones químicas desfavorables.

Sostiene Portillo (s. f.) que el proceso se divide en tres etapas. Estas son:

- ✓ Ruptura de enlaces por efecto de las altas temperaturas y liberación de gases atrapados en el carbón. Esto conlleva a la descomposición lenta de los compuestos orgánicos con producción de pequeñas cantidades de agua, óxidos de carbono, hidrógeno y metano.
- ✓ Descomposición térmica activa. En esta etapa la temperatura oscila entre 360 y 560°C, provocando la fragmentación de las moléculas de carbono formando hidrocarburos condensables y alquitranes.
- ✓ Desaparición paulatina del hidrógeno y otros heteroátomos por efecto de la temperatura, la cual alcanza valores superiores a los 600°C.

Por otra parte, existen dos tipos de pirólisis: la oxidativa y la seca. La pirólisis oxidativa, comprende la descomposición térmica de los desechos industriales durante su combustión parcial o contacto directo con los productos de combustión. Tiene gran versatilidad por cuanto es aplicable a diferentes tipos de desechos, incluso aquellos que contienen metales y sus sales, que se funden y se encienden a temperaturas normales de combustión, neumáticos de desecho, cables en estado triturado, chatarra de automóviles.

Con relación a la pirólisis seca, es un proceso de descomposición térmica sin oxígeno. El resultado es un gas con un alto poder calorífico, un producto líquido y un residuo carbonoso sólido. Dependiendo de las condiciones térmicas en las que ocurre, se distinguen los siguientes tipos:

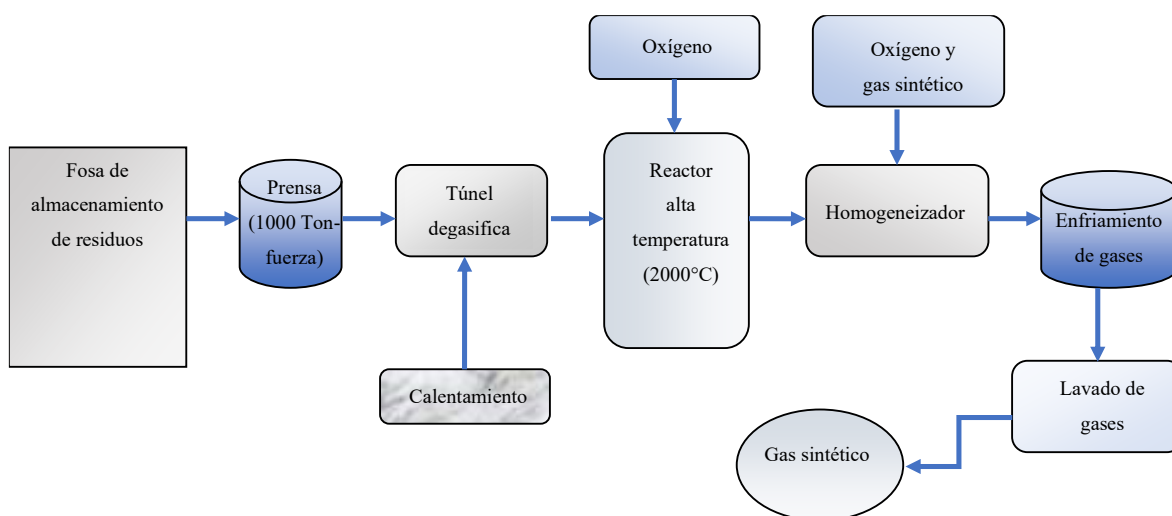
- ✓ Pirólisis a bajas temperaturas, en el rango de 450 y 550°C. Presenta un buen rendimiento de residuos líquidos y sólidos y un rendimiento mínimo de gases con un calor máximo de combustión. Es muy útil para la producción de resina, valioso combustible líquido.
- ✓ Pirólisis a temperatura media, alcanzando hasta 800°C. Produce más gas con menos calor de combustión y menos residuos líquidos y coque.
- ✓ Pirólisis a muy altas temperaturas, en el rango de 900 a 1050°C. Presenta un mínimo rendimiento de productos líquidos y sólidos y una producción máxima de gas con un

poder calorífico mínimo. El combustible es de alta calidad y muy adecuado para el transporte de larga distancia.

Respecto a los equipos empleados, en la Figura 47 se esquematiza el proceso de pirólisis, donde se muestran los mismos, según (Ministerio del Medio Ambiente Colombia, 2002).

Figura 47

Proceso de pirólisis



Nota: Figura de *Guía para selección de tecnologías de manejo integral de residuos sólidos. Algunas alternativas tecnológicas* (p.5), por Ministerio del Medio Ambiente Colombia (2002), (http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=8409&shelfbrowse_itemnumber=8901).

Tal como se observa en la Figura 47, los residuos se almacenan en la *fosa de almacenamiento* y de allí son llevados a una *prensa mecánica* para reducir su volumen y facilitar su manejo. Esto conlleva a la extracción de componentes líquidos y gaseosos y se eliminan las porosidades de los componentes orgánicos, disminuyendo la cantidad de oxígeno y nitrógeno. Posteriormente, se hacen pasar por un *túnel de degasificación*, donde mediante un calentamiento externo se lleva la temperatura a 600°C aproximadamente para, en ausencia del oxígeno, carbonizar los compuestos orgánicos. Una vez desprovistos de los compuestos orgánicos, los residuos pasan a un *reactor de alta temperatura*, más o menos 2000°C, y mediante la inyección dosificada de oxígeno puro, los metales y minerales se funden, mientras que los componentes carbonados e hidrogenados se combinan formando moléculas pequeñas de hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono y vapor de agua, mientras que las moléculas que contienen flúor y cloro son destruidas (Ministerio del Medio Ambiente Colombia, 2002).

Los metales y minerales una vez fundidos pasan a un *homogeneizador*, donde se les adiciona oxígeno y gas sintético para transformarlos en materia prima inerte. Los metales se separan, se enfrían y pueden ser reutilizados. Los gases son enviados a un intercambiador de calor donde son enfriados rápidamente para evitar la formación de dioxinas y furanos. El gas sintético se lava para extraerle los componentes tóxicos, obteniéndose un gas sintético puro que puede emplearse para procesos químicos o para producir energía (Ministerio del Medio Ambiente Colombia, 2002).

4.4 Ventajas y desventajas de la pirolisis

Entre las ventajas de este proceso están:

- ✓ Posibilidad de tratar todo tipo de residuos industriales, domésticos y tóxicos
- ✓ No produce emisiones gaseosas contaminantes, ni cenizas o partículas volátiles;
- ✓ Los residuos sólidos no requieren disposición final, el gas sintético generado tiene distintas aplicaciones (Ministerio del Medio Ambiente Colombia, 2002).

Entre las desventajas se pueden señalar:

- ✓ Es una tecnología en desarrollo, la cantidad de residuos generados es mayor a la obtenida en un incinerador
- ✓ Empleo de equipos sofisticados
- ✓ Altos requerimientos técnicos y físicos,
- ✓ Altos costos de mantenimiento, de construcción y de operación (Ministerio del Medio Ambiente Colombia, 2002).

4.5 Aplicaciones de la pirolisis en America latina y a nivel mundial

La pirólisis se considera una de las alternativas técnicamente y financieramente viables respecto a la incineración de desperdicios siendo etiquetada con la calidad de tecnologías no contaminante, caso contrario a la incineración. Actualmente, según Mutz et al. (2017), no existen plantas que estén operando a gran escala para el tratamiento de RSU en América Latina, Europa o África, existiendo unas pocas en Asia y EUA las cuales operan como un complemento de un sistema más complejo de gestión de RSU, o para el tratamiento de desperdicios específicos. También es considerada una tecnología de difícil implementación a gran escala debido a su complejidad operativa y tecnológica, el

requerimiento de sustratos con especificaciones rigurosas o con necesidades altamente específicas y los costos iniciales de inversión muy elevados.

Este proceso se utiliza como una opción para el tratamiento final de flujos de residuos específicos, como residuos clínicos, suelos contaminados o residuos peligrosos industriales/y comerciales. No es recomendado para el tratamiento de desperdicios urbanos que se encuentren mezclados (Mutz et al., 2017).

Los países que según Ministerio del Medio Ambiente Colombia (2002) tienen más experiencia en el empleo de esta tecnología son EEUU, Argentina y España. En América Latina entre los países que utilizan este proceso en la recuperación de desperdicios se encuentran Canadá, Costa Rica, México, Argentina, Chile, Brasil, Dominica, Panamá, Paraguay y República Dominicana.

En México se utiliza este proceso termoquímico en la empresa Agrolásticos Procesos y Recuperación S. A de C. V., donde trabajan con la implementación de su modelo Bioindustrias, por medio del cual se desarrollan proyectos ambientales sostenibles enfocados en los desperdicios que genera la agroindustria, con la intención de aprovecharlos para satisfacer necesidades de insumos en los sectores agrícola, agroindustrial y energético. En esta empresa utilizan el proceso de pirolisis para la recuperación de los desperdicios plásticos, a través del cual obtienen combustóleo con la utilización de un horno de flujo continuo con el que se vaporizan los polímeros. Este producto obtenido (combustóleo) se somete posteriormente a procesos de refinación por temperatura y presión, y de destilación con catalizadores obteniéndose posteriormente solventes y combustibles de calidad (Plastics Technology México, 2021).

5. Recuperación de energía

5.1 Concepto de recuperación de energía

Aproximadamente el 15% de todos los residuos que se tratan a nivel mundial se incineran con recuperación de energía (United Nations Environment Programme, 2019). La mayoría de las instalaciones de recuperación de energía se encuentran en la actualidad en países desarrollados, pero muchos países en desarrollo están interesados en esta estrategia de gestión de los residuos sólidos debido al potencial que posee de eliminar grandes cantidades de residuos que de otro modo no serían reciclables. Además, estas instalaciones pueden generar una fuente alternativa de energía y preservar espacio en el

vertedero sanitario. Sin embargo, existen muchos desafíos asociados con el desarrollo y la operación exitosa de un proyecto de recuperación energética, y se alienta a las ciudades a considerar cuidadosamente si la recuperación energética es la opción correcta para su situación y sus necesidades específicas.

Los proyectos de recuperación energética pueden ayudar a eliminar los materiales de residuo que, de otro modo, no serían reciclables, a la vez que proporcionan una fuente de energía que se puede utilizar en una variedad de aplicaciones, incluida la calefacción y refrigeración urbana. Además, los proyectos de recuperación energética pueden ayudar a reducir el volumen de los residuos enviados a los sitios de eliminación, una ventaja particularmente atractiva en lugares que tienen una capacidad limitada de sus vertederos o basurales. Los proyectos de residuos a energía (WtE, Waste to Energy) (o “energía a partir de residuos”) también pueden mejorar la salud pública y la seguridad al eliminar los desperdicios de los vertederos abiertos (United Nations Environment Programme, 2019). Dicho esto, contar con marcos normativos y ambientales (p. ej., tecnologías de control de emisiones) para garantizar que los proyectos de WtE no agraven las preocupaciones locales sobre la calidad del aire es fundamental para el éxito de los proyectos en el logro de los objetivos ambientales y de salud.

Una vez que los RSU han sido convertidos en energía térmica en forma de vapor mediante la incineración o en energía química en forma de gases o líquidos mediante la pirólisis o la gasificación, se pueden convertir en energía mecánica o eléctrica. El vapor puede utilizarse para la producción de energía mecánica o eléctrica mediante una turbina de vapor. Los gases y líquidos producidos a partir de RSU mediante procesos biológicos y térmicos pueden emplearse para alimentar calderas de producción de vapor. Los gases y líquidos pueden utilizarse también para alimentar motores recíprocos y turbinas gas.

La recuperación energética es un proceso que emplea a los residuos como combustible, para generar energía eléctrica y calefacción a través de la combustión con tecnología limpia, filtrando los gases y cumpliendo las normas ambientales de emisiones gaseosas (ECOPLAS, 2020).

El aprovechamiento energético de los residuos no puede ser visto como algo fácil, debido a su dependencia de múltiples factores, tales como: las características físicas, químicas y biológicas de los mismos residuos; la alta complejidad de las diferentes tecnologías, las condiciones locales y legales de cada locación; las implicaciones

ambientales de cada tecnología, es decir, su impacto sobre el ambiente, entre otros (Mutz et al., 2017).

5.2 Tipos de recuperación de energía

Además de los procesos explicados anteriormente, incineración y pirólisis, existen otras tecnologías para el tratamiento de los residuos sólidos orgánicos para la generación de energía, como son la ruta microbiológica y tecnologías de conversión termoquímica como la gasificación y las basadas en plasma. En las rutas biológicas se genera el biogás mediante la digestión anaerobia, proceso que será ampliamente explicado posteriormente. La gasificación y las tecnologías basadas en el plasma, son tecnologías de conversión termoquímica que también se usan en el tratamiento de los residuos para la obtención de energía eléctrica, calor o ambas a la vez, y otros productos como algunos materiales para la construcción (Escobar et al., 2012).

Como se mencionó anteriormente la recuperación energética es la conversión de materiales no reciclables en calor, electricidad o combustible utilizables, a través de una variedad de procesos. Esta conversión puede lograrse a través de una variedad de procesos que incluyen (Mutz et al. 2017):

1. Combustión: la combustión o incineración es la quema de los residuos sólidos en instalaciones especializadas para crear calor, vapor o electricidad. La combustión requiere manejar cuidadosamente las emisiones de los escapes (p. ej., partículas y gases) y desechar de manera segura o utilizar las cenizas solidas de manera beneficiosa para reducir los impactos ambientales del proceso. Las cenizas de combustión generalmente se desechan en vertederos (EPA, 2016).
2. Coprocesamiento: el coprocesamiento utiliza residuos como sustituto para los combustibles fósiles en procesos industriales tales como la fabricación de cemento. Se requiere combustible derivado de residuos para el coprocesamiento a fin de garantizar una combustión controlada. El combustible derivado de residuos esta generalmente compuesto por residuos relativamente homogéneos y se logra a través de una serie de pasos de preprocesamiento, que requieren capital adicional. El coprocesamiento ayuda a reducir las emisiones de dióxido de carbono mediante el uso de combustibles de biomasa y combustibles mixtos, y

también puede ser una opción de tratamiento viable para plásticos no reciclables (Hinkel & Blume, 2018).

5.3 Tipos de residuos para la recuperación de energía

Existe un tipo de residuo constituido por material plástico que no se puede reciclar de forma sostenible, por lo que la recuperación de energía es una alternativa valiosa, además del aprovechamiento de su alto poder calorífico, tal como se evidencia en la Tabla 5. Las razones que determinan la imposibilidad del reciclaje para estos materiales son: a) la cantidad, la pureza y la composición de los flujos de residuos recogidos; b) las tecnologías disponibles para clasificar; c) los requisitos que exige el mercado en cuanto a calidad y normas del material, que pueden limitar la idoneidad del reciclado del plástico (PlasticsEurope, 2022).

Tabla 5

Poder calorífico de materiales que se encuentran en desechos sólidos municipales

<i>Tipo de material</i>	<i>Poder calorífico (mj/kG)</i>
<i>Polietileno, Polipropileno</i>	46
<i>Poliestireno</i>	41
<i>Poliéster</i>	24
<i>Madera</i>	19
<i>Papel periódico</i>	18
<i>Residuo municipal seco</i>	16
<i>Residuo de jardinería</i>	7
<i>Residuos alimenticios</i>	6

Nota: Tabla de *Recuperación Energética de los Residuos Plásticos: Una gran oportunidad*, por Umsich (s.f) citado por Noriega & Estrada (2016), *Tecnología de Plástico* (<https://www.plastico.com/es/noticias/recuperacion-energetica-de-los-residuos-plasticos-una-gran-oportunidad>).

Los materiales plásticos constituyen recursos valiosos para el mejoramiento de la calidad de vida y es importante que la sociedad tome conciencia de ello. Aportan innovación por su diversidad de aplicaciones en salud, ciudades inteligentes, automoción limpia y eficiente, empaques y embalajes de alimentos y productos de consumo masivo, además de ser de construcción liviana y sismo resistente (Noriega & Estrada, 2016).

En ese orden de ideas, según Noriega & Estrada (2016), los materiales plásticos contribuyen con la sostenibilidad de la vida en el planeta en la medida que se cierra el ciclo de vida de los productos fabricados a partir de dichos materiales.

Noriega & Estrada (2016) reseñan que existen tres alternativas para cerrar el ciclo de vida de los productos fabricados con materiales plásticos: el reciclaje, la biodegradación (solo aplica para algunos polímeros) y la recuperación energética. Dichas alternativas conforman parte del manejo integral de residuos, para el cual es necesario considerar la pirámide jerárquica mostrada en la Figura 48. En esta pirámide, la base representa las operaciones menos sostenibles y la punta, las de mayor sostenibilidad.

Figura 48

Jerarquía para el manejo integral de residuos sólidos



Nota: Figura de *Recuperación Energética de los Residuos Plásticos: Una gran oportunidad*, por Noriega & Estrada (2016), *Tecnología de Plástico* (<https://www.plastico.com/es/noticias/recuperacion-energetica-de-los-residuos-plasticos-una-gran-oportunidad>).

Tal como se comentó anteriormente, los plásticos, especialmente el polietileno, el polipropileno y el poliestireno, tienen un poder calorífico comparable con el poder calorífico de los aceites combustibles, lo que indica el gran potencial que tienen para la recuperación de la energía. Sin embargo, de acuerdo con la Figura 16, esta alternativa es conveniente considerarla una vez se descarte la posibilidad de la reducción en la fuente, la reutilización y el reciclaje y el compostaje.

En ese orden de ideas, las tecnologías frecuentemente utilizadas son:

- ✓ Combustible derivado de residuos para co-combustión (CDR)
- ✓ Incineración de Residuos Sólidos Municipales (IRSM) (ya tratado anteriormente) y
- ✓ Gasificación térmica

Respecto al CDR (combustible derivado de residuo), es una categoría de residuo registrado en la lista europea de residuos bajo el nombre “Residuos combustibles” y permite aprovechar el potencial calorífico como energía alternativa. Sus principales

aplicaciones son en la industria cementera, producción de cal, de acero, generación de electricidad y de calor, sustitución parcial de los combustibles fósiles. En Alemania, cerca del 60% de la energía requerida por la industria cementera en sus hornos, proviene de CDR (Noriega & Estrada, 2016).

Para la producción de CDR, existen dos tecnologías básicas: el tratamiento mecánico-biológico y el biosecado. Ambas dependen de una adecuada separación. En el tratamiento mecánico-biológico, se realiza primeramente una separación manual de material no deseable (metales, vidrio, plásticos que pueden ser recuperados, cartón, papel). Luego se separa la fracción seca de la húmeda; de la seca se retiran los materiales ferrosos con el uso de separadores magnéticos. La fracción húmeda del material orgánico se trata por compostaje para generar biogás. Lo que quede deberá ser dispuesto.

En el biosecado, se realiza un proceso de compostaje acelerado a través de una aireación forzada de todos los residuos que entran. Luego se separan los materiales que pueden reciclarse fácilmente de los materiales que pueden convertirse en CDR. Lo que queda se incinera o se dispone y vierte.

En cuanto a países que hayan adoptado esta tecnología, Noriega & Estrada (2016), citan que Brasil desarrolló un tipo especial de CDR para generar energía en pequeñas ciudades. Se trata de una planta piloto con una capacidad de 50 T/día, infiriendo por los resultados de las pruebas, que con 150 T/día generaría aproximadamente 12 T/día de cenizas, que pueden usarse en la fabricación de bloques de construcción; 2,6 MW/h de energía disponible para la venta, pudiendo abastecer una ciudad con 180.000 habitantes.

Respecto a la gasificación térmica, consiste en una oxidación térmica en ausencia del oxígeno o con cantidades limitadas (25 a 30%). Se emplean unas cámaras de combustión similares a las usadas en la incineración. Requiere altas temperaturas que pueden obtenerse empleando plasma. En este proceso se obtiene un gas combustible denominado “Syngas” o gas de síntesis, el cual es una mezcla de hidrógeno, monóxido de carbono y algo de dióxido de carbono. Este gas se puede convertir en una amplia variedad de formas de energía como electricidad a través de gas y motores alternativos, calor, vapor y combustibles líquidos como etanol, combustible de avión, diésel y nafta, metanol y propanol, entre otros (Noriega & Estrada, 2016).

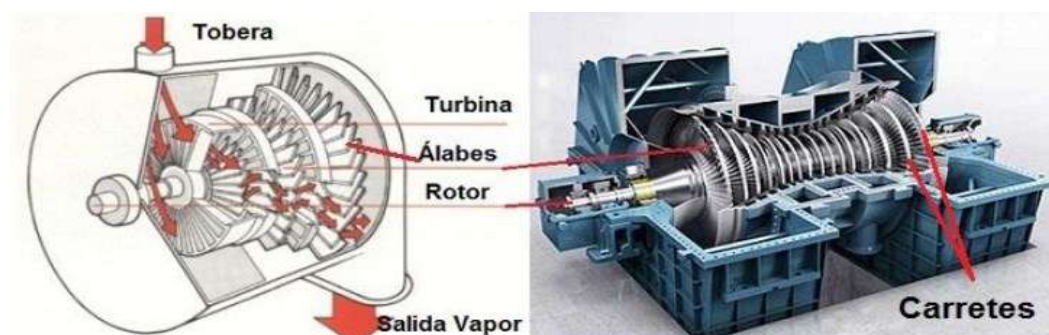
5.4 Componentes de la recuperación de energía

Los componentes principales utilizados para la recuperación de energía son: calderas para la producción de vapor, turbinas de vapor, turbinas de gas y motores recíprocos como motores primarios para la generación de energía mecánica en electricidad. Las turbinas de vapor se utilizan en sistemas grandes (10-50Mw) y las turbinas de gas y los motores recíprocos se utilizan en los sistemas más pequeños.

1. Sistemas con turbinas de vapor: el sistema más común de recuperación de energía para la producción de electricidad es el sistema con turbina de vapor. El vapor se produce en una caldera que quema RSU. El vapor se usa para mover una turbina de vapor y después se condensa de nuevo en agua de alimentación. La turbina de vapor alimenta un generador eléctrico que suministra energía en el sitio y energía en exceso para exportar. El sistema es esencialmente una versión a escala más pequeña de una planta térmica alimentada por carbón o gas (Ver Figura 49).

Figura 49

Turbina a vapor



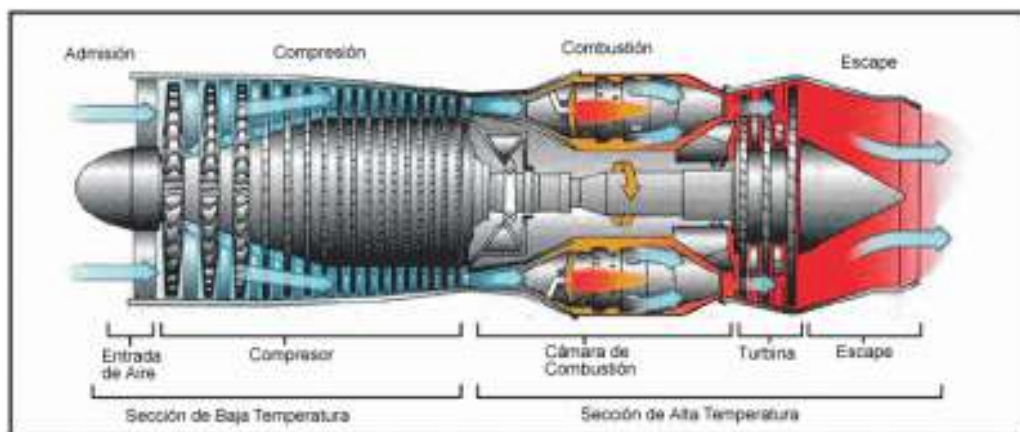
Nota: Figura de Turbina de vapor, por Areatecnología (s. f.), (<https://www.areatecnologia.com/mecanismos/turbina-de-vapor.html>).

2. Sistemas de generación con turbina de gas: las turbinas de gas requieren combustibles gaseosos o líquidos. Estos combustibles pueden suministrarse mediante procesos biológicos, gas de vertedero o digestión anaerobia de RSU o mediante pirolisis o gasificación. Una turbina de gas es similar a un motor de reacción que consiste en un compresor para incrementar la densidad de la mezcla gas/aire, un combustor y una turbina para convertir los gases calientes de

combustión en energía mecánica, como se puede observar en la Figura 50. El generador eléctrico se conecta directamente al eje de salida de la tubería de gas. Las turbinas de gas son eficaces y compactas y se utilizan ampliamente en los sistemas de gas de vertederos.

Figura 50

Turbina de gas

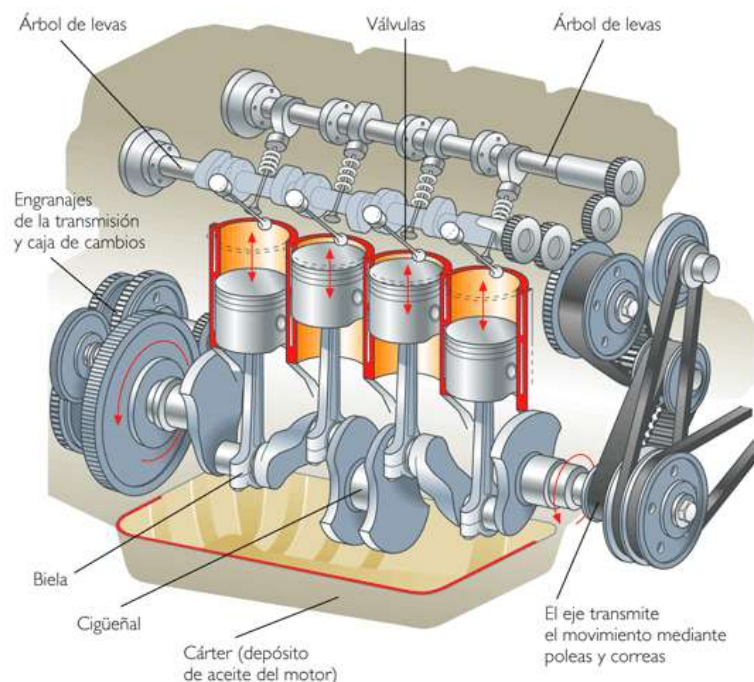


Nota: Figura de *Partes de una turbina de gas*, por Equipo de Redacción PartesDel, (2019), *PartesDel.com* (https://www.partesdel.com/partes_de_una_turbina_de_gas.html).

3. Sistemas con motor de combustión interna: los motores de combustión interna que utilizan pistones y cigüeñal son una alternativa a las turbinas de gas para combustión gaseosos y líquidos del procesamiento térmico o biológico de RSU. Los motores son versiones modificadas de motores industriales diseñados para gas natural o propano. Los motores utilizan carburadores y distribuidores de admisión modificados para manejar el gas de más baja calidad. Los motores de combustión interna son los generadores de energía más comunes utilizados en los sistemas para la recuperación del gas de los vertederos, como el que se muestra en la Figura 51.

Figura 51

Motor de combustión interna

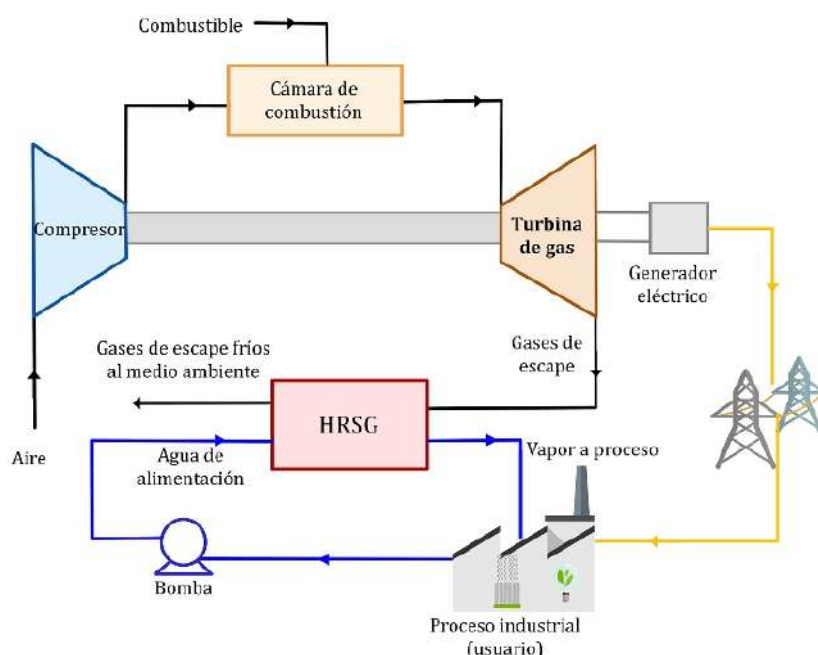


Nota: Figura de *Motores de combustión interna*, por Rubio (2014), *Tecnología Industrial*, (<https://sites.google.com/site/federubiotecindbachillerato/home/2o-bachillerato/mquinas/5-motores-de-combustion-interna>).

4. Sistemas de cogeneración: cogeneración se define como la generación de energía térmica y eléctrica. Los sistemas de cogeneración son utilizados ampliamente en la industria para generar electricidad y calor para los procesos de calefacción. Las aplicaciones para la recuperación de energía de residuos sólidos son limitadas por el requisito que hace necesario que el uso del calor recuperado se localice en el mismo lugar que el sistema de generación de energía. En sistemas con turbina de vapor para calefacción se genera mediante la extracción de parte del vapor desde las etapas de baja presión de la turbina de vapor. En sistemas de turbinas de gas se puede añadir una caldera de calor residual para generar vapor desde la corriente de escape del gas caliente de la turbina. En sistemas de motor de combustión interna, el calor se puede recuperar con radiadores especiales y envolturas de enfriamiento de escape. (Ver Figura 52)

Figura 52

Sistema de Co-generación



Nota: Figura de *Tecnologías. Cogeneración con turbina de gas*, por COGENERACIÓN México (2020), (<https://www.cogeneramexico.org.mx/public/Cogeneracion/Tecnologias/Conceptos>).

Según la OECD (2022), los países en Europa y Asia donde se desarrolla este proceso son Alemania, Suiza, Suecia, Bélgica, Países Bajos, Dinamarca, Noruega y Japón, siendo Japón el que mayor porcentaje de recuperación de energía presenta.

En América Latina se lleva a cabo la recuperación de energía a partir de los desperdicios en Uruguay, Colombia, Chile, México, Perú, Guatemala, Bolivia y Ecuador. Uno de los casos donde se emplea este método es el de la Empresa Pública Metropolitana de Gestión Integral de Residuos Sólidos (EMGIRS EP) quien en un convenio con la empresa GasGreen S. A. ejecutan el proyecto donde generan energía eléctrica a partir del Biogás que se produce en el relleno sanitario ubicado en Quito, contando con dos generadores capaces de producir 40 megavatios por día, con la implementación de tres generadores más en un futuro no muy lejano. El biogás producido a partir de los desperdicios en el relleno sanitario, es captado y trasladado por tuberías de HDPE o polietileno de alta densidad hacia dos motogeneradores los cuales se encuentran acoplados a un alternador (EMGIRS, 2022).

Finalmente se puede mencionar que entre los diversos tratamientos aplicados a los residuos sólidos para garantizar su manejo adecuado y para minimizar su impacto negativo al ambiente se encuentran los tratamientos termoquímicos, los cuales constituyen uno de los procesos más importantes a la hora de transformar estos residuos en energía que puede ser aprovechada por las comunidades.

Estos procesos se basan en la recuperación de aquellos desperdicios que tienen una mayor capacidad calórica como lo son los componentes orgánicos como los restos de comida, el papel, plástico, entre otros.

Los procesos termoquímicos más utilizados son la incineración, la pirolisis y la recuperación de energía, los cuales requieren de tecnologías de avanzada para poder llevar a cabo la transformación de los desperdicios para su aprovechamiento energético, y a su vez contribuyen a minimizar los problemas generados por las grandes cantidades de estos desperdicios como lo es la su disposición, limitación de espacios y de terrenos, disminución de las emisiones de gases que producen el efecto invernadero, además de la recuperación de energía que escasea en muchas ciudades.

CAPÍTULO 5.

Procesos biológicos aplicados al tratamiento de residuos sólidos

1. Introducción

El que se genere en la actualidad gran cantidad de desechos orgánico especialmente en la agroindustria o industrias que procesan materia prima agroindustrial, ha significado un reto a la hora de realizar su manejo adecuado sobre todo a nivel tecnológico.

Por su naturaleza, los desechos orgánicos son de fácil descomposición lo que conlleva a la formación de lixiviados, los cuales al entrar en contacto con los cuerpos de agua pueden ocasionar la contaminación de aguas subterráneas, y la emanación de gases causantes del efecto invernadero, como CO₂ y metano. Por lo que es de suma importancia considerar los procesos de degradación de estos desechos al momento realizar su disposición final (Sanderson et al., 2008).

Por medio de diversos tratamientos con el uso de microorganismos, los desechos orgánicos en especial los vegetales, pueden ser transformados en una fuente de energía renovable como el biogás y la biomasa. Mediante la fotosíntesis las plantas convierten CO₂ y agua en cadenas de carbono, las cuales liberan la energía acumulada al momento de romperse los enlaces para volver a convertirse en moléculas más simples como CO₂, vapor de agua, metano u otras. Estas reacciones pueden llevarse a cabo por procesos físico-químicos aeróbicos o anaeróbicos (Yokoyama et al., 2007).

Estos procesos es común utilizarlos cuando la biomasa que va a ser procesada es seca. Sin embargo, si la biomasa contiene un elevado porcentaje de humedad, los más recomendados son los procesos biológicos siendo estos más eficientes desde el punto de vista energético, ya que no es necesario eliminar el agua contenida en estos desechos antes de ser aprovechados (Edelmann, 2007).

Los procesos aeróbicos son aquellos donde la biomasa tiene contacto con oxígeno y los productos principales son CO₂ y materia orgánica no degradable, la cual se conoce como humus o compost. En los procesos anaeróbicos la degradación se produce en

ausencia de oxígeno y los principales productos son el biogás, el cual es un gas combustible formado por una mezcla de CO₂ y CH₄, y biol (Möller, 2009; Uemura et al., 2008). En este capítulo se desarrollarán los procesos biológicos que comúnmente utilizados para el tratamiento de los residuos orgánicos.

2. Procesos biológicos.

La mayoría de los procesos industriales en especial en el área de producción de alimentos se genera una gran cantidad de agentes contaminantes que influyen de forma negativa sobre la calidad de los recursos naturales, en virtud de esto se realizan diferentes procesos que involucran la utilización de agentes biológicos o microorganismos que contribuyen con la modificación de ciertas características físicas, químicas y biológicas de dichos residuos haciéndolos amigables con el ambiente.

Estos tipos de procesos no suelen ser convencionales generando un cambio disminuyendo el uso de sustancias químicas que en ocasiones suelen ser tóxicas y muy costosas. Actualmente se ha impulsado lo que se conoce como la química verde, creando un interés de este tipo de procesos donde se lleva a cabo la degradación de los desperdicios por microorganismos lo que implica no solo la reducción de compuestos contaminantes, sino también en algunos casos se produce la conservación de compuestos que pueden ser aprovechados en otros procesos reduciendo los costos de operación (Zakaria et al., 2020).

En los procesos biológicos participan diversos tipos de microorganismos como bacterias, hongos, nematodos, protozoos, algas y rotíferos, siendo de gran utilidad y en mayor proporción las bacterias, los hongos o las levaduras para el aprovechamiento de los residuos provenientes de la agroindustria.

En estos procesos las fermentaciones son los procesos biotecnológicos de mayor importancia para la obtención de la biomasa y de diversos compuestos de interés, usualmente se emplean microorganismos como los hongos y las bacterias en diferentes sustratos biológicos, que aprovechan la actividad metabólica con el propósito de transformar la materia prima (Zakaria et al., 2020).

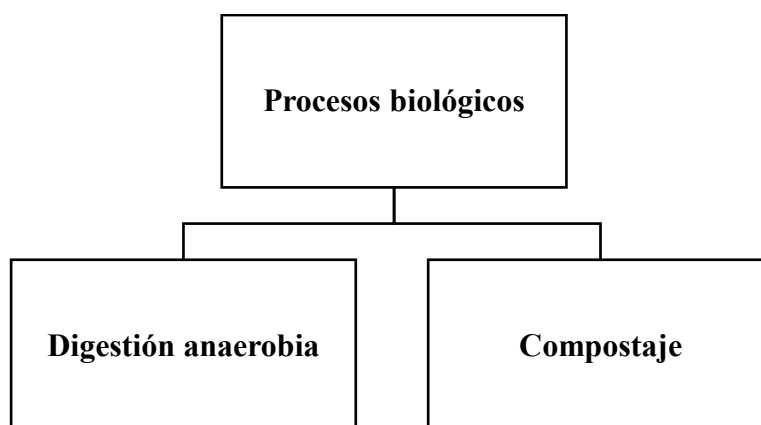
La alta generación de desperdicios agroindustriales ha despertado un creciente interés por desarrollar nuevas alternativas que permitan la utilización de estos desperdicios, por lo que los procesos biológicos se consideran uno de los procesos que facilitan una gestión adecuada para la conversión de la biomasa propiciando una economía circular sostenible

que contribuye a minimizar los compuestos residuales, no genera residuos contaminantes y que se pueden aprovechar al máximo. El empleo de agentes biológicos provoca la obtención de diferentes mecanismos de reacción que pueden ser empleados en diversos procesos industriales, presentando una serie de ventajas como lo es que son amigables con el medio ambiente, variación de las condiciones de operación dependiendo de los microorganismos y no requieren de una demanda energética elevada (Zakaria et al., 2020).

Entre los procesos donde participan los microbios en la degradación de los sustratos orgánicos se encuentran la digestión anaerobia y el compostaje, tal como se muestra en la Figura 53:

Figura 53

Procesos biológicos aplicados en el tratamiento de RSU



Nota: Elaboración propia, (2022)

3. Digestión anaerobia.

3.1 Concepto de digestión anaerobia

La digestión anaerobia, conocida también como biometanización, consiste en un proceso biológico donde, a través de la acción de microorganismos y en ausencia de oxígeno, se produce la degradación de la materia orgánica, generándose una mezcla constituida principalmente por dióxido de carbono y metano, que se conoce como “Biogás” y un “Digestato” o residuo orgánico formado por una mezcla de productos minerales como el nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca) y un compuesto de difícil degradación denominado “Lodo”, que puede ser utilizado como fertilizante en suelos agrícolas (Castro, 2018; Palau, 2016). Con relación al biogás, según Palau, (2016), la composición porcentual de gases es 50 a 70% de CH₄, 30 a 50% de CO₂, menos de 2%

de HS_2 y otros gases; siendo el principal gas combustible el metano. La potencia calorífica es aproximadamente de 5500 Kcal/m^3 .

En cuanto a su finalidad, la Universidad Autónoma de Barcelona, Font (2017) refiere que la digestión anaerobia es una tecnología utilizada comercialmente en todo el mundo, pero especialmente en Europa, atribuyendo este hecho a la necesidad que tienen de diversificar su producción energética. A pesar de no ser una tecnología innovadora, fue en 1980 cuando se inició su uso para el tratamiento de aguas residuales, lodos de depuradora o residuos municipales, siendo considerada actualmente como una tecnología de punta, tanto para el tratamiento de aguas residuales y residuos con la obtención de energía, como para procesos cuyo principal objetivo es la producción de energía.

3.2 Tipos de digestión anaerobia.

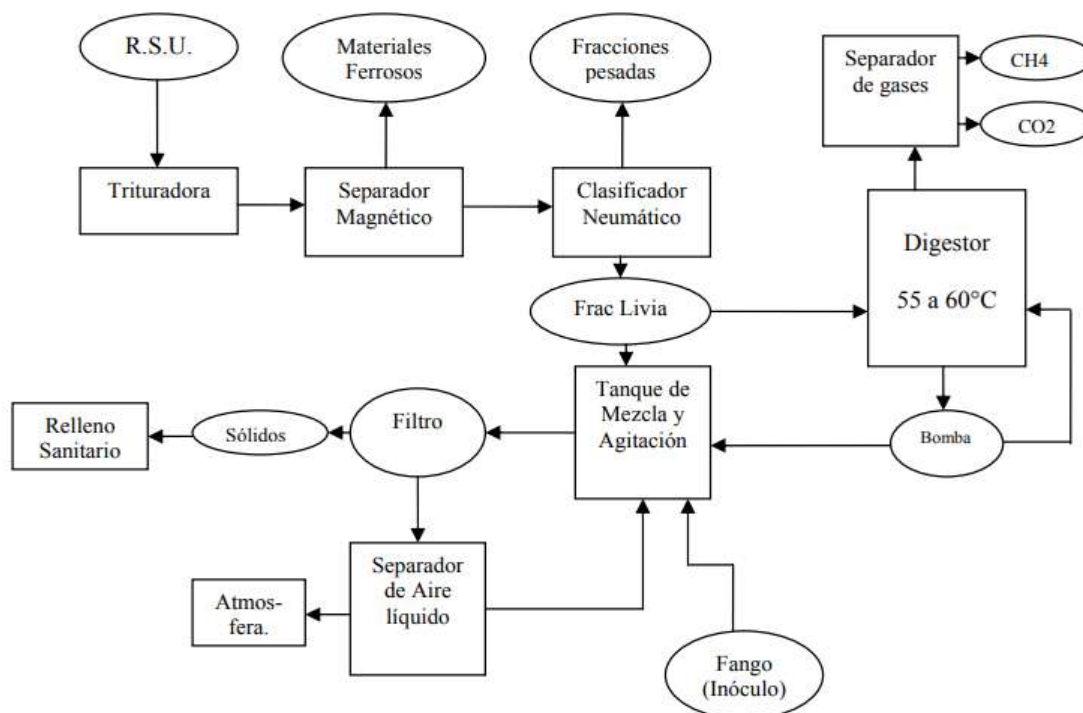
Según López (2004), la digestión anaerobia de la fracción orgánica contenida en los residuos para la producción de biogás, se puede desarrollar en dos tipos de procesos en función a la concentración de sólidos volátiles orgánicos. Estos son: a) Digestión anaerobia de los sólidos orgánicos presentes en los RSU en bajas concentraciones y b) Digestión anaerobia de los sólidos orgánicos presentes en los RSU en altas concentraciones.

A continuación, se describen ambos procesos.

- a) Digestión anaerobia de los sólidos orgánicos presentes en los RSU en bajas concentraciones: es muy empleada a escala mundial para producir metano utilizando como insumo los RSU. En este proceso los residuos orgánicos en concentraciones de sólidos que oscilan entre 4 y 8%, se fermentan. La principal desventaja de este proceso biológico es que, para alcanzar la concentración de sólidos deseada, se requiere gran cantidad de agua añadida sobre los residuos, lo cual produce un fango digerido muy diluido que debe ser deshidratado antes de su evacuación, constituyéndose esto en un factor negativo al momento de la selección del proceso por lo costoso que resulta esta alternativa. En la Figura 54 se muestra el diagrama de flujo del proceso para la digestión en condiciones de anaerobiosis de sólidos en baja concentración para los componentes orgánicos de los RSU (G. López, 2004).

Figura 54

Diagrama de flujo del proceso de digestión anaerobia de sólidos en baja concentración para la fracción orgánica de los RSU



Nota: Figura de *Digestión anaerobia de residuos sólidos urbanos (RSU)* figura 2.1 (p.7). Estimación del tiempo de retención dependiendo de la concentración de sólidos y de la presencia o no de inóculo, por López (2004), Trabajo Fin de Máster, Universidad de Los Andes, Bogotá, (<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/10251/u245573.pdf?sequence=1>).

El proceso de digestión anaerobia de los RSU en bajas concentraciones de sólidos orgánicos se da en tres etapas:

- ✓ Preparación de la porción orgánica, que implica la recepción, selección y reducción en tamaño.
- ✓ Adición de agua y nutrientes, la mezcla, el ajuste del pH hasta aproximadamente 6,8, y el calentamiento de la masa húmeda entre 55 y 60°C. Esta reacción se puede realizar en un biorreactor de flujo continuo.
- ✓ Captura, almacenamiento y, si es necesario la separación de los componentes gaseosos.

La digestión anaerobia se lleva a cabo dentro de un biorreactor de flujo continuo cuyo contenido se mezcla completamente en el interior del mismo. En algunas operaciones se han utilizado una serie de biorreactores discontinuos, en vez de uno o más reactores de

mezcla completa por flujo continuo. En la mayoría de las operaciones el porcentaje de humedad y los nutrientes requeridos se añaden a los residuos que se van a procesar, en forma de fangos de aguas residuales o también se adiciona excremento de vaca. Según las características químicas del fango o del estiércol de vaca, quizás también se tenga que añadir nutrientes adicionales. Como se forman espumas y cortezas, esto han causado problemas en la digestión de los residuos sólidos, una mezcla adecuada es una importancia fundamental en el diseño y funcionamiento de tales sistemas.

- b) Digestión anaerobia de los sólidos orgánicos presentes en los RSU en altas concentraciones, es una tecnología nueva. En este proceso la fermentación de los residuos orgánicos ocurre con concentraciones de sólidos de 22% aproximadamente. Las ventajas que presenta este proceso es que requiere menos gasto de agua que en el proceso anterior y que la velocidad de producción del gas es mayor. Los pasos del proceso son los mismos mencionados para el de bajas concentraciones de sólidos, con la diferencia de que requiere menos esfuerzo para deshidratar y evacuar los fangos digeridos.

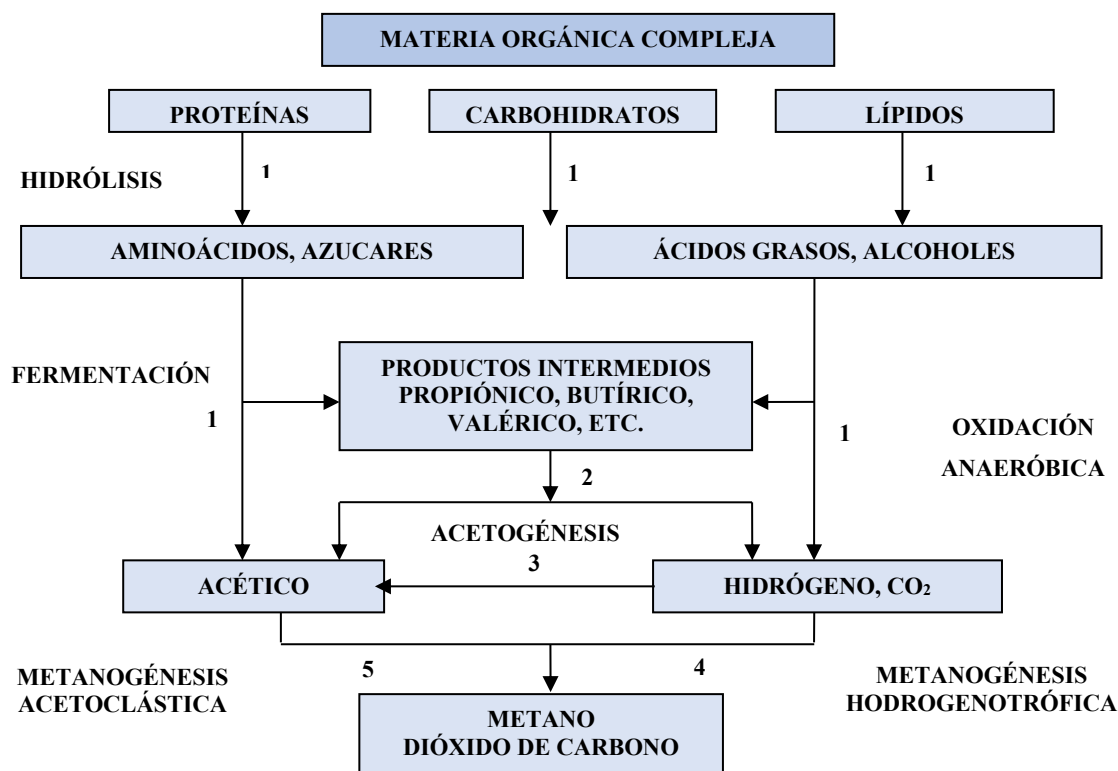
3.3 Descripción del proceso- Microbiología del proceso

La digestión anaeróbica pasa por una serie de etapas metabólicas donde ocurren las transformaciones bioquímicas de los residuos. Estas son: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. En cada una de esas etapas actúan grupos diferentes de bacterias anaerobias facultativas que originan la formación de productos intermedios típicos de dicha etapa (Arhoun, 2017).

En la Figura 55 se presenta el esquema donde se representan las principales etapas del metabolismo anaerobio, así como los componentes más representativos del proceso.

Figura 55

Etapas de la digestión anaerobia



Población bacteriana que participa en el proceso:

- 1: bacterias fermentativas;
- 2: bacterias acetogénicas;
- 3: bacterias homoacetogénicas;
- 4: bacterias metanogénicas hidrogenotróficas;
- 5: bacterias metanogénicas acetoclásticas.

Nota: Figura de *Aprovechamiento energético y material mediante digestión anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos que se producen en el Barrio Moravia – Medellín*, figura 1 (p. 10), por Pavlostathis & Giraldo-Gómez (1991) citados por Sánchez (2019), Tesis Doctoral, Universidad de Antioquia, Medellín, (https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/14222/1/SanchezJoe_2019_AprovechamientoEnergeticoMaterial.pdf).

En ese sentido, a continuación, se explican brevemente cada una de las etapas antes mencionadas, con los microorganismos involucrados (Castro, 2018; Sánchez, 2019):

- ✓ **Hidrólisis:** es llevada a cabo por bacterias hidrolíticas acidogénicas. Aquí los polímeros complejos como proteínas, polisacáridos y lípidos son hidrolizados por acción de enzimas extracelulares convirtiéndolos en moléculas más simples, azúcares, aminoácidos y grasas, para hacer más fácil su dilución. En esta fase los compuestos orgánicos se hidrolizan para ser utilizada por los microorganismos. Esta etapa es considerada como la más lenta recurriéndose a diversos pretratamientos físicos, químicos y enzimáticos, para acelerar la velocidad de

biodegradación de los restos sólidos orgánicos. Las principales bacterias que intervienen en esta etapa son: bacteroides, lactobacillus, sporobacterium, megasphaera y bifidobacterium, Clostridium, Staphylococcus micrococcus, Bacillus, acetovibrio.

- ✓ Acidogénesis: los compuestos formados en la fase anterior se fermentan a productos intermedios, dando como resultado una mezcla de dióxido de carbono, hidrógeno, ácido acético, ácidos grasos volátiles, ácidos grasos de cadena larga, amoníaco, alcoholes y pequeñas cantidades de otros metabolitos, que son utilizados en las fases posteriores. Las bacterias intervinientes son las bacterias acidogénicas, donde se encuentran las bacterias anaerobias facultativas. Las bacterias que intervienen principalmente en esta etapa son: Clostridium, Paenibacillus y Ruminococcus, lactobacillus.
- ✓ Acetogénesis: las bacterias acetogénicas intervienen y utilizan como sustrato a los productos obtenidos en la fase acidogénica, formando hidrógeno, ácido acético y dióxido de carbono siendo los principales precursores del metano. Las bacterias involucradas son las acetobacterium.
- ✓ Metanogénesis: es la fase final donde se produce el metano gracias a la acción de las bacterias que son metanogénicas, utilizando los productos finales de la acetogénesis y de algunos productos intermedios de la hidrólisis y acidogénesis. El dióxido de carbono, hidrógeno y ácido acético son transformados a dióxido de carbono y en metano. Esta fase es considerada una limitante en el procedimiento de digestión en condiciones anaeróbicas para gran cantidad de sustratos, ya que la acción de las bacterias metanogénicas es generalmente lenta. Las bacterias involucradas son las Arqueas metanogénicas: *Methanosarcina*, *Methanobacterium*, entre otras.

3.4 Requerimientos del proceso.

Existe una serie de requerimientos para que el proceso ocurra favorablemente. Estos requerimientos están referidos al sustrato, temperatura, pH, alcalinidad, nutrientes, toxicidad e inhibidores del proceso (Arhoun, 2017). A continuación, se presentan los requerimientos más importantes del proceso:

- ✓ **Sustrato:** las materias primas por las que se muestra mayor preferencia son los lodos, las aguas residuales urbanas e industriales, la biomasa agrícola, los cultivos, los residuos ganaderos y los residuos municipales (Font, 2017). Por otro lado, Arhoun (2017) reseña que, aunque en este proceso se pueden tratar múltiples residuos separadamente, mono digestión o mono sustrato, es preferible la codigestión; es decir, la mezcla de varios sustratos, en virtud a las propiedades del propio sustrato. En la Tabla 6 se presentan los inconvenientes de algunos residuos.

Tabla 6*Algunos inconvenientes de sustratos orgánicos*

Residuo	Inconveniente
Lodo de depuradora	Baja carga orgánica
Estiércol de animales	Baja carga orgánica Altas concentraciones de amonio
Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos	Concentración elevada de metales Pesados
Residuos agrícolas y agroindustriales	Estacionales Carencia de amonio
Residuos de matadero y de la industria pesquera	Alta concentración de N y/o ácidos grasos de cadena larga (AGCL)

Nota: Tabla de *Digestión y codigestión anaerobia de residuos agrícolas, ganaderos y lodos de depuradora* tabla 1.11 (p.43), por Arhoun (2017), Tesis doctoral, Universidad de Málaga, Málaga, (<https://core.ac.uk/download/pdf/214842277.pdf>).

Las características del sustrato y su composición son factores claves en el proceso. Según Arhoun (2017), los principales sustratos utilizados son: estiércol (54%), fango de depuradora (22%), fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (11%) y otros (13 %); mientras que los cosustratos son los residuos industriales (41%), los residuos producto de la agricultura (23%), residuos que son municipales (20%) además de otros (16 %).

- ✓ **Temperatura:** se considera crítica ya que esta variable afecta directamente la velocidad de producción de ácidos y el rendimiento del proceso; en general, las temperaturas altas aceleran las reacciones químicas y biológicas y aumentan los requerimientos energéticos. Se puede trabajar en tres rangos de temperatura: Psicrofílico, cuando se trabaja a temperaturas que están por debajo de 25°C; siendo el óptimo esa misma temperatura; mesofílico, para temperaturas entre 25 y 45°C (el más usado), con un óptimo entre los 33 y 38°C para la producción de

biogás y termofílico, cuando se trabaja entre los 45 - 65°C con un óptimo productivo alrededor de los 60°C.

- ✓ pH: es un parámetro que regula la coexistencia de los microorganismos por lo que tiene gran influencia en la estabilidad del proceso. Cada microorganismo presenta máxima actividad en intervalos específicos de pH. Por lo general, el intervalo de pH óptimo para desarrollar el proceso de digestión se encuentra entre 6,5 y 7,5. Los valores de pH determinan tanto la producción total de biogás, como su composición en metano ya que valores de pH menores a 4,5 y superiores a 8,3 inhiben la actividad de los microorganismos implicados. Por esta razón se recomienda mantener el pH en los digestores por encima de 6,5.
- ✓ Alcalinidad: mide la capacidad de un medio acuoso de consumir los protones sin variación del pH. En este proceso, la alcalinidad amortigua los cambios de pH en los desequilibrios entre la velocidad de fermentación y la velocidad de consumo de los ácidos grasos volátiles. Para una digestión equilibrada se sugiere una alcalinidad óptima entre 1500 y 3000 mg L⁻¹. Cuando la alcalinidad bicarbonatada cae por debajo de los 500 mg L⁻¹ y con un porcentaje normal de dióxido de carbono (38% aprox) en el reactor el pH descenderá cerca de 6. El tratamiento anaerobio de los compuestos nitrogenados presentes en los residuos produce amoníaco y bicarbonato que crean alcalinidad en el sistema quedando el catión amonio en equilibrio con el bicarbonato el dióxido de carbono desaparecerá de la disolución en forma de iones de carbonato.
- ✓ Nutrientes: los microorganismos anaerobios requieren nutrientes para sustentar su crecimiento, estos nutrientes son diferentes de los que requieren los microorganismos aerobios puesto que el crecimiento celular es menor. La relación entre el carbono y nitrógeno (C/N) presentes en la materia orgánica es importante para el buen funcionamiento de los digestores. Los estudios realizados indican que la proporción deseable se sitúa entre 20-30%. Si esa relación es menor, puede producirse más amoníaco del deseado perjudicando la actividad microbiana y la biometanización. Asimismo, para que crezcan los microbios se requiere que estén

presentes los macronutrientes: carbono, nitrógeno y fósforo y algunos oligoelementos como: azufre, potasio, calcio, magnesio, hierro, níquel, cobalto, zinc, manganeso, cobre, entre otros. Los requerimientos específicos de nitrógeno y fosforo dependerán específicamente de la naturaleza de los compuestos a degradar y de la edad del lodo del sistema.

- ✓ Toxicidad e inhibidores: las bacterias metanogénicas se consideran como las más sensibles a la toxicidad de todos los microorganismos que participan en el tratamiento biológico del agua residual. Sin embargo, las bacterias metanogénicas pueden tolerar una amplia variedad de compuestos tóxicos que por otra parte suelen degradarse en los digestores sin que las bacterias metanogénicas resulten afectadas. La digestión anaerobia puede verse afectada por sustancias presentes en la materia orgánica o como subproducto de los procesos metabólicos de conversión bioquímica, que resultan tóxicas a los microorganismos, causando disminución de la producción de biogás, deficiencia en la remoción de los compuestos orgánicos e incluso la falla total de proceso. Entre estas sustancias están el amonio, amoniaco, ácido sulfídrico, iones metálicos ligeros y metales pesados, ácidos grasos de cadena larga producidos en la degradación de grasas y lípidos, y algunos compuestos orgánicos como los alquilbencenos, bencenos halogenados, nitrobencenos y fenoles.

3.5 Productos de la digestión anaerobia

- ✓ El biogás, tal como se mencionó al inicio, está compuesto principalmente por CH_4 y CO_2 y la composición del mismo depende de la naturaleza del residuo y de su biodegradabilidad. En la Tabla 7 se presentan los componentes del biogás en función del sustrato utilizado. En la Figura 56 se muestra las principales opciones de conversión y uso del biogás y del Digestato.
- ✓ El Digestato es un compuesto que, por su contenido elevado de nitrógeno, constituye un abono de buena calidad. Es similar al humus, parcialmente estable y rico en componentes orgánicos. A veces se usa como composta la porción sólida y se emplea como fertilizante de suelo; mientras que la parte líquida puede usarse como fertilizante líquido debido a su riqueza en

nutrientes. En la Figura 56 se mencionan las opciones de conversión y usos del biogás y del digestato

Tabla 7

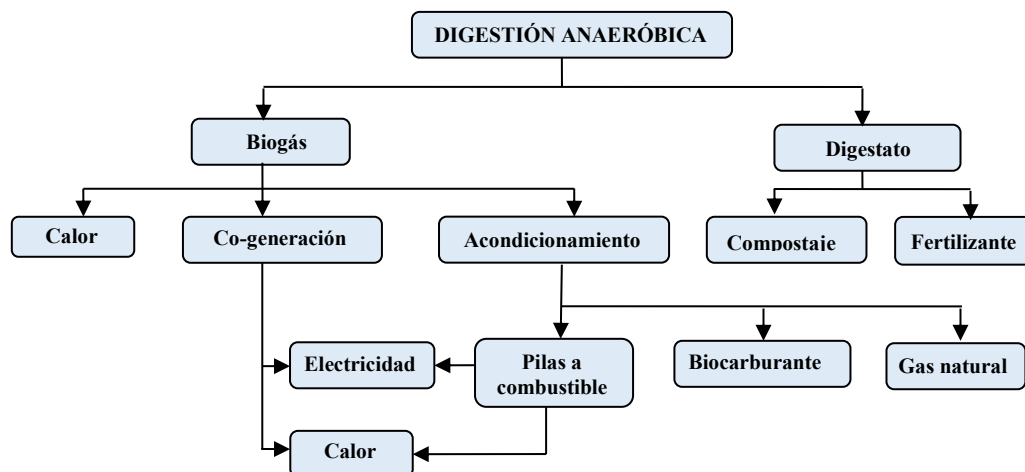
Componentes del biogás en función del sustrato utilizado

Componente	Residuos agrícolas	Lodos de depuradora	Residuos industriales	Gas de vertedero
CH₄	50-80%	50-80%	50-70%	45-65%
CO₂	30-50%	20-50%	30-50%	34-55%
H₂O	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
H₂	0,2	0,5	0,2	0,1
H₂S	10-700ppm	0-1%	0,8%	0,5-100ppm
NH₃	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas
CO	0,1	0,1	0,1	Trazas
N₂	0-1%	0-3%	0-1%	0-20%
O₂	0-1%	0-1%	0-1%	0-5%
Compuestos orgánicos	Trazas	Trazas	Trazas	5ppm

Nota: Tabla de *Digestión y codigestión anaerobia de residuos agrícolas, ganaderos y lodos de depuradora* tabla 1.6 (p.25), por Arhoun (2017), Tesis doctoral, Universidad de Málaga, Málaga, (<https://core.ac.uk/download/pdf/214842277.pdf>).

Figura 56

Opciones de conversión y usos del biogás y digestato



Nota: Figura de *Digestión y codigestión anaerobia de residuos agrícolas, ganaderos y lodos de depuradora*, figura 1.8 (p.38), por Schön (2009) citado por Arhoun (2017), Tesis doctoral, Universidad de Málaga, Málaga, (<https://core.ac.uk/download/pdf/214842277.pdf>).

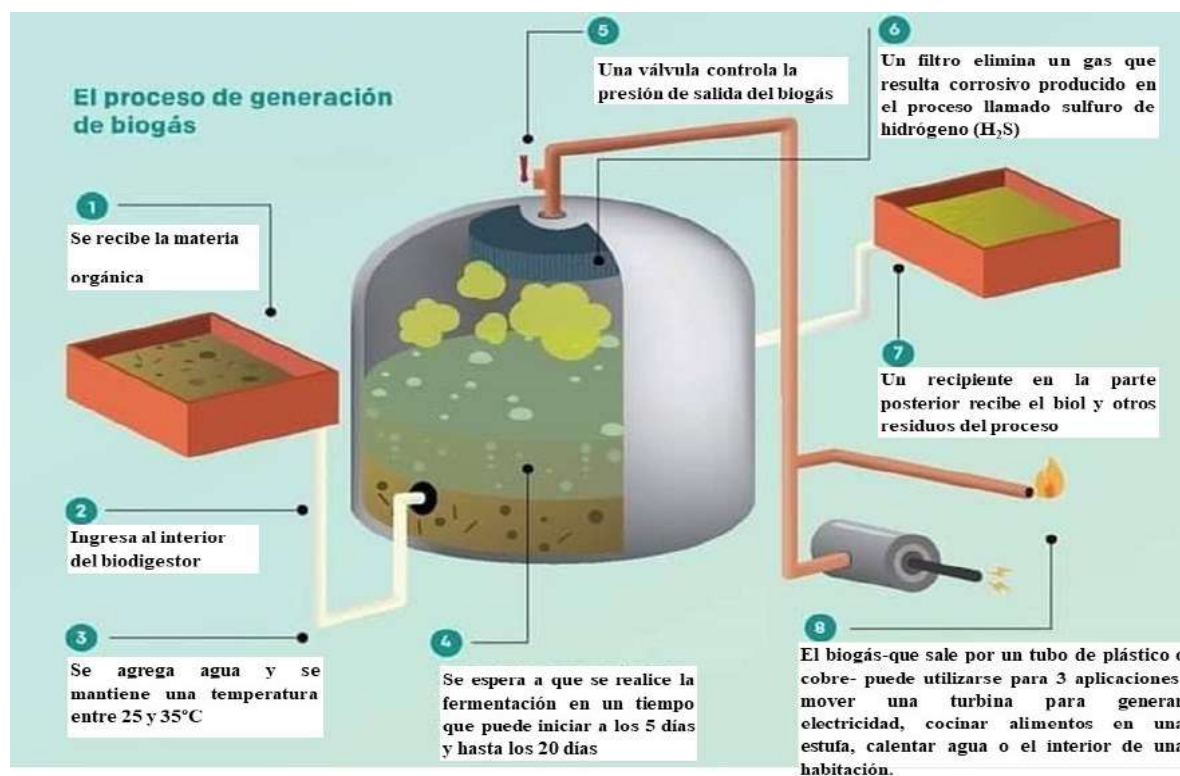
3.6 Equipos utilizados

✓ Biodigestores.

El biodigestor es un tanque construido de diferentes materiales, donde se introduce el material orgánico y bajo determinados parámetros permite su fermentación de forma anaeróbica produciendo biogás y digestato. Tiene 3 zonas: a) zona de retención de materia orgánica; b) zona de almacenamiento del biogás generado y c) zona de carga y descarga. Según refiere Sánchez (2019), se han desarrollado diversos tipos de biodigestores anaerobios de acuerdo con las características que presente el sustrato, la variación en su disponibilidad, cantidad, relación costo-beneficio y las características requeridas en los coproductos obtenidos. En la Figura 57 se muestra un biodigestor y sus partes componentes.

Figura 57

Biodigestor y sus componentes

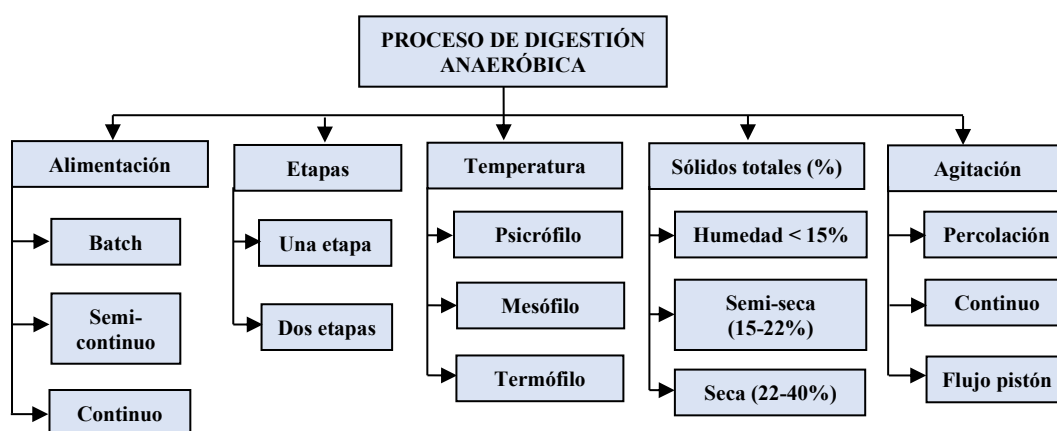


Nota: Figura de *¿Cómo funciona un biodigestor?*, infografía por Pizano (2018), ProyectoFSE, (<http://www.proyectofse.mx/2018/08/06/como-funciona-un-biodigestor/>).

En virtud a lo descrito, para la valoración del comportamiento biológico de los digestores se consideran tres indicadores: la velocidad de adición de sustrato, la velocidad de formación del producto y el tiempo de retención (Arhoun, 2017). En ese sentido, de acuerdo con sus fines, escala y tipo de alimentación, el proceso puede clasificarse según se muestra en la Figura 58.

Figura 58

Clasificación general de los sistemas para la digestión anaeróbica



Nota: Figura de *Digestión y codigestión anaerobia de residuos agrícolas, ganaderos y lodos de depuradora*, figura 1.6 (p.28), por Schön (2009) citado por Arhoun (2017), Tesis doctoral, Universidad de Málaga, Málaga, (<https://core.ac.uk/download/pdf/214842277.pdf>).

De acuerdo con lo dicho, se pueden encontrar diferentes tipos de digestores:

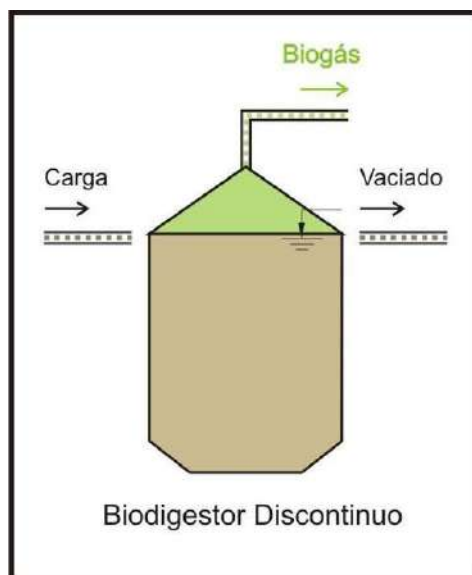
- ✓ Digestores para sistemas discontinuos o por Batch, en donde hay una evidente separación entre las dos fases, produciéndose en la fase inicial la acidificación de forma más rápida respecto a la metanogénesis, y en la fase secundaria donde se produce la transformación de los ácidos en biogás. El fundamento de esta clase de digestor, es que el emplear entradas sucesivas de alimento en intervalos de tiempo regulares permite que se mantenga la velocidad en la producción del biogás en un valor estable por largos periodos de tiempo. Estos digestores se cargan de forma total y su descarga se efectúa cuando se ha degradado la totalidad de la materia orgánica y ya no se produce biogás (Ver Figura 59). Su uso es recomendable cuando se presenten problemas operativos como la falta de personal, o cuando la

materia orgánica usada como materia prima no se produce de forma continua.

Pueden procesar una gran variedad de materiales.

Figura 59

Digestor discontinuo



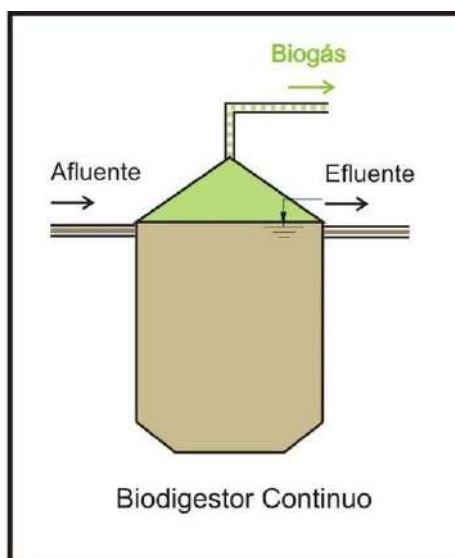
Nota: Figura de *Tratamiento biológico combinado anaeróbico/aeróbico de Estiércol Generado en la cría intensiva de cerdo*, figura 19 (p.86), por Dinamarca (2010), Proyecto de grado, Universidad Fasta, (<https://docplayer.es/82712658-Proyecto-final-de-graduacion-en-ingenieria-ambiental-tratamiento-biologico-combinado-anaerobico-aerobico-de-estiercol-generado.html>).

- ✓ Digestores para sistemas continuos de una etapa: se consideran dos parámetros para estos digestores: la concentración de sólidos totales y la cantidad de etapas; las reacciones son simultáneas (Ver Figura 60). Este tipo de digestor fue desarrollado para el tratamiento de aguas residuales y actualmente su uso se ha extendido a todo tipo de sustratos. Es utilizado en plantas de biogás para la producir energía eléctrica. Son de gran tamaño y se emplean equipos comerciales para realizar la alimentación, para la agitación y el control. Este tipo de digestor permite controlar la digestión, con el grado de precisión deseado, permitiendo corregir cualquier anomalía que se presente durante el proceso una vez detectada. Permite el manejo de las variables relacionadas como la carga orgánica volumétrica, el tiempo de retención y la temperatura durante largos periodos. La

“puesta en marcha” de este equipo sólo se repite cuando se realiza su vaciado por razones de mantenimiento.

Figura 60

Biodigestor continuo



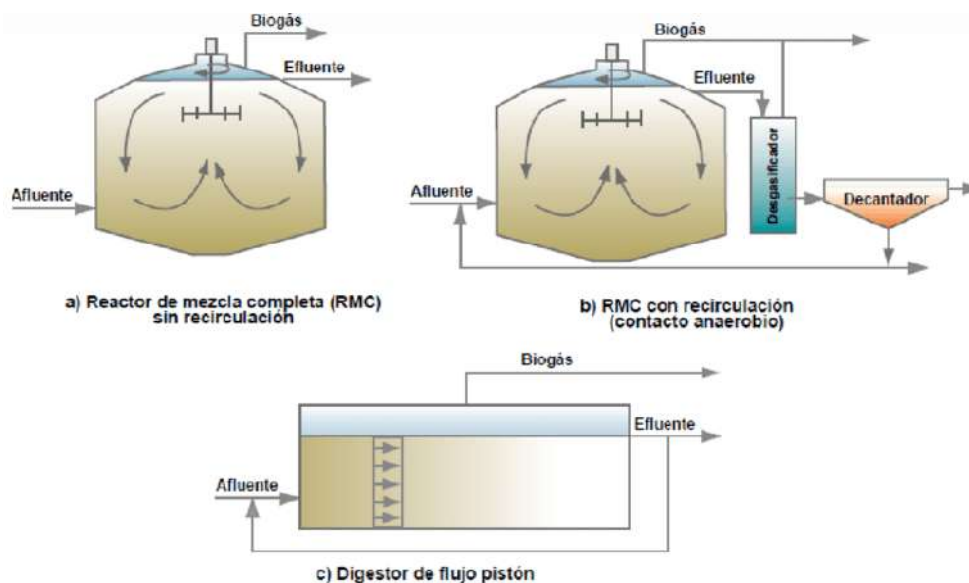
Nota: Figura de *Tratamiento biológico combinado anaeróbico/aeróbico de Estiércol Generado en la cría intensiva de cerdo*, figura 19 (p.86), por Dinamarca (2010), Proyecto de grado, Universidad Fasta, (<https://docplayer.es/82712658-Proyecto-final-de-graduacion-en-ingenieria-ambiental-tratamiento-biologico-combinado-anaerobico-aerobico-de-estiercol-generado.html>).

- ✓ Digestores tipo tanque con mezcla completa: suelen ser los más usados para residuos diluidos. Es un digestor sencillo y es muy usado en las plantas donde se produce biogás procedente de la agroindustria en Europa por su costo reducido y por ser muy versátil ya que operan de forma continua o discontinua, permitiendo las modalidades de mezcla completa sin recirculación (Figura 61a) y con recirculación (Figura 61b). Son utilizados en residuos con un elevado porcentaje de sólidos totales, con la finalidad de lograr un mayor contacto entre la población microbiana y el sustrato. Entre las desventajas que presentan estos digestores se encuentran las bajas velocidades de carga con que pueden ser operados, los altos tiempos de retención que requieren y lo complejo del sistema de mezclado especialmente en su construcción y su mantenimiento. Son mezclados por agitadores y trabajan de forma eficiente en rangos de temperatura mesofílica y termofílica para degradar desechos sólidos, presentan altos costos de construcción y operación, pero un rendimiento elevado de metano. Un gran número de plantas

industriales para la producción de biogás construidas en Europa están basadas en este sistema. Este sistema sólo se aplica a aguas residuales de alta carga orgánica como las provenientes de azucareras, industria láctea, cerveceras, etc.

Figura 61

Digestores de mezcla completa y digestor de flujo pistón



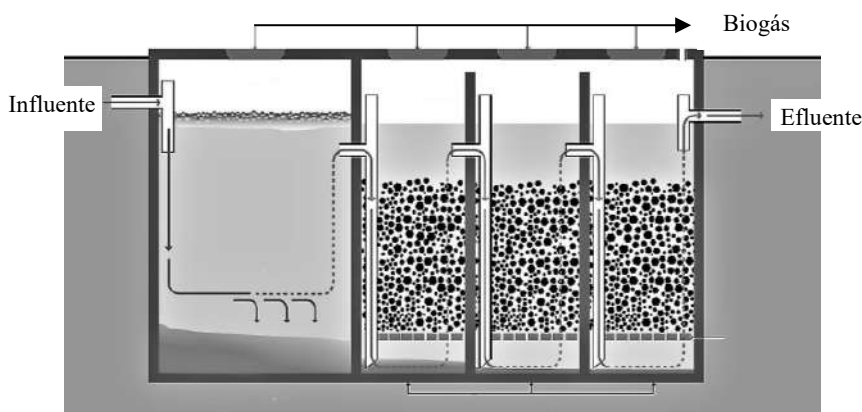
Nota: Figura de *Desarrollo del estudio de factibilidad técnico y económico de un sistema de biogás productivo para la finca San Ramón, de la Cooperativa Multisectorial El Rey, R.L., (COMMUREY), figura 26 (p.56), por González (2016), BioGas* Nicaragua,
https://www.researchgate.net/publication/330638550_Estudio_de_Factibilidad_Tecnica_y_Economica_del_Proyecto_de_Planta_de_Biogas_en_el_Sector_Lechero_de_la_Cooperativa_Multisectorial_El_Rey_R_L_COMMUREY.

- ✓ **Digestores de flujo en pistón:** es útil para residuos “secos” y “semi-secos” y el material de alimentación que se introduce contiene sólidos totales entre un 20 y un 40%, estos equipos son tanto de forma vertical como horizontal. Son denominados de flujo pistón debido a que el sustrato que ingresa es empujado por el sustrato que ingresa posteriormente en forma de pistón o de tapón en virtud de su forma tubular, que por lo general son horizontales y de concreto, presentan una cubierta de geomembrana que puede ser doble o sencilla donde es acumulado el biogás (ver Figura 61c). Es utilizado en el procesamiento de estiércol de bovino y porcino, desperdicios agroindustriales con un contenido de fibra elevado y en la fracción de naturaleza orgánica presente en los residuos sólidos domiciliarios.

- ✓ Digestores de filtros anaeróbicos: constituye un reactor biológico de lecho fijo que consta de una serie de cámaras de filtración que es utilizado para tratar aguas residuales, la cual pasa a través de los diferentes filtros quedando atrapadas las partículas y la materia orgánica es degradada por efecto de la biomasa que se encuentra activa en la superficie del material que compone al filtro. Este digestor ofrece ciertas ventajas como lo es que no requiere de energía eléctrica lo que disminuye considerablemente los costos de operación. Se usa particularmente en la digestión de caudales muy grandes de aguas que son residuales y que son fáciles de fermentar, en el tratamiento de lodos, vinaza, entre otros. (Ver Figura 62)

Figura 62

Digestor de filtros anaeróbicos



Nota: Figura de *Filtro anaerobio de flujo ascendente*, por Tilley et al. (2019), *Sustainable Sanitation and water management toolbox*, (<https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-saneamiento/recoleccion-y-almacenamiento/filtro-anaerobio-de-flujo-ascendente>).

3.7 Ventajas y desventajas de la digestión anaerobia.

Entre las ventajas del proceso, según Parra (2015), se mencionan:

- ✓ Su alta eficiencia en la eliminación de carga orgánica
- ✓ Simplicidad en la operación y en la construcción de los digestores
- ✓ Flexibilidad al ser fácilmente aplicado a pequeña y gran escala
- ✓ Poco requerimiento de espacio y bajo consumos energético
- ✓ Bajo requerimiento de químicos y nutrientes.

El mismo autor refiere que entre las desventajas están:

- ✓ Eliminación de patógenos y nutrientes bajos
- ✓ Periodos de inicio largos cuando no se dispone de un buen inóculo
- ✓ Posibilidad de que se produzcan malos olores
- ✓ Generalmente requiere la realización de post tratamiento para cumplir con los estándares de descarga de materia orgánica.

3.8 Aplicaciones de la digestión anaerobia a nivel mundial.

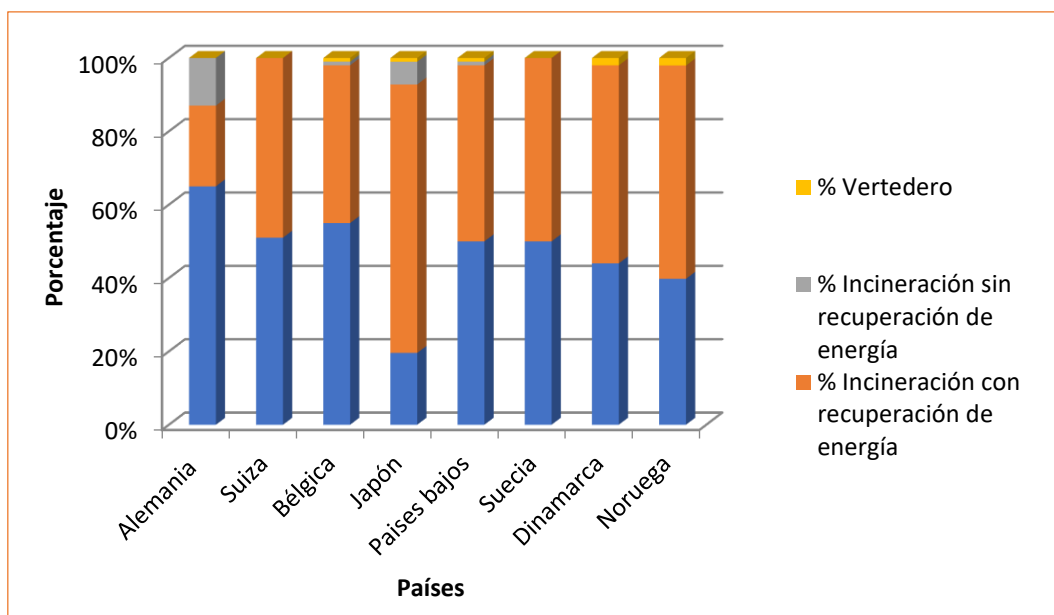
A continuación, se presenta en la Figura 63, los porcentajes de recuperación y disposición final de residuos sólidos en países identificados como líderes mundiales, donde se observa que los mayores porcentajes están centrados en el reciclaje y en la incineración con recuperación energética.

Refieren los mismos autores que la situación en Latinoamérica es muy diferente. Puerto Rico, Colombia, Ecuador y Bolivia son los países donde más se recicla con porcentajes no mayores a 14%, seguidos por Cuba, Uruguay y República Dominicana con el 8% aproximadamente, ocupando Venezuela el último lugar. El método que prevalece en estos países es el relleno sanitario con un 52%, seguido por vertederos abiertos con un 26,8%.

Sin embargo en diversos países de América Latina como Ecuador, Argentina, Brasil, Colombia, México, Venezuela y Chile, entre otros, están implementando la digestión anaerobia para el aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos que son de naturaleza orgánica, un ejemplo de la aplicación de este método lo representa la Planta de biogás en Carlos Tejedor en Buenos Aires Argentina, ubicada en una unidad ganadera que cuenta con aproximadamente 500 animales y que surge en el marco del Programa Provincial de Incentivos a la Generación de Energía Distribuida (PROINGED) y del Sistema de Transacciones Físicas y Económicas de Energía Eléctrica Distribuida (SIsTFEED), donde se encuentra como objetivos del proyecto la producción de biogás y biol, con la utilización de un biodigestor de mezcla completa o continua, y de estiércol bovino como insumo (Chomicki et al., 2020), el cual se puede observar en la siguiente Figura 64.

Figura 63

Porcentajes de recuperación y disposición final de residuos sólidos



Nota: Figura de *Referentes mundiales en sistemas de gestión de residuos sólidos (figura 1)*, por Segura et al. (2020), *Revista Espacios*, 41(17) (<https://www.revistaespacios.com/a20v41n17/a20v41n17p22.pdf>).

Figura 64

Planta de digestión anaerobia



Nota: Figura de *La biodigestión anaeróbica como oportunidad para generar bioenergía descentralizada en Argentina*, (p5), por Chomicki et al. (2020), *RedBioLAC 4*, (<https://redbiolac.org/wp-content/uploads/2020/12/RedBioLAC-2020-3M.pdf>).

Finalmente se puede mencionar que los residuos sólidos orgánicos se han convertido en una fuente de contaminación debido a su fácil descomposición y a la formación de lixiviados que tienden a contaminar los cuerpos de agua, así como la emisión de gases

que tienen la capacidad de retener los rayos ultravioleta produciendo el efecto invernadero.

Los procesos biológicos surgen como una alternativa para la degradación de la materia orgánica a través del empleo de microorganismos, los cuales son capaces de transformar los desechos orgánicos en una fuente de energía renovable como el biogás y la biomasa, y pueden ser realizados de forma aerobia y anaerobia.

Estos procesos son muy utilizados para tratar los desperdicios originados en la agroindustria facilitando la gestión para la conversión de la biomasa propiciando de esta manera una economía circular sostenible y contribuyendo a minimizar los compuestos residuales. Por otra parte, se producen diversos mecanismos de reacción útiles en otros procesos a nivel industrial, además de poseer la ventaja de no requerir una elevada demanda energética.

CAPÍTULO 6.

El compostaje como alternativa en la gestión de residuos sólidos orgánicos

1. Introducción

En la vida diaria y cotidiana del ser humano, así como también en las actividades agroindustriales, se generan grandes cantidades de residuos sólidos, tanto orgánicos como inorgánicos, que con frecuencia ocasionan impacto negativo al ambiente, por la disposición y tratamiento inadecuado de los mismos, por tal razón desde hace años se realizan estudios buscando alternativas para el procesamiento de dichos desechos y conseguir convertirlos en algo aprovechable para la actividad agro productiva. Entre estas alternativas está el compostaje, que no es más que la disminución gradual de la porción orgánica en los residuos sólidos por la actuación de distintas comunidades biológicas desarrolladas en condiciones que permiten ser controladas por el hombre.

Esta práctica es antigua, al igual que la agricultura y fue hasta hace pocas décadas que ha sido ligado con la filosofía de la conservación y aumento de la fertilidad del suelo. Actualmente ha ido en aumento el interés en conocer e implementar el procedimiento de compostaje en virtud de la necesidad por encontrar soluciones a la adecuada gestión de los residuos sólidos orgánicos en forma de compost siendo el producto obtenido mediante el procedimiento de compostaje y que es apropiado para proteger de la erosión al suelo y de otros problemas similares (Agencia de Residuos de Cataluña, 2016).

Este es un procedimiento que está caracterizado por lo siguiente la reducción de la cantidad de desperdicios facilitando el almacenamiento de los mismos, permitiendo el aprovechamiento agrícola de forma más flexible y minimizando los riesgos que a nivel sanitario surge en las operaciones anteriores; y también porque tiende a ser un producto robusto y versátil con un fundamento simple, el cual se puede aplicar a distintos tipos de residuos orgánicos y que requiere tecnologías poco sofisticadas.

El proceso de compostaje comprende la descomposición experimentada por los compuestos orgánicos, donde no interviene la mano del hombre, sino que los protagonistas son los microorganismos encargados de degradar esa materia orgánica existente. La elaboración de compostaje, es un procedimiento muy antiguo y utilizado

para lograr estabilizar los residuos, el producto obtenido es rico en los nutrientes necesarios para abonar las tierras de cultivo. En este capítulo se definirá la técnica del compostaje, las etapas del proceso, los microorganismos implicados y otros puntos interesantes para este tema.

2. Compostaje

2.1 Concepto de compostaje

La técnica del compostaje puede ser definida como un sistema para el procesamiento de residuos orgánicos biodegradables que está basada en una actividad microbiana compleja, que se desarrolla en condiciones controladas que suelen ser aeróbicas y generalmente termófilas, generando como resultado un producto estable que pueda ser almacenado sin problemas (Agencia de Residuos de Cataluña, 2016).

El compostaje consiste en “la transformación aerobia de la materia orgánica por parte de diversos tipos de agentes microbianos, como bacterias y hongos” (Bohórquez, 2019, p.9).

Otro concepto de este procedimiento de compostaje, según Contreras et al.(1995), es definido como: “la descomposición y estabilización por procesos biológicos de los sustratos orgánicos, frente a ciertas condiciones de temperaturas termófilas que permiten su desarrollo, como resultado del calor generado biológicamente, con la generación final de un compuesto estable, libre de microorganismos patógenos, que puede aplicarse de forma beneficiosa al suelo” (p.24).

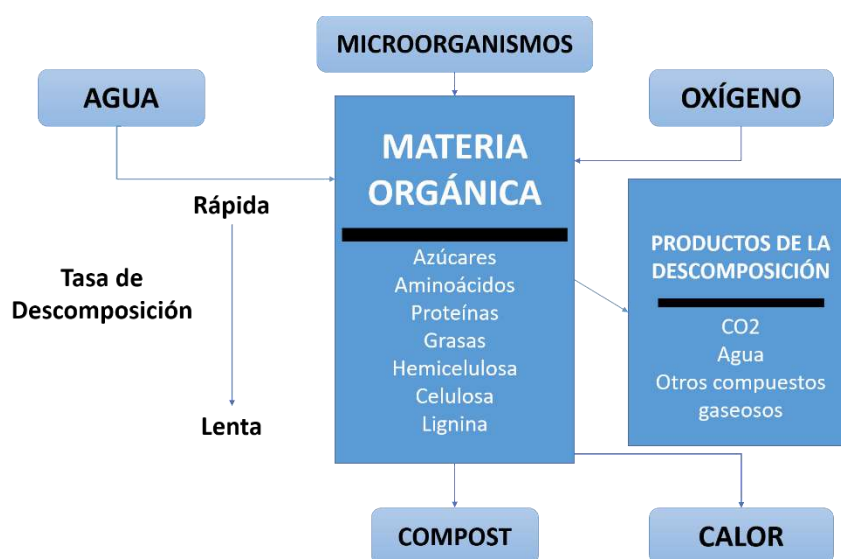
Campos-Rodríguez et al. (2016), en su investigación mencionan que “la técnica de compostaje al ser comparada con otras metodologías, como la biooxidación controlada, que proporciona mayor eficiencia, pues resulta más efectiva en la disminución de patógenos, en la eliminación de olores desagradables y, además, acorta el tiempo requerido para la estabilización del material” (p.7). De esta manera, esta técnica se define como un proceso biooxidativo que permite la descomposición y estabilización biológica de residuos orgánicos, con la finalidad de obtener un producto que es estable y libre de agentes patógenos, con minerales que permitan emplearlos para usos de abono.

De igual manera, Campos-Rodríguez et al. (2016), sostienen que el procedimiento de compostaje consiste en: “La descomposición biológica aerobia y la estabilización de sustratos orgánicos, bajo condiciones que favorecen el desarrollo de temperaturas

termófilas (entre 50 y 70°C), como resultado de la generación de energía calorífica, de origen biológico, obteniéndose un producto final estable, libre de patógenos y semillas, y el cual se puede aplicar al suelo beneficiosamente (p.30)”. En la Figura 65, se presenta de forma esquematizada el proceso para el compostaje.

Figura 65

Esquema del proceso de compostaje



Nota: Figura de *Evaluación técnica de dos métodos de compostaje para el tratamiento de residuos sólidos biodegradables domiciliarios y su uso en huertas caseras*, (p.2), por Campos-Rodríguez et al. (2016), *Revista Tecnología en Marcha*, 29(5) (<http://dx.doi.org/10.18845/tm.v29i8.2982>).

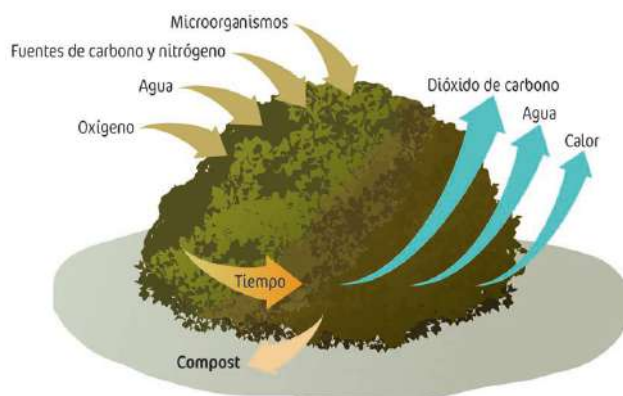
Durante este proceso actúan los microorganismos, en presencia de agua y oxígeno, sobre la materia orgánica compuesta por azúcares, aminoácidos, proteínas, grasas, hemicelulosa, celulosa y lignina, degradándola, obteniendo como resultado un producto estable llamado compost, generándose además con la descomposición, agua, dióxido de carbono (CO₂) y calor.

Este compost constituye un abono orgánico y ecológico, rico en nutrientes, necesarios para un mejor crecimiento en las plantas, el mismo puede obtenerse de una manera económica, ya que proviene de residuos vegetales, desperdicios domésticos, tierra, ceniza, cal y estiércol de animales herbívoros, garantizando así la optimización en la recolecta de desperdicios para asegurar un equilibrio ambiental, evitando contaminar las áreas y aprovechándolo como recurso para recuperar la estructura de los suelos erosionados, la Figura 66 muestra los componentes del compost.

El compost surge como producto de la biodegradación de los compuestos de origen animal y vegetal por la actuación de miles de microorganismos (bacterias y hongos). Tiende a ser un producto químicamente estable, de olor agradable y con propiedades nutricionales beneficiosas para la tierra y las plantas.

Figura 66

Estructura del compost



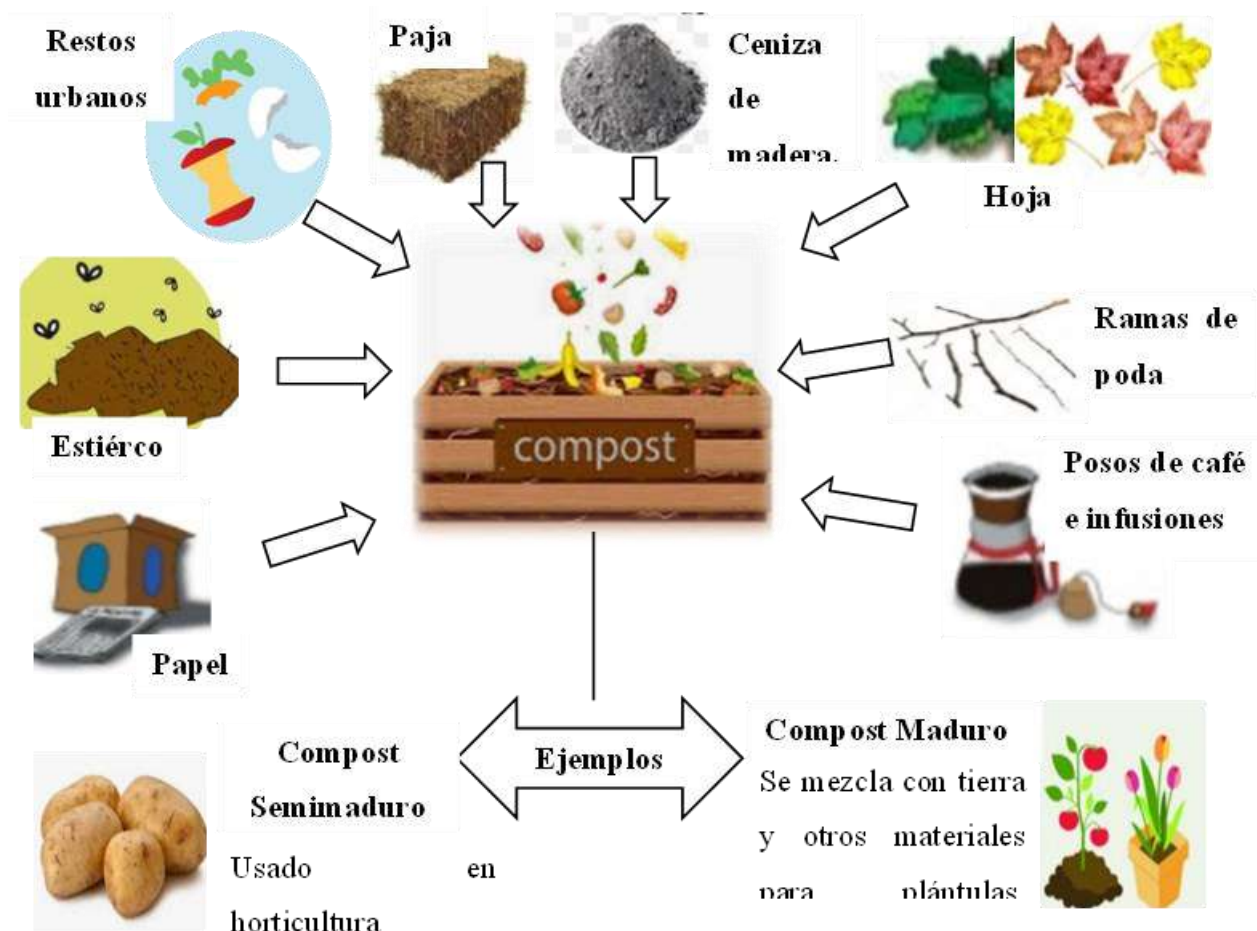
Nota: Figura de *Guía práctica para el diseño y la explotación de plantas de compostaje*, (p.8), por Agencia de Residuos de Cataluña, (2016), (https://residus.gencat.cat/web/.content/home/lagencia/publicacions/form/GuiaPC_web_ES.pdf).

2.2 Materia prima utilizada en el proceso de compostaje

Realizando un resumen de lo anteriormente mencionado el compost es definido como un abono orgánico y ecológico, rico en nutrientes, necesarios para el crecimiento apropiado de las plantas, el mismo puede obtenerse de una manera económica, ya que proviene de residuos vegetales, desperdicios domésticos, tierra, ceniza, cal y estiércol de animales herbívoros, garantizando así un proceso de optimización en la recolecta de desperdicios para asegurar un equilibrio ambiental, evitando la contaminación y aprovechándolo como recurso para la recuperación de la estructura de la tierra erosionada.

Figura 67

Materia prima para compostaje



Nota: Elaboración propia, 2022

Para obtener un compost que tenga un contenido adecuado de compuestos útiles, una baja cantidad de impurezas o contaminantes y una reducida carga de patógenos, resulta importante tener presente dos factores principales: un manejo adecuado del proceso y una correcta composición inicial de los compuestos utilizados como insumos (Huerta et al., 2010).

Haciendo énfasis en la correcta proporción o composición inicial de los insumos, resulta conveniente destacar que la materia orgánica fermentable es de suma importancia ya que constituye el sustrato y la fuente de nutrientes de los microorganismos que forman parte en el proceso. Además de disponer de las cualidades físicas adecuadas aseguran el correcto acondicionamiento y acceso a los nutrientes, oxígeno y agua por parte de los microbios (Huerta et al., 2010).

Para Salazar (2014) en el proceso de elaboración del compost como materia prima se puede utilizar cualquier material orgánico fermentable o biodegradable siempre y cuando no esté contaminada. En la figura 67 se muestran las principales materias primas que se desarrollaran más adelante.

- Restos de cosecha o subproductos agrícolas: suelen ser empleados en la preparación de compost o como cama, restos vegetales como: frutas, hojas, tubérculos que contienen cantidades considerables de nitrógeno y poco carbono y también restos vegetales más desarrollados como: ramas, troncos, tallos, restos de la cosecha, así como restos que resultan de la trilla y la molienda.
- Residuos forestales: incluye restos de árboles, abonos frescos, cortes de césped, hierbas, hojas y ramas que constituyen una fuente importante para producir compost, esto se debe a que contienen cantidades importantes de celulosa, así como también de lignina. Es importante mencionar que su descomposición puede tardar entre 6 meses a 2 años siendo recomendable que se mezclen en pequeñas cantidades y combinándolos con otros compuestos.
- Restos urbanos: hace referencia a todos los restos orgánicos que proceden de los hogares y cocinas, constituidos por restos de las frutas y de hortalizas y restos de animales de mataderos. Estos materiales están constituidos por la fracción biodegradable de los desperdicios urbanos, que también incluye cartón, papel, restos de comida, entre otros. Respecto al contenido que representa el material orgánico es del 68 % de los desperdicios urbanos. La calidad del compost depende directamente de los componentes del mismo.
- Residuos agroindustriales: constituyen aquellos residuos que son generados de los procedimientos de la industria de productos como maíz, hortalizas, trigo, cacao, madera, café, entre otros.
- Estiércol de animales: en estos se encuentra principalmente el estiércol de vaca y contenido del tubo digestivo de animales ganaderos, aunque también son

utilizados el estiércol de animales como gallinaza o conejilla, y también las aguas residuales de los mataderos o de instalaciones destinadas a transformar los subproductos animales.

- Complementos minerales: estos son requeridos para mejorar las deficiencias de algunas tierras.

2.3 Factores que intervienen en el proceso de compostaje

Resulta de suma importancia considerar los factores físicos, químicos y biológicos que influyen en el metabolismo de los organismos microbianos intervinientes en el procedimiento de compostaje, con el objeto de acelerar la descomposición de los restos empleados y garantizar que es obtenido un producto de excelente calidad biológica y química; así como los requerimientos ambientales óptimos, ya que determinan la velocidad de las reacciones de oxidación y las características físicas y químicas del compost obtenido.

En ese sentido, las condiciones establecidas y que deben cumplirse durante el desarrollo del proceso, se exponen a continuación (Bohórquez, 2019; Campos-Rodríguez et al., 2016; Córdor, 2015; Salazar, 2014):

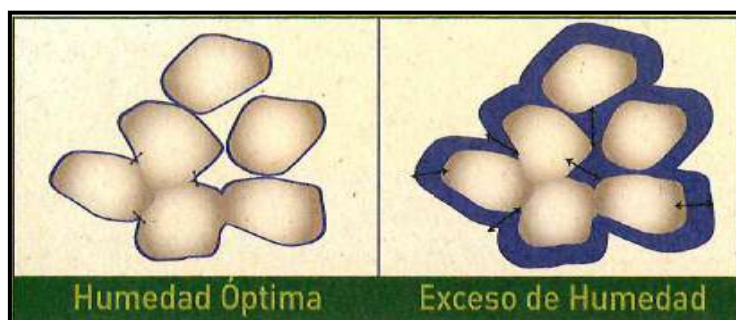
- Temperatura: durante el proceso de compostaje este factor es considerado como indicador del mismo ya que se inicia con una temperatura ambiente y luego va aumentando al incrementarse la actividad realizada por los microorganismos. Se consideran como temperaturas óptimas las que oscilan entre 35 y 55 °C para lograr eliminar los microorganismos que son patógenos, los parásitos y todas las semillas que resulten objetables. Los procesos de compostaje aerobios logran funcionar en los dos rangos de temperatura, o bien en el mesofílico 30-38°C o bien en el termofílico 55-60°C. El aumento en la temperatura alcanzada en los residuos durante la fermentación se produce por reacciones exotérmicas que están asociadas con el metabolismo respiratorio. En los sistemas de compostaje con pilas estáticas aireadas y en biorreactores se puede regular la temperatura supervisándola y controlando la entrada de aire. Para el compostaje en hileras se puede controlar la temperatura indirectamente modificando la regularidad de volteo. En general la pila caerá de 5 a 10°C después del volteo, pero dentro de unas horas volverá a su nivel anterior. Cada

especie de microorganismos (hongos, bacterias y actinomicetos) posee un rango de temperatura óptima de desarrollo. Así, para los criófilos de 5 a 15°C, para los mesófilos de 15 a 45°C y para los termófilos de 45 a 75°C, la especie de estos que consiga ser favorecida por un rango de temperatura podrá descomponer los componentes orgánicos presente en el residuo mientras la utiliza como su fuente para obtener energía y obtención de materiales para reproducirse. Los microorganismos producen calor mientras van degradando los componentes orgánicos mediante reacciones exotérmicas. Este calor hace que ocurran cambios de temperatura en la pila, alcanzándose temperaturas de hasta 75°C. Cuando las temperaturas son muy altas, muchos microorganismos importantes para el compostaje mueren y otros se inhiben debido a que están en forma de esporas. La transformación óptima sería 15 días a 45°C y luego permitir que se eleve la temperatura hasta 60-70°C para eliminar hongos, los cuales desaparecen a los 50°C.

- **Humedad:** se establecen niveles óptimos entre 40-60%. Si el contenido es mayor a este valor, el agua llenará todos los poros y el proceso se volvería anaeróbico, provocando la putrefacción de toda la materia orgánica. Por el contrario, cuando la humedad tiende a ser muy baja, también tiende a disminuir la actividad de los microbios y la descomposición será más lenta. La humedad suele ser ajustada al mezclar los componentes o por la adición de agua. Cuando la humedad del compost cae por debajo del 40% se disminuye la velocidad de la fermentación. Siendo este componente muy necesario para la nutrición de los microorganismos ya que el agua es el medio donde se disuelven los nutrientes. (Ver Figura 68).

Figura 68

Contenido de humedad en la masa de compostaje



Nota: Figura de *Manual de compostaje. Manual de aprovechamiento de residuos orgánicos a través de sistemas de compostaje y lombricultura en el Valle de Aburrá*, (p.37), por Sepúlveda & Alvarado, (2013), (<https://www.metropol.gov.co/ambiental/residuos-solidos/Documents/cartillas/Manual%20de%20Aprovechamiento%20de%20Residuos%20Organicos.pdf>).

- **Oxígeno:** por ser el compostaje un proceso aeróbico, la actuación del oxígeno es indispensable. Su concentración va a depender del tipo de material, su textura, su humedad, regularidad en el volteo, así como por la utilización o no, de aireación forzada. El oxígeno debe ser suficiente para poder mantener actividad microbiana, sin generar condiciones anaerobias capaces de intervenir desfavorablemente en el proceso, causen la emanación de olores y el producto sea de calidad inferior. El valor de oxígeno menor al 10%, permite que ocurran condiciones anaerobias. La concentración óptima de este componente es del 5-15% de O₂. La aireación propicia la pérdida de CO₂. Es de gran importancia el voltear la pila de compostaje no solo para suministrar aire sino también para homogenizar la mezcla y tratar que en las diferentes zonas de la pila se mantenga uniforme la temperatura.
- **pH:** este factor constituye uno de los valores para el control del proceso pues permite evaluar el sistema microbiano y la estabilidad de residuos. Este valor influye sobre la actuación de los microbios, y también en la temperatura del compost la cual varía con el tiempo mientras ocurre el proceso de compostaje. Con frecuencia, los hongos soportan un rango de pH comprendido entre 5 y 8; por su parte las bacterias son capaces de tolerar un rango entre 6 y 7,5. El pH del material en fermentación tendrá variaciones según el perfil pH-tiempo. Durante los días iniciales del proceso el pH disminuye a 5 o por debajo de este a causa de la acción de los microbios que comienzan a degradar los componentes orgánicos presente y a transformarla en ácidos que ocasionan la acidificación del medio, durante esta etapa la masa orgánica está a la temperatura ambiental, luego comienza la reproducción de los organismos mesofílicos y comienza a subir vertiginosamente la temperatura. Entre los compuestos producidos en esta fase inicial se encuentran los ácidos orgánicos simples que ocasionan una caída del pH. Luego de 3 días, la temperatura alcanza la etapa termofílica y el pH empieza a elevarse hasta 8-8,5, debido a que el nitrógeno presente es convertido en amoníaco por la acción de las bacterias del género *Nitrosoma* y

Nitrobacter, alcalinizando así el medio y ocasionando un aumento del pH hasta valores mayores de 11. Luego el pH baja ligeramente en la fase de enfriamiento llegando al rango de 7-8 productos del agotamiento de los componentes orgánicos al degradarse, cesando así la actividad de los microbios. Si al airear no se hace de forma adecuada se desarrollarán condiciones de anaerobiosis, entonces el pH tiende a caer hasta 4-5 aproximadamente retrasándose el proceso.

- Tamaño de las partículas, porosidad y estructura, son características que tienden a afectar el proceso, ya que limitan o favorecen la aireación, y de igual manera la descomposición. Muchos de los componentes que conforman los residuos sólidos son de forma irregular y el tamaño de estos va a afectar la superficie de contacto. Esta irregularidad puede ser reducida de forma sustancial al triturar los componentes que son orgánicos antes de su fermentación. El tamaño que tengan las partículas tiene influencia en la densidad bruta, en la fricción interna, sobre las características que posea el flujo y sobre las fuerzas de arrastre de los materiales. Por otra parte, se tiene que un tamaño de partícula deseable es menor de 5 cm, ya que incrementa la velocidad de las reacciones desarrolladas a nivel bioquímico en la evolución del proceso.
- Relación C/N equilibrada: tanto el carbono como el nitrógeno son dos de los constituyentes más básicos que poseen los componentes orgánicos, el nitrógeno se necesita para que se desarrollen los microbios y el adecuado funcionamiento a nivel celular en los mismos, mientras que el carbono es utilizado por estos para el suministro de energía. Una relación adecuada de C/N es de 25-35, y cambia en función de los constituyentes iniciales que constituyen el compost. Este resulta ser el factor ambiental fundamental del compostaje, los materiales introducidos en la compostera tienen que presentar nutrientes, pero más importante que las cantidades es la proporción existente entre los dos nutrientes principales carbono y nitrógeno. La concentración de carbono requerida es considerablemente mayor a la requerida de nitrógeno, porque los microorganismos la usan como su fuente de energía (perdiéndose como CO₂) y porque es parte constituyente del material celular en una cantidad más alta que la del nitrógeno (utilizado en la síntesis proteica). Si la fermentación es adecuada, la relación C/N disminuirá mientras avanza el proceso. Si

el excedente de carbono es muy alto, la actividad de los microbios se retarda y se prolonga la fermentación. Si la relación C/N es alta durante el proceso de compostaje se retrasa la descomposición. Si la relación C/N es inferior ocurre un fenómeno de auto regulación a través del cual se pierde el excedente de nitrógeno como amoníaco, el cual no afecta negativamente al compostaje directamente, pero se pierden nutrientes como consecuencia.

Según, Sepúlveda & Alvarado (2013), un procedimiento para calcular la proporción entre las mezclas sería aplicando la ecuación siguiente:

$$R = \frac{(Q_1(C_1X(100 - M_1))) + (Q_2(C_2X(100 - M_2))) + (Q_3(C_3X(100 - M_3)))}{(Q_1(N_1X(100 - M_1))) + (Q_2(N_2X(100 - M_2))) + (Q_3(N_3X(100 - M_3)))}$$

R = Relación C/N de la mezcla de abono.

Qn = Masa del material (“tal cual” o “peso húmedo”).

Cn = Carbono (%) del material n.

Nn = Nitrógeno (%) del material n.

Mn = Contenido de humedad (%) de material n.

En la Tabla 8, se evidencian los valores establecidos de referencia de humedad, materia orgánica, carbono, nitrógeno en diversos tipos de materia prima empleada para la preparación de compostaje.

Tabla 8

Valores de referencia de Materia Orgánica (%), Humedad (%), Nitrógeno (%), Carbono (%), relación Carbono Nitrógeno en insumos para Compostaje

Material orgánico	Composición aprox. Base seca		Relación C/N	% Humedad	Peso (kg)	N (%)	C (%)
	% Carbono	% Nitrógeno					
Porcinaza	40	3,1	13	80			
Papel periódico	40	0,1	400	5			
Residuos de comida	34,95	1,875	19	69	270	5,0625	94,365

SISTEMAS DE TRATAMIENTO Y VALORIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

Méndez P., Arcos, J., Ureta, R., Freytez E.

ISBN 978-987-82816-3-6

Pulpa de café	40	2	20	60				
Restos de fruta	56	1,4	40	80				
Cascara de arroz	36	0,3	120	14				
Césped cortado	58	3,4	17	82				
Hojas verdes	49,8	3,1	16	70				
Hojas secas (hojarasca)	48,6	0,9	54	38				
Bovinaza	47,5	2,5	19	81				
Equinaza	48	1,6	30	72				
Estiércol de ovejo	43	2,6	17	67,5				
Gallinaza	45,5	7	7	68,5				
Aserrín	40	0,1	400	10	25	0,03	10	
Viruta de madera	40	0,1	400	5				
Urea	0	46	-	0				
Pollinaza	26	2,3	11	50				
Material de rechazo	37,68	2,13	18	35	72	1,5	27,1	
				Total (Kg):	367	6,63	131,	
						% C	35,8	
						% N	1,84	
						C/N	21,6	

Nota: Tabla de *Cornell composting*, (p8.), por Richard et al. (1995), Dept. of Agricultural & Biological Engineering New York State College of Agriculture and Life Sciences, (<http://www.cals.cornell.edu/dept/compost/>).

- Mezcla/siembra: los 2 factores capaces de afectar en la incorporación de los constituyentes orgánicos presentes en los RSU utilizados para compostaje son el porcentaje de humedad y la relación C/N. Generalmente se necesita un análisis de laboratorio para determinar cómo debería ser la incorporación de los diversos materiales orgánicos para el compostaje aerobio. Si los constituyentes orgánicos de los RSU contienen cantidades significativas de papel u otros sustratos ricos en carbono, se pueden mezclar otros materiales orgánicos tales como residuos de jardín, estiércol o lodo presentes en las aguas residuales.
- Mezcla/volteo: realizar una mezcla de los compuestos orgánicos al inicio es esencial, ya que permite el aumento o disminución del contenido de humedad hasta el nivel que es considerado como óptimo. La mezcla puede ser utilizada para conseguir una

distribución más uniforme de nutrientes y microorganismos. Voltear los constituyentes orgánicos durante la evolución del compostaje, es una operación de gran importancia para el mantenimiento del proceso aerobio. Como la etapa de volteo está sujeta al contenido de humedad, las características particulares que poseen los residuos o los requerimientos de aire en la pila, se hacen imposible establecer una frecuencia mínima o máxima del número de vueltas. En términos generales para un residuo orgánico con una humedad del 66%, y un periodo de compostaje de 15 días se ha sugerido la primera vuelta al tercer día, desde entonces se debería voltear cada dos días hasta un total de 4 o 5 vueltas.

- Control de patógenos: la eliminación de los organismos patógenos es una parte importante del diseño a la hora elaborar compost, pues esta afectará el comportamiento tanto en la temperatura como a la aireación. Sobre este particular, la especie bacteriana Salmonella puede ser destruida en 15 a 20 minutos a 60°C o en 1 hora a 55°C. Gran parte de los patógenos se destruyen rápidamente cuando el compost está sometido a unas temperaturas de aproximadamente 55°C. Solamente unos pocos pueden sobrevivir hasta 67°C durante poco tiempo. Se pueden eliminar todos los microorganismos patógenos dejando que la pila alcance la temperatura de 70°C durante 1 o 2 horas.
- Grado de descomposición: los métodos para medir el grado de descomposición son: caída de temperatura, grado de capacidad de autocalentamiento, cantidad de compuestos orgánicos descomponible y resistente, subida en potencia redox, captación de oxígeno y crecimiento de hongos. El análisis en laboratorio de la demanda química de oxígeno (DQO) y el ensayo de la lignina proporcionan un control rápido para determinar el grado de descomposición. El valor en la DQO bajo y un contenido de lignina mayor del 30% son indicativos de un compost estable.

La Tabla 9 resume brevemente los factores específicos a considerar para garantizar la calidad del compost

Tabla 9*Especificaciones referenciales de la calidad del compost*

Factor considerado	Intervalo aceptable	Valor óptimo
Composición inicial de la mezcla, relación C/N (%)	25 a 35: 1	30: 1
Potencial de hidrógeno en la mezcla inicial, pH (a)	5.5 a 8.0	7
Contenido de humedad presente en la mezcla durante el compostaje (%) (a)	40 – 60	60
Contenido de oxígeno presente en el aire que se encuentra dentro de la cámara diseñada para compostaje (%) (a)	5 - 15 %	Mínimo: 10%
Temperatura alcanzada durante la etapa termófila (°C) (a)	Entre los 35 y 65	60
Tamaño de las partículas de los materiales (cm)	En general de 1 a 5 cm y para materiales leñosos 1 a 2 cm.	1 - 2 cm

Nota: Tabla de *Modern composting technologies. Biocycle*, (p.5), por Chiumenti et al. (2005), *Journal of Composting Organics Recycling*.

2.4 Microbiología del proceso de compostaje

Este proceso ocurre gracias a que poblaciones mixtas de microorganismos aerobios, mesófilos y termófilos (bacterias, actinomicetos, hongos filamentosos) actúan favoreciendo de una manera eficaz y natural el deterioro de los diferentes residuos orgánicos. Este procedimiento se da por la reacción con el oxígeno de dichos residuos.

Para el logro de este evento biológico con éxito es necesario garantizar que se cumplan con parámetros desde el inicio del compost, tales como: proveer una mezcla de residuos lo suficientemente esponjosa que garantice una absorción de agua adecuada, una porosidad suficiente que favorezca una completa circulación del aire, se generen temperaturas elevadas, que exista la humedad adecuada y una oxigenación suficiente, estos son los factores principales que condicionan la sucesión de microorganismos mediante el proceso de compostaje.

La relación entre Carbono y Nitrógeno es un elemento decisivo para que ocurra la descomposición, porque el carbono aporta energía, mientras que el nitrógeno resulta indispensable para que ocurra el crecimiento además de un adecuado funcionamiento de

las células, esta relación debe ser 20:1, y ello debe estar presente al seleccionar la materia prima (Ver Tabla 8).

Durante este proceso los microbios mesófilos son considerados como los más eficaces para descomponer los compuestos de naturaleza orgánica, generando temperaturas altas que favorecen destruir los potenciales agentes patógenos vegetales y animales, y la muerte de semillas generadoras de malezas capaces de ser altamente perjudiciales para el posterior uso del producto obtenido al final.

Describir los microorganismos que participan en el procedimiento de compostaje resulta muy complicado, esto en virtud de que tanto las poblaciones como las comunidades varían considerable y constantemente, en base al desarrollo de temperaturas, disponibilidad de nutrientes, concentración de oxígeno, al agua acumulada, pH, y a medida que se eleva la temperatura, estas comunidades microbianas son reemplazadas por otras mejor adaptadas y teniendo estas una vida limitada.

En las primeras fases del proceso, las más predominantes son aquellas bacterias que son mesófilas. Después de subir la temperatura en el compost, predominan las bacterias termofílicas que conducen a hongos termofílicos que aparecen después de 5 a 10 días. En las últimas etapas o periodo de maduración ocurre la aparición de mohos y actinomicetos. Al no estar presentes los microbios en concentraciones que sean significativas para la degradación de algunos residuos considerados como biodegradables tal es el caso del papel de periódico, se hace necesaria su adición al material fermentándose como un aditivo o inóculo.

Entre los principales organismos que contribuyen en el compostaje se pueden mencionar:

- Organismos autótrofos: obtienen la energía proveniente de la radiación solar y el carbono orgánico mediante la fijación del CO_2 de la atmósfera mediante la fotosíntesis. Algunos son: bacterias fotosintéticas, algas, y plantas superiores.
- Quimiolitotrofos: obtienen la energía directamente de las reacciones químicas y fijan carbono orgánico mediante el CO_2 . En un medio aerobio habrá bacterias del tipo *Nitrosoma* y *Nitrobacter*. En ausencia habrá bacterias como *desulfovibrio* entre otras.
- Heterótrofos: los compuestos orgánicos son utilizados para obtener energía por oxidación enzimática de sustancias orgánicas con desprendimiento de

CO₂. Si el medio es anaerobio los fluidos orgánicos sufren una fermentación donde se libera energía.

- Bacterias: organismos unicelulares y su tamaño no es superior a una micra de diámetro, ni las 2 micras de longitud. Son las más numerosas del suelo y se presentan con una distribución irregular, localizándose en colonias asociados a fuentes de carbono. Se encargan de degradar en un primer momento los materiales introducidos en la compostera produciendo que se eleve la temperatura (Clostridium, Bacillus, Staphylococcus, Streptococcus).
- Pseudomonas fluorescentes: estas actúan como un “estimulador” en el crecimiento de las raíces y un protector frente a agentes fitopatógenos.
- Actinomicetos: es una bacteria propia de la tierra, parecida a los hongos con hifas productoras de micelios. Dentro del compostaje son los que producen olor a tierra húmeda, así como enzimas que descomponen sustancias que tienen la capacidad enzimática de degradar compuestos orgánicos complejos (celulosa, lignina), además tienen la capacidad de regular el microbiota rizosférica, (microorganismos que generan múltiples efectos beneficiosos en las plantas).
- Hongos filamentosos: son organismos heterótrofos aerobios, producen estructuras llamadas micelios. Generalmente se presentan como organismos con una vida libre. Se desarrollan en todo tipo de suelos y son tolerantes a la acidez. Estos participan en degradar los compuestos orgánicos, debido a su alta capacidad lignocelulolítica, es decir son capaces de degradar todos los constituyentes de las paredes celulares vegetales (pectina, celulosa, hemicelulosa, lignina) y constituyen la microbiota que se considera normal, y que están implicados en la destrucción de forma gradual en la solubilización de los diversos compuestos orgánicos que son más complejos y de compuestos que son inorgánicos.
- Protozoos: son organismos invertebrados, unicelulares y se pueden conseguir en horizontes asociados a restos vegetales y en descomposición (saprofitos). Consumidores de bacterias y de hongos, requieren humedad. Se alimentan tanto del compost, como de bacterias, hongos y actinomicetos.

Durante la elaboración de compost cuando la mezcla de desechos orgánicos no es adecuada el proceso tiende a volverse lento y el compost resultante es de mala calidad. Con el propósito de evitar estos inconvenientes resulta adecuado adicionar insumos que mejoren la composición química y los constituyentes de las pilas, entre los que se mencionan (Salazar, 2014):

- **Activadores:** son sustancias que se utilizan para estimular el deterioro de los constituyentes orgánicos que poseen una elevada cantidad de proteínas y aminoácidos. Dentro de estos cabe mencionar el excremento de vaca, ya que aporta una importante fuente de nutrición que acelera la reproducción de microorganismos y la destrucción de la materia.
- **Inoculantes:** resultan ser los cultivos especiales de cierto tipo de bacterias o medios aislados entre los que están los organismos encargados de descomponer la fracción orgánica. Estos inóculos se encargan de acelerar el proceso de elaboración compost y tienen como función:
 - Proporcionar un tipo de microorganismo necesario y que no exista en el material a compostar.
 - Aumentar la población existente de microorganismos.
 - Introducir microorganismos que resulten más efectivos que los presentes.
- **Enriquecedores:** resultan ser los fertilizantes comerciales que son incorporados al proceso, con el propósito de mejorar la calidad en los nutrientes presentes en el compost y obtener un excelente producto final.

2.5 Fases o etapas del proceso de compostaje

Dentro de este proceso donde ocurre la descomposición biológica, es de suma importancia el manejo para así obtener compost con excelente calidad y respetando el tiempo establecido, siendo necesario instaurar las mínimas condiciones que se requieren para el buen desarrollo de los microbios que participarán en dicho proceso. En este se distinguen las etapas que serán descritas a continuación (Organización Panamericana de la Salud, 2000; Salazar, 2014):

- **Etapas Mesófila:** corresponde al tiempo necesario que los microorganismos requieren para aclimatarsen a un medio nuevo y comenzar a multiplicarse. Aquí se inicia la descomposición biológica de restos sólidos, comenzando con una temperatura inicial ambiental, que va incrementado con la evolución de la

actividad bacteriana. El valor que se obtiene en esta etapa del pH es cercano 6 debido a la reacción ácida de los jugos celulares y a la actividad bacteriana (incrementada por el incremento en la temperatura) con formación de ácidos provocando que disminuya el pH, favoreciendo así el crecimiento de bacterias, levaduras, mohos y actinomicetos mesofílicos, y la temperatura va desde 20°C a 30°C. En esta fase se descomponen con facilidad los azúcares, almidón, proteínas y grasas, favoreciendo el suministro de energía lo que sugiere un aumento en la cantidad de microbios. Durante esta etapa las bacterias son las que predominan siendo responsables de gran parte de las reacciones de descomposición. El tiempo de duración de esta etapa puede abarcar un periodo de 24 a 72 horas y al final de ella la temperatura puede alcanzar más de 50°C.

- Etapa Termófila: se identifica porque su característica principal es el incremento de temperatura que va de 40°C a 60 °C, producto de la intensa actividad provoca la multiplicación de las primeras especies termófilas principalmente por hongos del grupo de actinomicetos (*Micromonospora*, *Streptomyces* y *Actomyces*) contenidos en los restos orgánicos en estado latente, esto garantiza la sanitización o higienización de elementos patógenos tanto vegetal como animal, así como eliminar semillas de malezas no deseables en el compost. El aumento considerable de la temperatura hace que bacterias que ya cumplieron su función de biodegradación declinen y den paso a microorganismos resistentes adaptables a estas altas temperaturas, permitiendo de esta manera que concurra suficiente población de microorganismos mientras exista material de restos o compuestos orgánicos. Especies de bacterias y de hongos termófilos entran en actividad hasta temperaturas alrededor de los 65°C, y en ese momento se logra el incremento en la actividad enzimática, la hidrólisis transformación de las grasas y el ataque de manera superficial sobre la celulosa y sobre la lignina formándose algunas sustancias. Esta fase es la que más se debe vigilar para asegurar que la pasteurización sea adecuada y así evitar una mineralización excesiva de llegar a prolongarse demasiado. Con relación a las bacterias responsables de degradar tanto las proteínas como los lípidos y las grasas, se han conseguido *Bacillus* (50-55°C), valores mayores a los 70°C permiten que prácticamente cese la actividad de los microbios. El medio se alcaliniza como consecuencia de la producción de

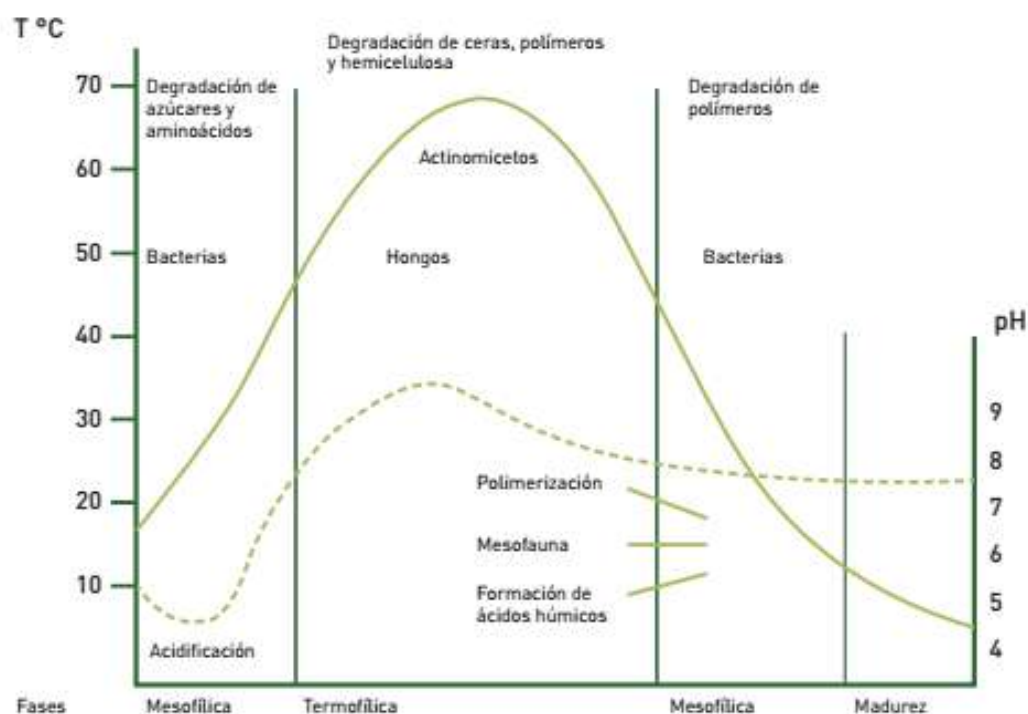
amonio. Los valores máximos de pH alcanzados oscilan alrededor de 8,5. La duración de este proceso es de unos 7 días en sistemas donde el compostaje es acelerado y 2 meses en sistemas de fermentación lenta, dependiendo del producto de partida y de las condiciones ambientales (Álvarez, 2008).

- Etapa de Enfriamiento: según algunos autores existe esta fase de alivio, donde ya ocurrió la escasez de nutrientes, muerte de microorganismos termófilos, existiendo así bajas de temperatura. Durante esta fase se lleva a cabo la degradación de las fibras de celulosa y de la lignina por medio de los hongos y las bacterias (*Mucor y Aspergillus*). Es aquí donde se comienzan a desarrollar de nuevo los microbios que son mesófilos que se encargan de utilizar como nutrientes a la lignina y a la celulosa restantes de la pila. Esta etapa es muy corta, dando inicio inmediatamente a la última fase que es la de maduración (Álvarez, 2008; Organización Panamericana de la Salud, 2000).
- Etapa de Maduración: en esta fase se produce la estabilización y la polimerización del compost a temperatura ambiente, disminuye el consumo de oxígeno y se elimina la fitotoxicidad, escasean los nutrientes y desciende la actividad bacteriana. Durante esta etapa hay una disminución en la actividad de los microbios termófilos y aparecen otros organismos, tales como los hongos los cuales continúan la descomposición. Los compuestos orgánicos son utilizados para sintetizar hormonas, coloides húmicos, antibióticos, vitaminas y demás compuestos que favorecen al desarrollo vegetal. La materia de naturaleza orgánica susceptible de aportar carbono se agota, disminuyendo la actividad biológica y disminuyendo también las bacterias termófilas, lo que ocasiona un descenso progresivo de la temperatura. El pH disminuye y tiende a ser neutro (Ver Figura 69).

Es considerada la fase final del proceso, donde hay una estabilización del producto final obtenido lo cual ocurre a temperatura ambiente, y en la evaluación física del producto, este debe estar libre de restos sólidos observándose un compost con características muy similares a las del suelo, en cuanto a color, olor, textura homogénea y rica en nutrientes. Esta fase es la más larga ocupando un periodo que va desde 3 meses a 1 año.

Figura 69

Etapas del compostaje, evolución de la temperatura y el pH



Nota: Figura de *Manual de compostaje. Manual de aprovechamiento de residuos orgánicos a través de sistemas de compostaje y lombricultura en el Valle de Aburrá*, (p.32), por Sepúlveda & Alvarado, (2013), (<https://www.metropol.gov.co/ambiental/residuos-solidos/Documents/cartillas/Manual%20de%20Aprovechamiento%20de%20Residuos%20Organicos.pdf>).

2.6 Sistemas que involucra el compostaje

Entre las principales ventajas del empleo de composteo para eliminar materia de desecho es que este evento se puede realizar en menor escala a campo abierto, al menor costo posible. Sin embargo en países desarrollados donde la actividad agroindustrial es el principal proveedor de desechos, donde los altos costos que causan los residuos agroindustriales al ser dispuestos deben ser asumidos por las mismas empresas generadoras, ocasiona que los mismos representen un problema no solo ambiental sino económico, por ende el hombre en su afán de corregir, se ve obligado a explorar para tecnificar dicho proceso, en pro de mantener un equilibrio entre la actividad que se desarrolla y proteger al ambiente y ecosistema, procurando que exista el mínimo impacto ambiental, reduciendo la contaminación, sumando la recuperación y enriquecimientos de los suelos. Es por ello que se han desarrollado diferentes métodos para tratar los restos

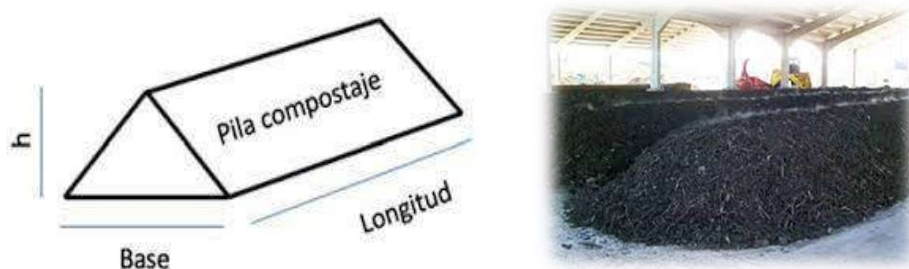
sólidos, que suelen ser llamados sistemas, que se van a clasificar como sistema de compostaje abierto y cerrado.

1) Sistema de compostaje abierto: este sistema consiste en el almacenamiento de restos sólidos formando una pila o montón, donde debe existir el movimiento para que ocurra la oxigenación y se lleve a cabo la actividad microbiana, promoviendo así el aumento de temperatura y se dé inicio a la degradación de dichos residuos. Este sistema es muy utilizado por su facilidad de instalación, a muy bajos costos y fácil manejo. Entre estos sistemas catalogados como abiertos se encuentran:

- a) Pilas estáticas o hileras: la tecnología con pilas es en realidad muy simple y es un sistema muy económico y utilizado. Los materiales se aglomeran sobre el piso o pavimento sin ser comprimidos excesivamente, considerándose la forma muy importante, siéndolo también la medida de la pila. Para lograr la aireación en este tipo de sistemas se coloca un conjunto de tuberías de aireación sobre la que es colocada la fracción orgánica de los restos sólidos. Estos residuos sólidos son agrupados formando pilas de 1 a 2 m. de altura, de 3 a 4 m de ancho y de 20 m. de longitud y se ponen sobre suelos con instalaciones de ventilación por tubos (Salazar, 2014). (Ver Figura 70)

Figura 70

Pilas estáticas o hileras



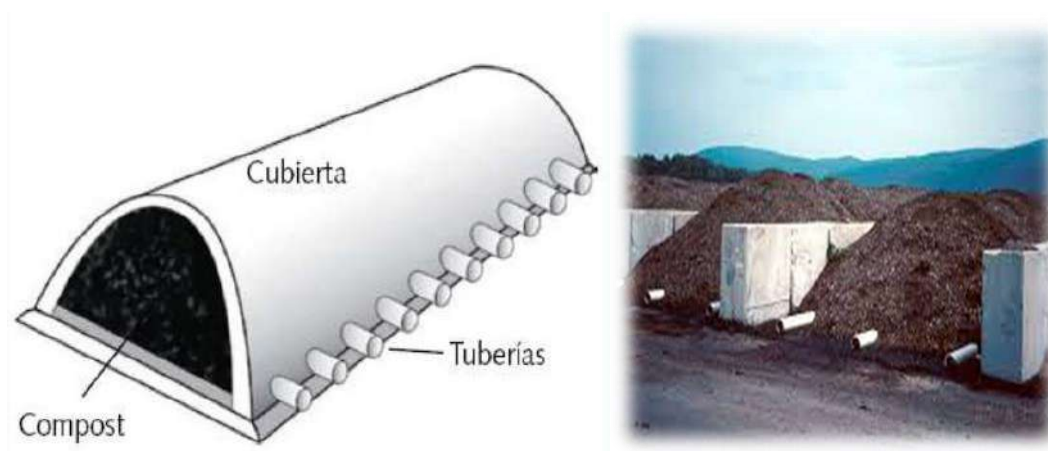
Nota: Figura a la izquierda de *Evaluación del desempeño de diferentes prototipos de compostadores en el tratamiento de residuos orgánicos*, por Arrigoni (2011), Trabajo fin de máster, Universidad Nacional del Comahue (https://www.researchgate.net/publication/230787246_Evaluacion_del_Desempeno_de_Diferentes_Prototipos_de_Compostadores_en_el_Tratamiento_de_Residuos_Organicos). Figura de la derecha de *Sistemas y técnicas para el compostaje*, por Junta de Andalucía (2002), (https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/sistemas_y_tecnicas_para_el_compostaje.pdf)

- b) Pila estática con aireación pasiva: este sistema es considerado muy apropiado pues tiene un coste/eficacia excelente, al ser comparado con otros como la

aireación forzada o pilas con volteo. El material es colocado en las pilas que son aireadas y ventiladas en forma pasiva por convección natural, sobre un conjunto de tuberías perforadas que se colocan en el fondo de la pila, el aire caliente viene subiendo desde el centro de la pila, creando un vacío el cual es parcial, que aspira todo el aire contenido en los lodos. La forma que debe tener la pila y tamaño adecuado de la misma dependerá del tamaño que tengan las partículas, la humedad que contengan, la porosidad y el estado de degradación, lo cual ejerce gran influencia en el movimiento de aire hasta la parte central de la pila. Suele colocarse una especie de cubierta porosa con el propósito de permitir que el flujo adecuado de aire que entra por medio de las cañerías, también esta permite retener los olores y controlar la humedad. (Ver Figura 71)

Figura 71

Pilas estáticas con aireación pasiva



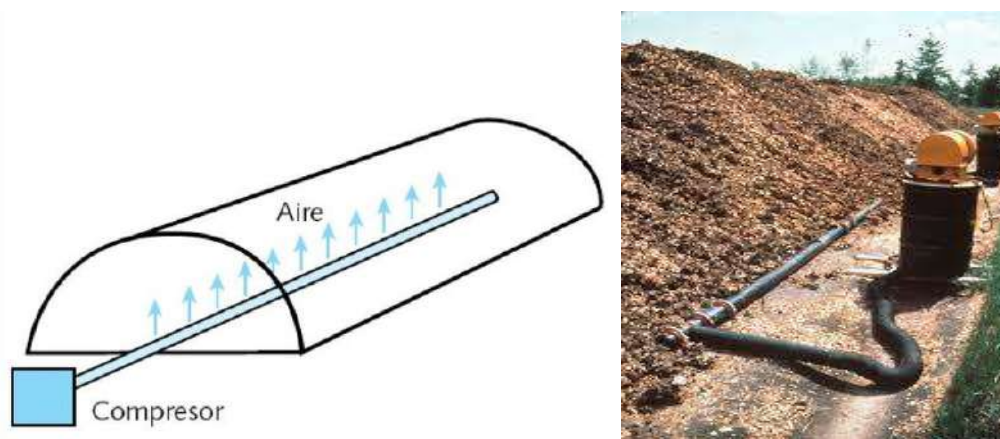
Nota: Figura a la izquierda de *Evaluación del desempeño de diferentes prototipos de compostadores en el tratamiento de residuos orgánicos*, por Arrigoni (2011), Trabajo fin de máster, Universidad Nacional del Comahue (https://www.researchgate.net/publication/230787246_Evaluacion_del_Desempeno_de_Diferentes_Prototipos_de_Compostadores_en_el_Tratamiento_de_Residuos_Organicos). Figura de la derecha de *Sistemas y técnicas para el compostaje*, por Junta de Andalucía (2002), (https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/sistemas_y_tecnicas_para_el_compostaje.pdf)

- c) Pilas estáticas con aireación forzada: estas pilas permiten mantener un control mayor en la concentración del oxígeno y a mantenerla en el intervalo más apropiado (15-20%) para de esta manera favorecer la actividad metabólica microbiana que permite la evolución del proceso. El suministro de oxígeno es realizado por diversas vías que pueden ser: succión o insuflado. El oxígeno que se aporta puede ser realizado de manera continua, por intervalos o unidos

a un termostato que al llegar a la temperatura aproximada de 60°C logra accionar un mecanismo de inyección de aire logrando que baje la temperatura hasta el valor deseado. Generalmente estos sistemas utilizan un compresor que se encarga de succionar aire hacia la parte externa o lo inyecta al interior y también sirve para controlar el aireado de la pila también permite enfriarla. (Ver Figura 72)

Figura 72

Pilas estáticas con aireación forzada



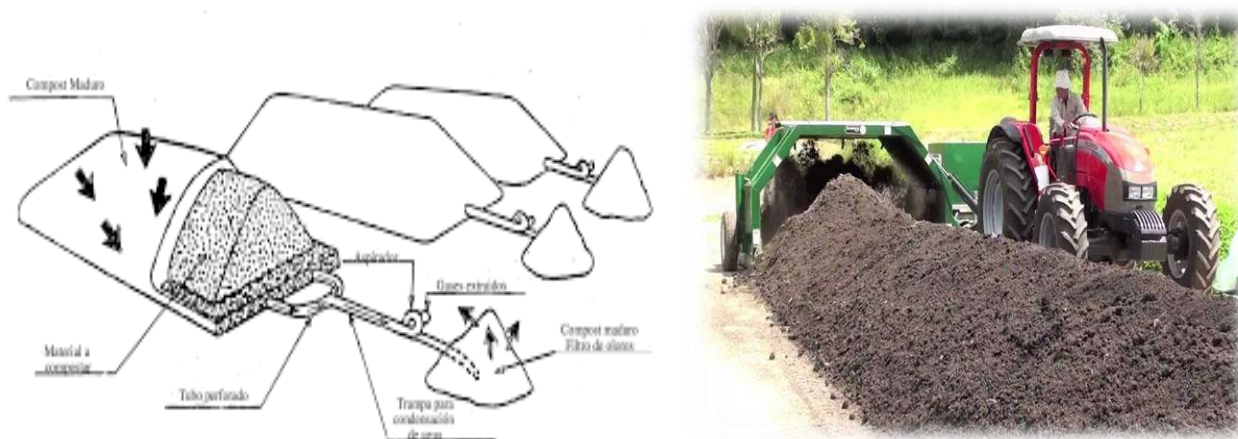
Nota: Figura a la izquierda de *Evaluación del desempeño de diferentes prototipos de compostadores en el tratamiento de residuos orgánicos*, por Arrigoni (2011), Trabajo fin de máster, Universidad Nacional del Comahue (https://www.researchgate.net/publication/230787246_Evaluacion_del_Desempeno_de_Diferentes_Prototipos_de_Compostadores_en_el_Tratamiento_de_Residuos_Organicos). Figura de la derecha de *Sistemas y técnicas para el compostaje*, por Junta de Andalucía (2002), (https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/sistemas_y_tecnicas_para_el_compostaje.pdf)

- d) Pilas con volteo: es un sistema sencillo y económico. Se caracteriza por el hecho de que dicha pila es removida periódicamente para homogenizar tanto la temperatura como la mezcla de residuos, con el propósito de suprimir el calor excesivo, controlar la humedad y así aumentar la permeabilidad de la pila mejorando su ventilación. Después de ser volteada la pila, su temperatura desciende entre 5 a 10°C. La frecuencia para realizar el volteo va a depender de la clase de residuo, del porcentaje de humedad, así como también de la velocidad con que se desea el proceso, siendo común realizar el volteo cada 6-10 días. Es usual que el volteo se lleve realice recogiendo y dejando caer el

material utilizando una pala cargadora para reconstruir la pila o utilizando una retroexcavadora. Realizar el mezclado de forma periódica permite la reintroducción de aire fresco en la cama además de favorecer la homogeneización de los materiales presentes en el compost. (Ver Figura 73)

Figura 73

Pilas con volteo



Nota: Figura a la izquierda de *Evaluación del desempeño de diferentes prototipos de compostadores en el tratamiento de residuos orgánicos*, por Arrigoni (2011), Trabajo fin de máster, Universidad Nacional del Comahue (https://www.researchgate.net/publication/230787246_Evaluacion_del_Desempeno_de_Diferentes_Prototipos_de_Compostadores_en_el_Tratamiento_de_Residuos_Organicos). Figura de la derecha de *Sistemas y técnicas para el compostaje*, por Junta de Andalucía (2002), (https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/sistemas_y_tecnicas_para_el_compostaje.pdf)

- 2) Sistema de compostaje cerrado: consiste en el almacenamiento de los restos sólidos en fermentadores o biodigestores, para poder vigilar las condiciones propias del proceso donde se lleva a cabo la descomposición, controlando la emisión de los olores y gases, y que pueda existir el aprovechamiento máximo del proceso. Los reactores se dividen en reactores de flujo vertical que suelen tener alturas mayores de 4 metros, pueden ser continuos y discontinuos y los reactores de flujo horizontal, de los cuales algunos pueden poseer depósitos rotatorios. Son sistemas que generalmente proporcionan un mejor control de los diversos parámetros del proceso, y un tiempo menor de residencia y la posibilidad de implementar un proceso continuo. Este sistema al ser tecnificado, aumenta los gastos de inversión para su instalación. La Organización Panamericana de la Salud (2000), en su informe establece que los

reactores son estructuras construidas generalmente de metal, que suelen ser de forma cilíndrica o rectangulares, donde es posible mantener controlados los parámetros como humedad y aireación, tratando que permanezcan constante, estos sistemas permiten acelerar las etapas iniciales del proceso. Culminadas estas etapas activas biológicamente, se procede a retirar del reactor el material en su totalidad y es acopiado con la intención de que se cumpla la maduración. Estos sistemas para compostaje en reactores casi siempre son realizados a nivel industrial. Suelen aplicarse en situaciones donde se recibe de forma diaria volúmenes importantes de desechos, y que ocuparían superficies muy extensas al realizarlo de otra manera (Organización Panamericana de la Salud, 2000). (Ver Figura 74)

Figura 74

Sistemas de compostaje cerrado



Nota: Figura de *Evaluación del desempeño de diferentes prototipos de compostadores en el tratamiento de residuos orgánicos*, por Arrigoni (2011), Trabajo fin de máster, Universidad Nacional del Comahue (https://www.researchgate.net/publication/230787246_Evaluacion_del_Desempeno_de_Diferentes_Prototipos_de_Compostadores_en_el_Tratamiento_de_Residuos_Organicos).

2.7 Parámetros para realizar la instalación del sistema para compostaje

La temática en torno a la instalación de un sistema para compostaje va depender del tipo de sistema que se necesite desarrollar y cuál va ser su uso final, siendo que su principal utilidad perfila con la de suprimir residuos contaminantes, en sitios donde las actividades derivadas de la agroindustria son el principal proveedor de desechos,

disminuyendo así el impacto negativo al ambiente que la deposición de los mismo acarrea.

Al momento de diseñar instalaciones dirigidas al compostaje es necesario asegurar un proceso que se desarrolle de forma correcta con el objetivo de disminuir:

- 1) Impactos negativos como las emisiones, lixiviados, polvo, sobre el entorno natural generados respecto a su ubicación.
- 2) Molestias que puedan generarse a los centros habitados cercanos a la instalación, pudiéndose mencionar:

- Malos olores.
- Tráfico excesivo de camiones.
- Ruidos.

Resulta necesario considerar algunos parámetros que favorecerán el buen funcionamiento de una instalación para el compostaje, mencionándose entre estos (Agencia de Residuos de Cataluña, 2016):

1. Emplazamiento: resulta recomendable que las instalaciones para el compostaje estén ubicadas:
 - Alejadas de sitios poblados, en virtud de llegar a generar olores desagradables durante la evolución del proceso. Debe respetarse una distancia mínima de 500 m hasta los núcleos poblados. Al producir olores fuertes resulta recomendable realizar un estudio preliminar de olores con el objetivo de identificar un impacto odorífero, resultando mejor su ubicación en zonas confinadas por tratamiento de gases
 - Deben ubicarse preferiblemente en zonas rurales o semirurales más que en zonas industriales.
 - De preferencia, aisladas de cauces de ríos, afluentes de aguas, con el objetivo de evitar su contaminación debido a que son generados lixiviados.
 - Ubicarlas en suelos donde nivel freático no sea superficial.
2. Vías de acceso: resulta un aspecto de suma importancia porque puede afectar de forma considerable la gestión e instalación y posible molestia a los vecinos. Es necesario:

- Tomar en cuenta las vías para el acceso (con capacidad para vehículos de carga pesada).
 - Si la vía de acceso atraviesa zonas pobladas
 - Calcular el total de vehículos que transitaran diariamente hacia las instalaciones de compostaje.
3. Emisión de olores: es necesario tomar en cuenta este aspecto con el objetivo de evitar generar molestias a los vecinos por los malos olores generados en las instalaciones, resultando recomendable tener en cuenta lo siguiente:
- Tomar en cuenta el tipo de restos que será tratado.
 - Capacidad instalada
 - Conveniencia de ubicar la planta en ese lugar considerando aspectos como la morfología del terreno, zona de inversión, zona elevada o deprimida entre otros.
 - Sistemas tecnológicos que garanticen unas condiciones aeróbicas.
 - La forma del sistema (abierto o cerrado).
 - Minimizar mediante biofiltro que se emanen olores.

2.8 Operaciones en una planta de Compost

Durante el inicio de cualquier sistema de compostaje es necesario esquematizar las actividades a desarrollar desde el inicio, con el objetivo de que lleve a cabo la descomposición del material de desecho en un tiempo establecido y así garantizar el buen funcionamiento de la planta. La descripción de forma breve del sistema operacional de una planta de compost se muestra como sigue (Agencia de Residuos de Cataluña, 2016):

- Recepción y almacenamiento de residuos (materia prima): implica recibir diversas variedades de desechos bien sean secos o húmedos, provenientes de plantas agroindustriales, de cultivos, trastos de origen animal (estiércol), en pequeñas o grandes cantidades (depende de la planta de compostaje).
- Proceso de mezcla: es necesario efectuar la homogenización de los distintos residuos, material biológico, activadores (estiércol), que participarán en el procedimiento de descomposición, para ello dependiendo del volumen el procedimiento se puede realizar manualmente o con maquinarias.

- Etapa de descomposición: etapa en la que se deben controlar los parámetros antes mencionados como lo es temperatura, humedad, oxigenación, pH, para asegurar la actividad desarrollada por los microorganismos que tienen la labor de descomponer la materia que es orgánica.
- Etapa de almacenamiento y maduración: durante esta se debe esperar el tiempo señalado, donde se debe efectuar la evaluación física del producto final y que este sea lo más parecido a la composición del suelo, respecto a características físicas como olor, olor, textura y sea un compuesto provisto de nutrientes.
- Procedimientos complementarios: dentro de esta fase ocurre la adición o agregado de químicos o sustancias activadoras complementarias como estiércol proveniente de animales herbívoros, melaza, agua, inoculación de microorganismos entre otros que pudieran promover rápidamente el proceso de descomposición (Organización Panamericana de la Salud, 2000).
- Uso final: su principal uso se avoca a la fertilización y a recuperar los suelos maltratados, no dejando de ser menos importante la utilización del compostaje como principal medio de reciclaje en aminorar la contaminación del ecosistema.

2.9 Tipos de compost

a. Compost de acuerdo al grado de madurez

Según Mallia et al. (2002), la clasificación del producto que es obtenido al final plantea tres grandes grupos:

- Compost joven o estable: es el material que es extraído de las composteras entre los 2 a 5 meses, en este se ha completado la primera fase de degradación y donde la temperatura ha alcanzado los 60°C. Este presenta un color grisáceo, es muy apropiado para utilizarlo como cama, así como para proteger el suelo de la erosión, las heladas, la desecación y la multiplicación de malas hierbas.
- Compost madurado: luego de cuatro meses o seis de obtenido y madurado el compost, esta muestra una coloración marrón muy oscuro y olor a la tierra del bosque. Además, al ser apretado en la mano, se puede observar una textura con una humedad adecuada, si se nota la humedad, pero no destila líquido. Butler et al. (s.f) citado por Agámez (2006) establece al grado de finalización del proceso,

siendo evaluado con la medición de cambios químicos, físicos y biológicos del sustrato.

- Compost curado: tiene un grado elevado de estabilización y mineralización, con una alta concentración de compuesto humus símil, con capacidad para actuar en forma inmediata en la fracción orgánica del suelo donde se aplique.

El compost según su nivel de calidad, puede ser clasificado basado en la Norma Chilena para (NCh2880.Of2004 Compost - Clasificación y requisitos, 2005) en las siguientes clases:

- Compost Clase A: este es un producto de gran calidad el cual cumple con los parámetros establecidos en la norma *NCh 2880 - 2004*, para el compost que entra en la clasificación de Clase A. El producto no tiene prohibición de uso, pues es sometido a una transformación en humus, pudiendo ser aplicado a macetas directas sin mezclarse.
- Compost clase B: este producto es de gran calidad cumpliendo con los parámetros establecidos en la norma *NCh 2880 - 2004*, para el compost clasificado como Clase B. El producto tiene algunas prohibiciones de uso. Para su aplicación es necesario una mezcla previa con otros productos adecuados.

b. Compost según la estabilidad y madurez en el proceso de compostaje

Según, López & Sainz (2011), “un compost inmaduro y sin estabilizar puede provocar muchos problemas durante su almacenaje, distribución y uso. Durante el almacenaje pueden originarse problemas de olores y disminuir la calidad del material por el posible desarrollo de componentes fitotóxicos” (p.13). Una vez el material ha sido esparcido por el suelo, la degradación progresiva posterior puede llegar a influir negativamente en el crecimiento normal de las plantas.

En este mismo orden de ideas, Contreras et al. (1995), manifiesta que la estabilidad es definida según la disponibilidad de materia orgánica o biodegradable, a su grado de descomposición. De igual manera, el compost considerado maduro es aquel que es apropiado para el buen crecimiento de las plantas y normalmente se asocia con el grado de humificación. Ello implica que, la estabilidad describe las condiciones que presenta el material, y es una propiedad objetiva y relativamente fácil de medir y cuantificar. La

madurez, sin embargo, depende del uso final que vaya a ser dado al material, siendo necesario que se valore si el compost producido es apropiado para el uso que será destinado. (p.25)

Es de hacer notar que todos estos métodos ofrecen información sobre las características del material, pero pueden tener limitaciones de interpretación. Muchos indicadores de estabilización son considerados como índices de madurez. Sin embargo, pueden arrojar resultados incorrectos cuando se aplican a diferentes tipos de compost, que puedan tener un origen muy diferente.

2.10 Evaluación de la calidad de un compost.

Para poder conocer la calidad del compost de manera previa a ser incorporado al suelo, se han generado un conjunto de técnicas e índices, que sirven para obtener la seguridad de no producir un efecto indeseable en los suelos como la inmovilización de nitrógeno por lo esencial que es este elemento en el crecimiento y buen desarrollo de las plantas. Rivero et al. (2004), establecen en su investigación, la forma como se puede estimar la calidad de un compost, la cual va desde prácticas muy rudimentarias, hasta determinar los parámetros químicos específicos o instrumentación de bioensayos. Desde esta perspectiva, las pruebas que permiten determinar la calidad se clasifican en dos grandes grupos: pruebas prácticas y parámetros químicos:

1. Pruebas prácticas de la calidad de un compost.
 - *Evaluación del aspecto:* se observa la modificación del color, desuniforme al inicio, y luego se oscurece, hasta llegar a casi negro, brillante y muy homogéneo, cuando finaliza el proceso (Mallia et al., 2002, p.28).
 - *Evaluación del olor:* en un compost maduro predomina un olor agradable, semejante al de tierra húmeda. El compost no debe presentar olores fuertes (compuestos de sulfuro, mercaptanos, gases) excepto un aroma característico a bosque. (NCh2880.Of2004 Compost - Clasificación y requisitos, 2005).
 - *Evaluación del volumen de la pila:* durante el compostaje la pila sufre una notable reducción de su volumen, que se estima en 1/3 del volumen inicial. (Rivero et al., 2004).
 - *Evolución del contenido de humedad:* hay una pérdida considerable del mismo en el compostaje, alcanzándose valores entre 30 y 35% cuando el material está

maduro. El contenido de humedad debe ser igual al 30% de su peso (NCh2880.Of2004 Compost - Clasificación y requisitos, 2005).

- *Evolución de la temperatura de la pila:* la temperatura en la pila se debe medir, y cuando esta es similar a la del ambiente circundante, se habla de un compost maduro y estabilizado (Rivero et al., 2004).
- *Evolución del pH:* se procede a determinar de forma periódica el pH, que se modifica desde un pH ácido al inicio, hasta un pH alcalino cuando el proceso ha finalizado (pH < 6,0: fase inicial; 6,0 < pH < 7,6: fase de estabilización; pH > 7,6: alto grado de estabilización de los compuestos orgánicos) (Rivero et al., 2004).

2. Parámetros químicos de la calidad de un Compost.

Diversos autores señalan los parámetros que sirven como índices de la calidad de un compost, entre estos se mencionan:

- *Relación C: N:* la proporción C/N del producto final, que desciende durante la elaboración del compost, llegando a valores < 20, característicos del compost que ha alcanzado la maduración y es estable. El compost se clasifica en base a los siguientes rangos de la relación C/N, según NCh2880.Of2004 Compost - Clasificación y requisitos (2005):

Compost clase A: (10-25)

Compost clase B: (10-40)

Compost inmaduro: (>50)

- *Análisis elemental:* parámetros de abonos orgánicos macronutrientes y micronutrientes (Ver Tabla 10). Según las Normas de Calidad de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 1991):

Tabla 10*Parámetros de abonos orgánicos*

Parámetros	Valor
Materia Orgánica (%)	35 – 50
Carbono Orgánico (%)	≥15
Fosforo (% P₂O₅)	1 – 2
Potasio (% K₂O)	0,2 - 0,8
Calcio (%)	6 – 15
Magnesio (%)	0,57
Sodio (%)	0,04 - 0,24
Cobre (ppm)	70 – 400
Manganeso (ppm)	100 – 500
Hierro (%)	1,4 - 2,6
Zinc (ppm)	200 – 1000
Ph	7 - 7,5

Nota: Tabla de *Normas de calidad de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura* (p7.), por FAO (1991).

2.11 Usos del compost

Al ser considerada la técnica de compostaje uno de los métodos de reciclaje por excelencia, ya que convierte un material orgánico desechable en un producto con gran valor en nutrientes y de aprovechamiento en las actividades agroproductivas se puede decir que existe un alto potencial de aprovechamiento y uso del compost, favorecido por su múltiple composición química, esto es manifestado por diversas alternativas existentes para su reutilización (Epstein, 1997).

Entre los usos del compost se puede mencionar:

- Mejorar las propiedades físicas del suelo: la cantidad de compuestos orgánicos propicia la estabilización de las partículas estables presentes en suelos agrícolas, disminuye la densidad aparente, incrementa la permeabilidad y porosidad y aumenta su capacidad para retener agua. Además, resultan suelos más sueltos y esponjosos.
- Mejorar las propiedades químicas aumentando la cantidad de macronutrientes como P, N, K y de micronutrientes, mejora la capacidad para el intercambio catiónico y se comporta como fuente y depósito de nutrientes importantes a la hora de cultivar.

- Mejorar la actividad microbiana en el suelo al comportarse como medio de soporte y alimentación de los microbios que dependen del humus y colaboran con su mineralización.
- El compost al ser un abono natural ayuda a mantener la actividad biológica de los suelos y aporta elementos nutritivos muy importantes y oligoelementos. Pero su función más importante en las mejoras al suelo es la reestructurante.
- La movilización de los oligoelementos que permanecen bloqueados en las distintas capas del suelo y su utilización por las plantas, siendo posible mediante los procesos desarrollados por los microbios. Las enzimas y los microbios actúan como catalizadores para que sea posible la absorción de un elevado porcentaje de los componentes nutritivos. Siendo el uso principal del compost el de reestructurante del suelo.

Como se ha mencionado anteriormente, desde hace algunos años la técnica del compostaje ha venido cumpliendo una función importante a nivel agronómico. Este proceso permite aprovechar los recursos naturales al máximo, al tiempo que se devuelven al ambiente, nutrientes y propiedades que contribuyen a renovar las propiedades del suelo y su diversidad biológica. Lo anterior revela que, un compost bien elaborado suministrará más fertilidad a los suelos y esto redundará en productivas cosechas.

Entonces se tiene que, el compostaje representa una técnica que involucra un proceso a nivel biológico aeróbico y termófilo, que al ser controlado correctamente permite que sea degraden los compuestos orgánicos para transformarlos en un producto estable, que puede ser utilizado como un fertilizante de uso agrícola. De allí que, este proceso permite la estabilización e higienización de los compuestos orgánicos presentes en los restos para posteriormente devolverlos al ecosistema.

Durante este proceso los microbios se encargan de actuar sobre los compuestos orgánicos biodegradable presente en diferentes residuos, entre los que pueden incluirse residuos orgánicos urbanos, restos de las cosechas, excrementos de los animales, y otros subproductos, para así producir un abono de excelente calidad.

Como complemento a lo antes expuesto, se tiene que, tanto las bacterias, como los hongos y los actinomicetos, son imprescindibles en el correcto desarrollo de este procedimiento de descomposición y de oxidación de componentes compostables.

Además, el actuar de diferentes organismos como hormigas, gusanos y escarabajos hace un pequeño aporte a este proceso.

Así que, es correcto afirmar que el compostaje constituye un proceso que permite reintroducir los restos orgánicos al ecosistema, aportando nutrientes y evitando extraer y utilizar energía y recursos nuevos, en una explotación agrícola.

Por lo tanto, se puede decir que el compost es el producto del compostaje de los compuestos orgánicos, que han sido estabilizados, higienizados y transformados en productos que son denominados como compuestos húmicos del suelo.

Estos compuestos, luego del proceso resultan libres de microbios patógenos, así como de semillas de hierbas extrañas. Además, el compost puede ser almacenado sin ningún problema, puesto que, al ser un producto muy estable e higienizado, no atrae vectores indeseables como insectos y patógenos.

Aunado a esto resulta importante señalar que el compostaje está siendo más considerado y empleado como uno de los procesos que es fundamental y ecológico en el procesamiento de los restos orgánicos industriales, agrícolas y urbanos.

Además de ser una solución al problema de los restos de naturaleza orgánica, el compostaje posee muchos beneficios, destacándose los siguientes:

- Aumenta la actividad de los microbios propios del suelo.
- Aumenta los niveles de compuestos orgánicos del suelo.
- Mejora la permeabilidad y la retención de agua en los suelos.
- Reduce la producción de fertilizantes que son sintéticos
- Mejora considerablemente la estabilidad y porosidad del suelo.
- Permite revalorizar los subproductos.
- Los sistemas agrícolas se hacen más sostenibles.

Adicionalmente, el compostaje permite la reducción de la cantidad de restos orgánicos generados, facilitando de esta manera su almacenamiento, permitiendo que sean aprovechados los subproductos agrícolas, y reduciendo el riesgo a nivel sanitario que implica la explotación agrícola.

Así pues, se tiene que un buen compost se convierte en una solución ecológica y eficaz para los problemas producidos por los compuestos orgánicos al ser estabilizados e higienizados con la implementación de un proceso que es controlado.

SISTEMAS DE TRATAMIENTO Y VALORIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

Méndez P., Arcos, J., Ureta,. R., Freytez E.

ISBN 978-987-82816-3-6

SISTEMAS DE TRATAMIENTO Y VALORIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

Méndez P., Arcos, J., Ureta,. R., Freytez E.

ISBN 978-987-82816-3-6

CAPÍTULO 7.

Aprovechamiento de residuos mediante la técnica del reciclaje

1. Introducción

Desde la antigüedad, el hombre en su plan de progreso para garantizarse a sí mismo comodidades que pueda asegurar su crecimiento, desarrollo y perpetuación en este mundo, vive en un constante consumismo de bienes y servicios, que han venido incrementando en correspondencia con el crecimiento poblacional, aumentando así la producción de residuos (Reyes C. et al., 2015).

Para dar inicio a este tema tan extenso y en concordancia con lo descrito en capítulos anteriores se comienza por definir el concepto de **Residuos** como productos generados por la actividad humana, bien sea en el ámbito doméstico, comercial, industrial, agrícola, entre otros; y que son considerados como desechables o inútiles (Antonio et al., 2016).

A finales del siglo XVIII las grandes industrias comenzaron a originar gran cantidad de bienes y servicios, su interés de crear inventos y tecnologías para optimizar la comodidad a millones de personas, promoviendo así el crecimiento de la actividad industrial y proporcionalmente el consumismo; sin tomar en cuenta el desgaste que producen a la naturaleza; trayendo como consecuencia secuelas sociales y ambientales (Reyes R., 2018).

El desequilibrio o pérdida de control en el manejo en cuanto a deposición, tratamiento y uso de los residuos o desechos sólidos, originados por alto nivel de consumismo, puede ocasionar un problema grave de salud pública y esto ocurre a nivel global, siendo aún más afectados los países desarrollados; lo que conlleva a que el mismo ser humano en alianzas con empresas, comunidades y entes gubernamentales estén en busca de la creación constante de programas para alivianar o reducir la molestia que ocasiona la generación de residuos, incrementando la importancia de contar con un sistema de gestión de residuos sólidos, no solo para evitar el impacto ambiental negativo que este

acarrea, sino para darle nueva vida útil a productos que ya fueron descartados como desechables (EPA, 2020).

Estos residuos lejos de producir un mínimo de comodidad lo que ocasiona es un problema a futuro relacionado con lo que es la devastación del medio ambiente, bien sea por contaminación o por el uso excesivo de los recursos naturales renovables y no renovables en el uso de estos productos que generan bienestar, es oportuno mencionar que existen dos grandes alternativas para minimizar este impacto: el reciclaje que es un proceso en el cual se selecciona y remueve materiales útiles de la corriente de desechos antes de que sean descartados definitivamente mediante la incineración, para dar inicio a un proceso de transformación de la materia prima y originar nuevos productos (Ponte de Chacín, 2008); y el compostaje definido en el capítulo anterior como un proceso biológico donde gracias a la actividad de microorganismos ocurre la biodegradación de materia orgánica, transformándola para su posterior uso, bien sea de fertilización o en la recuperación de la estructura de los suelos erosionados (Ponte de Chacín, 2008).

Dentro de estas propuestas de métodos para el manejo de residuos, que ya son ejecutadas en menor y gran escala a nivel mundial la más utilizada es el reciclaje como alternativa principal de clasificar según su origen y composición todos los productos desechados y darle utilidad; favoreciendo un equilibrio ambiental con el posterior aprovechamiento razonable de los recursos naturales (Reyes C. et al., 2015).

Es importante tener en cuenta que estas técnicas deben ir acompañadas de programas de educación ambiental dirigidos a la comunidad en general, sector industrial y empresarial, concientizando y formando un colectivo capaz de identificar y contribuir a minimizar el impacto negativo que ocasiona la generación de residuos. Además, con esta ideología se busca asegurar la posibilidad de que las generaciones futuras puedan disponer de los recursos naturales indispensables para su existencia (Baños & Gámez, 2019).

El cambio debe darse partiendo de la idea de remediar la problemática ocasionada al medio ambiente originada por el gran desarrollo económico y potencializar la sostenibilidad ambiental, es decir utilizar métodos que garanticen satisfacer la necesidades de un colectivo en el presente sin comprometer las generaciones del futuro;

crear conciencia en el ser humano que conlleve a disminuir el alto nivel de consumismo, sin que esto sea un motivo de desmejora en cuanto a la calidad de vida que el hombre ha ido perfeccionando hasta ahora, promover la reutilización de productos ya descartados y elaboración de nuevos productos a partir de esta materia prima, sin tener que utilizar recursos de la naturaleza, debe ser el objetivo principal para garantizar una producción sostenible (Reyes R., 2018).

Para iniciar este proceso de cambio es necesario ver al gobierno como única autoridad, y ente regulador de leyes, que obligan a las grandes corporaciones industriales a idear planes y aplicar estrategias que inciten a mantener en armonía el medio ambiente y promover la sostenibilidad ambiental. En el desarrollo del presente capítulo se presentarán conceptos de economía circular, como prevenir la generación de residuos, manejo adecuado de los residuos, como valorizar los residuos generados y descripción de la técnica del reciclaje.

2. Económica Circular

En el transcurso de la existencia y desarrollo del hombre, el mismo ha ido implementando modelos de producción y consumo que promueven el mantenimiento de los recursos en el tiempo, minimizan el consumo de materia prima y garantizan el aprovechamiento de residuos dándoles nueva utilidad, asegurando la sostenibilidad del planeta; uno de estos nuevos modelos es denominado Economía Circular. La idea de economía circular ya aparece en el libro de Pearce y Turner (1989), sin embargo, no es hasta el año 2015, donde se comienzan a ver importantes avances y aportes sobre este tema. Según cita textualmente Ellen MacArtur (2014), este modelo se fundamenta en el uso de energía renovable, la eliminación de productos químicos tóxicos que entorpecen la reutilización y apuntan a la eliminación de desechos, mediante un diseño innovador de mantener materiales, componentes y productos en sus niveles de uso más altos en el tiempo.

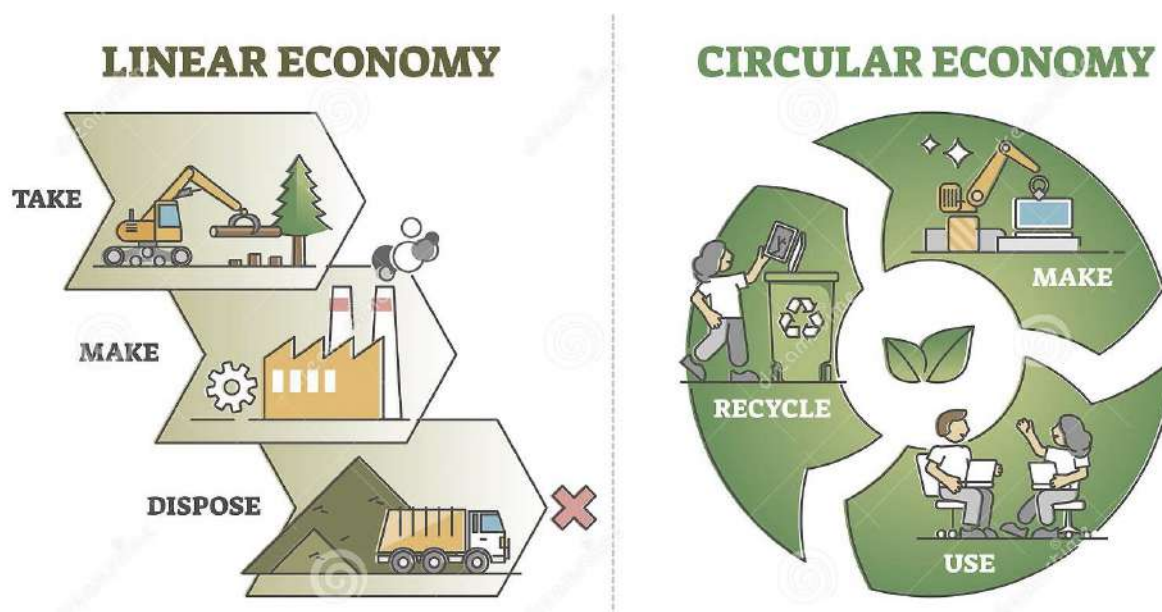
Por consiguiente, este modelo se rige por ser un proceso cíclico, en donde el tránsito de materia prima y sustancias que participan es continuo y positivo, que busca preservar y aumentar el capital natural, optimiza los rendimientos de los recursos y minimiza los riesgos del sistema, gestionando stocks finitos y flujos renovables, desplazando el modelo

de economía lineal que basa su principio en: “producir, usar y tirar” (Cerdá & Khalilova, 2015).

En la siguiente Figura 75 se muestra ilustrado el modelo de economía lineal en comparación con la economía circular.

Figura 75

Economía lineal y Economía circular



Nota: Figura de *Comparación de economía lineal frente a economía circular a partir del esquema de aspecto de reciclado*, por Dreamstime (2022), (<https://es.dreamstime.com/comparaci%C3%B3n-de-econom%C3%ADa-lineal-frente-circular-partir-del-esquema-aspecto-reciclado-sostenibilidad-consumo-recursos-en-el-image212897645>)

Se puede decir que en este proceso se dan dos ciclos; un ciclo biológico en el que los materiales usados son incorporados nuevamente a la naturaleza para ser biodegradados, y un ciclo técnico en el que se incluyen los materiales que no pueden ser asimilados por la naturaleza, sino que fueron diseñados para poder ensamblarse y desmontarse varias veces (aparatos eléctricos y electrónicos, entre otros) y deben ser separados para ser incluidos de nuevo como *inputs* en otro proceso productivo (Hermida & Domínguez, 2014).

La economía circular funciona a través de tres acciones fundamentales conocidas como los principios de las 3R: Reducir, Reutilizar, Reciclar, sin embargo, para dar origen a este modelo económico el hombre se apoyó en tres principios que definen claramente el origen y el desarrollo del mismo (Cerdá & Khalilova, 2015):

- **Principio 1:** se puede decir que la principal razón de que se origine el modelo de economía circular es la inquietud que existe por parte del ser humano de preservar, mantener en el tiempo la naturaleza, ya que gracias a la sobreexplotación ha causado daños irreparables a su principal proveedor de recursos para la elaboración de productos que proporcionan comodidades a la colectividad en general.
- **Principio 2:** con esta estrategia se busca optimizar el rendimiento de los recursos, perpetuando en el tiempo la vida útil de productos, componentes y materiales, reutilizándolos, remanufacturando e introduciendo nuevamente en el mercado; para mantener circulando la economía.
- **Principio 3:** promover la efectividad del sistema, dando a conocer el saneamiento y recuperación de la naturaleza mediante el uso del mismo, claro está, acompañado de la técnica de reciclaje.

Figura 76

Obtención de materia prima para la elaboración de productos



Nota: Figura de *Economía circular; qué es y cómo funciona*, por OVACEN (2022), (<https://ovacen.com/economia-circular/>)

A través de la figura 76 se muestra la obtención de materia prima de los recursos naturales y como a través de la aplicación de economía circular, logramos incorporarlos nuevamente a un ciclo de utilización través del reciclaje.

2.1 Características de una Economía Circular

De acuerdo al concepto y principios que caracterizan al modelo de economía circular, se determina que existen características propias de este sistema, a continuación, se describirán algunas de ellas:

- **Disminución de insumos y minimización en la utilización de recursos naturales:** existe la aplicación mínima y optimizada de materias primas en la elaboración de un producto, para garantizar el manejo eficiente de los recursos naturales, reduciendo el consumo total de agua y energía.
- **Compartir en mayor medida la energía y los recursos renovables y reciclables:** busca alargar la vida útil de los materiales, productos y sus componentes siendo el reciclaje la principal alternativa a elegir, sustituyendo los recursos no renovables por renovables con niveles razonables de oferta.
- **Reducción de emisiones:** hay pocas emisiones a lo largo de todo el ciclo, gracias a que se trata de utilizar la menor cantidad de materia prima, trayendo como consecuencia menor contaminación.
- **Disminuir las pérdidas de materiales y de los residuos:** con este sistema se trata que la elaboración de un producto se acerque a la perfección, para que la producción de desecho sea mínima o nula, limitando la cantidad de residuos incinerados y vertidos.
- **Conservar el valor de productos, componentes y materiales en la economía:** perpetuar el uso de productos en el tiempo, alargando su vida útil, resguardar el valor de los materiales en la economía, a través de reciclaje de alta calidad.

3. Prevenir la generación de residuos

A causa del alto nivel de consumismo de bienes y servicios que garantizan bienestar y confort a la humanidad, se origina de forma paralela el incremento de la producción de residuos, que crece al unísono y hasta en mayor proporción con respecto a las comodidades que busca obtener el ser humano. El consumismo tiene afectación económicas, sociales, políticas y geoestratégicas a nivel global, que producen efectos y

consecuencias de desarrollo económico, ya que existe especial interés por parte de las grandes industrias en su avaricia de hacer crecer su capital, creando marcas y promoviendo a través de publicidad que el consumidor adquiera desenfrenadamente productos no necesarios para satisfacer sus necesidades reales.

A nivel mundial el promedio de producción per cápita de residuos es 0,74 kilogramos al día aproximadamente, siendo esta cifra un valor que varía considerablemente de acuerdo al desarrollo económico de cada país llegando alcanzar hasta 4,54 kilogramos/residuos/per cápita en países desarrollados (Baños & Gámez, 2019).

Ahora bien, para mitigar la generación de residuos se puede detallar algunas estrategias que se mencionarán a continuación:

- Es necesario que exista un planteamiento preconsumo, es decir comenzar programas de educación y concientización en cuanto al consumismo, implementando una metodología relacionada con el aprendizaje de buenas conductas al momento de realizar compras lo que trae como consecuencia la disminución considerable de producción de desechos y residuos que generan las compras sin sentido.
- Aunado a esto debe haber un compromiso por parte del sector industrial en generar estrategias que contribuyan a la buena gestión en el manejo de residuos en cuanto a su deposición y posterior tratamiento y así subsanar los daños ocasionados al medio ambiente (Reyes R., 2018).
- Debe existir un aprovechamiento máximo en la utilización de materia prima a la hora de elaborar un producto, le correspondería a la industria establecer técnicas que al ser aplicadas se acerquen a la perfección, para minimizar las pérdidas o producción de residuos, implementando planes de acción para utilizar el sobrante bien sea elaborando nuevos productos de diferentes características al producto principal o vendiéndolo a otras empresas que requieran de ese desecho como materia prima en la fabricación de sus productos (Reyes R., 2018).
- Perfeccionar el tratamiento posconsumo, siendo la estrategia de elección el reciclaje, que se ha ido impulsando a nivel global como principal alternativa para disminuir los residuos sólidos, pero esta estrategia debe ir de la mano con la teoría

de economía circular, donde se plantea la reutilización, remanufacturación, de productos, con la mínima o nula producción de desechos, para luego ser insertados nuevamente a la cadena comercial, mitigando así la afectación ecológica (Baños & Gámez, 2019).

4. Manejo adecuado de los residuos: 3 R (Jerarquía, 3 R, Ecodiseño)

Una de las dificultades que se presentan en las sociedades industrializadas es la contaminación ambiental y el deterioro a la naturaleza que es provocado por la mala gestión de residuos (Solans et al., 2001).

En los países desarrollados y en vías de desarrollo, el manejo de los residuos representan un inconveniente común y cada vez más complicado, existen factores que predisponen a la pérdida de control en cuanto a la deposición, tratamiento y utilización de residuos, tales como: el estallido demográfico que genera de manera proporcional un aumento en la producción de residuos, el crecimiento exacerbado de la industrialización visto por los grandes consorcios empresariales como fuente principal para hacer crecer su capital económico, dejando en un segundo plano el interés de generar un producto capaz de satisfacer las necesidades del colectivo, la falta de educación y concientización con respecto al consumismo, el desconocimiento de los problemas que genera la inadecuada disposición final de los desechos; entre otros (Redobrán, 2013).

Cada gobierno debe crear planes y estrategias que en alianzas con empresarios y comunidad en general se lleven a cabo para el manejo adecuado de residuos, gestionando de la manera más económica, y ambientalmente posible la cantidad de residuos que se generan anualmente a nivel global (Redobrán, 2013).

Ahora bien para alcanzar el éxito se deben implementar alternativas previas al manejo de desechos, que faciliten el proceso desde el punto de origen de los mismos, es decir el manejo comienza desde los hogares, empresas, hospitales, negocios, instituciones públicas, privadas, donde se establezcan técnicas que permitan clasificar los desechos, en biodegradables, no degradables, o en alternativos, con este primer paso estaríamos contribuyendo a disminuir los niveles de contaminación y facilitando el trabajo.

El principio para el manejo adecuado de residuos va de la mano de la filosofía de la economía circular, que fundamenta su aplicación en diseñar productos sin desechos “Ecodiseño” como práctica asociada a la producción más limpia a nivel global, no

conforme la organización buscó mayor eficiencia a través de la aplicación dentro del ciclo de las 3R: reducir el consumo de recursos y emisiones de residuos; reutilizar los recursos, y reciclar los componentes (Hermida & Domínguez, 2014).

En un mundo de recursos limitados y con costos energéticos en aumento progresivo, se plantea como alternativa de elección un nuevo modelo productivo: ECO-3, conociendo las dificultades para llevar a cabo esta gestión, y por lo que se refiere a los residuos, se ha establecido una jerarquía de prioridades ambientales que se centra en tres ejes fundamentales que según Redobrán (2013) son:

- Prevención: Reducción en origen/Reutilización
- Valorización: Reciclaje-compostaje/Recuperación energética
- Eliminación: Vertido controlado.

5. Valorizar los residuos generados

La humanidad es el principal contribuyente al desgaste medioambiental del planeta. Casi de manera conjunta al desarrollo del hombre se genera un elemento que es tan antiguo como la humanidad misma “la Basura”; también llamada residuos (Antonio et al., 2016).

La producción de residuos es incontrolable, aumentando de manera excesiva de la mano con el crecimiento demográfico y la industrialización. El hombre en su sensatez tratando de aminorar el daño ocasionado a la naturaleza debido a la contaminación del medio ambiente y a la sobre explotación en el uso de los recursos naturales renovable y no renovables ha buscado soluciones que le permitan aprovechar al máximo la utilización de los desechos, aplicando técnicas y métodos que transformen la fracción orgánica de los residuos, dando origen a nuevos productos que son incorporados nuevamente a la cadena comercial.

Ahora bien conocer y comprender que la recuperación y valorización de los residuos sólidos, permite incrementar su aprovechamiento y reducir la cantidad de materiales que se destinan a disposición final, sin dejar de ser menos importante que acá se utiliza de manera parcial una estructura informal para valorizar los materiales reciclables, cuya base se compone principalmente de “pepenadores” (personas encargadas de la recolección y clasificación de residuos), quienes realizan las tareas de rescate de materiales que tienen

potencial para incluirse en cadenas de valor para ser utilizados en nuevos procesos de transformación, seleccionándolos para luego comercializarlos a intermediarios o directamente a los centros de acopio locales; es a partir de este momento que se comienza a dar un valor económico a lo que ya vemos como desechable (Aguilar et al., 2019).

Sin embargo, es necesario formar en la colectividad una conciencia ecológica para que el interés no sea solamente económico, sino el de restablecer el equilibrio a la naturaleza, alargar la vida útil de los materiales, componente y productos, a través de técnicas que dan valorización a los residuos, como lo son el compostaje y el reciclaje asegurando en el tiempo los productos necesarios para satisfacer las necesidades de millones de personas

A continuación, se establecen dos tipos de valorización según Picco (2021):

1. Valorización energética: actuaciones destinadas a emplear residuos con la finalidad de aprovechar su potencial energético, tales como: coprocesamiento, incineración, biochar (carbón vegetal), entre otros.
2. Valorización material: acciones de reutilización, reciclado, compostaje, recuperación de aceites, entre otras alternativas que; a través de procesos de transformación física, química, demuestren su viabilidad técnica, económica o ambiental.

Se puede decir que el tipo de valorización se va a dar de acuerdo a la clasificación de los residuos, sabiendo que esencialmente son de origen agrícolas e industriales, como madera, papel, residuos biomasa verde, residuos domésticos, vidrio y cuero; además de residuos electrónicos, como computadores, teléfonos, refrigeradores, televisores. También se incluye la actividad de construcción, donde se encuentran residuos de demolición; por último, los residuos médicos (Triviño et al., 2021).

Dentro de los subproductos más importantes generados a partir de la selección y posterior valorización obtenidos en la actualidad a diferentes escalas o niveles de tecnología (Technology y Readiness Levels - TRL) se encuentra el biogás; además de, biometano, bioetanol, biohidrógeno, ácidos grasos volátiles, ácido láctico, biofertilizantes o enmiendas agrícolas, basados en un concepto novedoso como es la biorrefinería y la economía circular.

6. Reciclaje

Se puede decir que la producción y acumulación de residuos de distintos tipos a nivel global, es una problemática que escapa de control en cuanto a manejo o disposición de los mismo, partiendo desde el principio que representa el alto nivel de consumismo que existe en la actualidad a nivel mundial, lo que trae consecuencia el aumento exorbitante de la producción y acumulación de residuos sólidos, provocando un desequilibrio en la naturaleza y repercusiones directas sobre la salud pública (Sanmartín et al., 2017).

Debido a esta situación han ido surgiendo propuestas por parte de las grandes corporaciones industriales, asumiendo su corresponsabilidad por ser el contribuyente mayoritario en la producción de residuos y por su alta participación promoviendo al consumismo. Con el propósito de abordar una solución con respuestas concretas a este inconveniente, surge el reciclaje como una opción factible para innovar e iniciar nuevas formas de producción alternativas, impulsando la reutilización de materiales y sus componentes en la elaboración de nuevos productos, coadyuvando con esto a disminuir el impacto negativo que causa la mala gestión en el mal manejo de residuos (Sanmartín et al., 2017).

Claro está todo esto con el acompañamiento de programas que orienten y concienticen a la humanidad, estableciendo mecanismos que permitan a niños, jóvenes y adultos contribuir a la solución del mismo desde los propios hogares, a partir de un proceso de sensibilización, investigación, reflexión y acción para mejorar la calidad de vida de la población (Sanmartín et al., 2017).

Sin embargo, según ADAN (1999) citado textualmente por Reyes C. et al. (2015) el reciclaje no es la única solución al problema de los desechos, sino que también es visto como una actividad económica, que se debe abordar como un componente dentro de un conjunto de soluciones.

6.1 Concepto de reciclaje

Aunque los materiales reciclables representan el 16% de los residuos sólidos generados en los países de bajos ingresos, la cantidad de residuos generados y la fracción de residuos reciclables generalmente aumentan a medida que mejoran las economías (Kaza et al., 2018).

El reciclaje es una técnica que consiste en dar aprovechamiento a los residuos que se generan, sometiéndolos a un proceso de transformación bien sea físico o químico, para obtener de esta manera materia prima que pueda ser incorporada de manera directa a un ciclo de producción o de consumo para generar otro producto (Sanmartín et al., 2017).

El proceso de reciclaje es una actividad que conlleva a la utilización de energía para obtener nuevos productos en una planta recicladora. La importancia del reciclaje radica en evitar la tala indiscriminada de árboles, reducir la contaminación en ecosistema y por supuesto asegurar la perpetuación del ser humano en el planeta (Sanmartín et al., 2017).

En resumen, se puede decir que el reciclaje constituye una forma de aprovechamiento de los materiales contenidos en objetos que cumplieron su vida útil y que por numerosas causas han sido desechados y que una vez sometidos a proceso de transformación industrial o artesanal pueden obtener un nuevo valor (Reyes C. et al., 2015).

Para que el proceso de reciclaje se dé con éxito es necesario desarrollarlo por fases, que se puede clasificar en 3 etapas del reciclaje: separar, reprocesar y reutilizar. El reciclaje es la recolección y procesamiento de materiales que de otra manera se desearían como residuos, y su conversión a nuevos productos. Las ciudades pueden beneficiarse de los programas de reciclaje de la siguiente manera:

1. Reducir los costos de la eliminación de residuos: el reciclaje reduce la cantidad de residuos enviados a los vertederos, lo que extiende la vida útil de esas instalaciones y reduce los costos de ubicación, construcción y operación de las nuevas instalaciones.
2. Reducir los impactos ambientales: en muchos países en vías de desarrollo, los residuos no recolectados se queman a la intemperie para reducir su volumen. Reducir la cantidad de material reciclable que se quema al aire libre mejora la calidad del agua y reduce las emisiones de gases del efecto invernadero. Además, aumentar las tasas de reciclaje ayuda a evitar que los residuos se conviertan en basura marina, especialmente en áreas costeras.
3. Reducir el uso de materiales vírgenes: al enlentecer la extracción de materias primas vírgenes se conservan recursos naturales como la madera, el agua y los minerales, al tiempo que aumenta la seguridad económica a través del uso de una fuente nacional de materiales fácilmente disponibles.

4. Fortalecer el crecimiento económico y la igualdad social: el reciclaje crea empleo y ofrece a la población local una fuente de ingresos. Los programas formales de reciclaje que algunas ciudades apoyan han servido para que los trabajadores del sector informal se conviertan en personal formal de gestión de residuos sólidos, mejorando su salud, seguridad y condiciones de trabajo.

6.2 Ventajas del reciclaje

Así como la producción de residuos es tan antigua como el origen de la vida humana, así mismo nace la idea del reciclaje, surgiendo casi desde los orígenes del hombre. A medida que crece la población, con exigencias cada vez más concretas con respecto a satisfacer las necesidades particulares de cada individuo, existiendo un desenfreno en la elaboración y consumo de productos nuevos a partir de materias primas no renovables; lo que trae como consecuencia la sobre explotación en la naturaleza, todo esto obliga a los grandes consorcios industriales a buscar alternativas para aminorar el daño ecológico y a su vez seguir brindado confort al colectivo, es así como el tema de reciclaje va tomando importancia (López, 2020).

Es en la década de los sesenta, que el reciclaje se reivindica como alternativa para solucionar grandes problemas ya ocasionados. Durante esta época se crean movimientos ecologistas que promueven el reciclaje, surtiendo efecto en una minoría de la sociedad, comenzando a tomar conciencia del impacto ambiental negativo que se estaba generando a nivel global, por la cultura consumista y por el desconocimiento del concepto de reciclar y reusar (López, 2020).

Ahora bien, reciclar tiene grandes beneficios dentro del manejo de residuos y reutilización de materia prima para elaboración de nuevos productos que consideramos como ventajas, a continuación, nombraremos algunas de ellas:

Según López, (2020), el reciclaje presenta muchas ventajas, entre las que se pueden mencionar:

- Minimiza la contaminación del ecosistema y fortalece la conservación de los recursos naturales, reduciendo la extracción de nuevas materias primas vírgenes.
- Beneficia la conservación de la energía, porque se requiere menos para hacer los productos provenientes del reciclaje.

- Evita los costos de disposición de desechos en los rellenos sanitarios.
- Disminuye considerablemente los residuos generados.
- Induce al respeto por la naturaleza.
- En el ámbito financiero genera fuentes de empleo, requiriendo fuerza laboral para la recolección de materiales y su posterior clasificación.

6.3 Tipos de reciclaje

La clasificación de los diferentes tipos de reciclaje va a depender del tipo de material que se va a clasificar para ser procesado, al tipo de plásticos y otros materiales que podemos reciclar para que tengan un segundo uso o sean parte de otro proceso para la elaboración de nuevos productos. De manera que la clasificación puede ser subdividido a su vez, de la siguiente manera: reciclaje según el tipo de material o residuo recolectado; reciclaje mecánico en el cual, por medio de procesos físicos se separan los materiales que se encuentren mezclados; reciclaje químico; reciclaje energético y reciclaje biológico.

A continuación, se detallan brevemente cada uno, con sus principales características (López, 2020):

a. Reciclaje químico

El reciclaje químico se fundamenta en someter a proceso de calor o con catalizadores el residuo o desecho a tratar, es decir con aplicación de agentes ácidos, básicos y oxidantes para que ocurra la despolimerización a diferentes tipos de materiales (papel, plásticos, vidrios, metales, otros) encontrados en diferentes productos, se puede hacer referencia que algunos de los métodos más utilizados son los siguientes (Ellegren et al., 2012):

- **Tratamiento de solvólisis:** este método consiste en la aplicación de disolventes especiales en ciclo cerrado, donde se logra diluir los polímeros termoestables que impregnan el tejido de fibra de vidrio. Luego de esto se somete a tratamiento mecánico donde se muelen para separar la fibra y lograr una mejor concentración de metales.
- **Tratamiento hidrometalúrgico:** no es más que una lixiviación ácida o cáustica utilizada para separar los componentes metálicos encontrados en la tarjeta de

circuito impreso, encontrada en aparatos electrónicos, posterior a este método químico es molida para disolver los metales. Estas soluciones se someten a procesos de separación, tales como extracción con disolvente, precipitación, intercambio iónico, concentración o electrolisis para recuperar selectivamente los metales disueltos.

La principal ventaja de aplicar reciclaje químico es que procesa todo tipo de residuos domésticos, industriales y tóxicos, y una de las desventajas que presenta es el alto costo de mantenimiento (Ellegren et al., 2012).

b. Reciclaje mecánico:

Se define como un proceso netamente físico, que consiste en cortar las piezas en pequeños fragmentos para facilitar el posterior tratamiento, que no es más que la trituración que busca disminuir su tamaño, lavado y graneado (homogenización del material), luego este material es separado de acuerdo a su calidad y colores, para finalmente ser fundido y dar nueva utilidad al plástico, en la fabricación de distintos artículos de consumo diario o de equipos de larga duración. En este tipo de reciclaje se procesan plásticos de diferentes orígenes, para aplicaciones sobre todo en el sector de la electrónica (Franco-Urquiza et al., 2016).

Su ventaja es que no emite contaminantes gaseosos, ya que no se produce una combustión, y su desventaja es que dificultad en el tratamiento de plásticos mezclados.

c. Reciclaje biológico:

Aproximadamente el 50% del material que se dispone en los vertederos es de tipo orgánico, estos residuos sólidos tienen dos características especiales: en primer lugar tienen un alto nivel contaminante si no son dispuestos correctamente y a su vez tienen un alto potencial de reciclaje, valorización y reutilización, por tanto una mala gestión de los mismos ocasiona un impacto ambiental negativo, debido a la producción de gases de efecto invernadero y lixiviados generados, es imprescindible que se adopten medidas correctivas para que este material sea reciclado y pueda ser procesado para producción de compostaje y/o de generación de energía hidroeléctrica o térmica (López, 2020).

El tipo de reciclaje a utilizar en este caso es el biológico, que se define como un proceso orgánico de transformación de residuos, donde ocurre la descomposición de los

diferentes componentes de un material gracias a la actuación de microorganismos (bacterias, hongos, actinomicetos), que actúan mediante un proceso controlado de fermentación en condiciones aeróbicas, con parámetros de humedad y temperaturas adecuadas (Solans et al., 2001).

Uno de los métodos de elección para la transformación de la fracción orgánica de los residuos es a través de técnicas de compostaje, ya que con este método se busca disminuir los riesgos de contaminación que pueden provocar otras alternativas como la incineración y los vertederos. El producto final del compostaje es un material denominado compost, fácil de almacenar y transportar (Solans et al., 2001).

d. Reciclaje energético:

Consiste en eliminar la mayor parte del volumen de los residuos mediante la combustión, transformando los desechos en gases, cenizas y escorias a fin de aprovechar la energía producida (Triviño et al., 2021).

Transformar los desechos en energía es factible. Sin embargo, es una de las iniciativas más complejas para obtener de energía renovable, debido a la diversidad de materiales orgánicos y a los diferentes de procesos de conversión que existen (Berenguer et al., 2006).

La ventaja es que reduce el volumen de los residuos aproximadamente en 90% del original, su desventaja es que se necesitan de equipos de control de emisiones gaseosas (Triviño et al., 2021).

6.4 Reciclaje de plástico

Gran parte de los residuos generados en el día a día con nuestro estilo de vida, están constituidos por desechos plásticos provenientes principalmente de envases y empaques, que en muchos casos son desechados luego de ser utilizados una sola vez. Estos plásticos son elaborados casi en su totalidad de derivados del petróleo, un recurso natural no renovable. Así pues, el aprovechamiento de estos desechos para la fabricación de nuevos plásticos u otros fines por medio del reciclaje químico, no sólo contribuye a solucionar el problema de residuos, sino que puede convertirse en una fuente renovable de recursos (Ellegren et al., 2012).

Según López (2020) existe una clasificación de plásticos de acuerdo al proceso de reciclaje específico que se va a realizar, dentro de la clasificación principal se encuentran:

- **Plásticos termoplásticos:** este material puede ser moldeado con el aumento de temperatura y se le puede dar diversas formas, y una vez se enfrían, mantendrán sus propiedades iniciales. Por esta razón son más fácilmente reciclables, porque este proceso se puede repetir varias veces sin que se alteren sus propiedades
- **Plásticos termoestables:** este plástico también es maleable y pueden ser tratados por medio del aumento de temperatura, sin embargo, cuando esto ocurre, hay una reacción química que modifica la alineación de las moléculas, las cuales ya no podrán volver a modificarse con aumento de temperatura, sino que, por el contrario, al calentarse pueden llegar a romperse.

A continuación, se describen brevemente algunos componentes de materiales plásticos que pueden reciclarse para obtener nuevos objetos de uso doméstico e industrial (Elgegren et al., 2012).

- **Tereftalato de polietileno:** es uno de los materiales plásticos que se encuentra con más frecuencia en los desechos domésticos. El PET es un termoplástico semicristalino que, gracias a sus propiedades, posee una amplia variedad de aplicaciones; entre ellas: la manufactura de fibras, películas fotográficas, contenedores de cosméticos, detergentes y, principalmente, botellas descartables de bebidas. La producción de botellas de PET se ha venido incrementando considerablemente debido a su poco peso, resistencia, transparencia y facilidad de almacenamiento.
- **Policarbonato:** es un polímero termoplástico transparente, muy ligero de peso y flexible con una alta resistencia al impacto. Estas propiedades permiten que sea utilizado para la fabricación de diferentes productos, como en partes de automóviles, computadoras y celulares, en la producción de discos compactos (CD, DVD, blu-ray). Además, es utilizado para la fabricación de botellas reusables, biberones y contenedores de alimentos, entre otros.
- **Poliamidas:** el Nylon-6 y el Nylon-6,6 son las poliamidas trascendentales más comerciales. Sus características peculiares permiten su aplicación como

termoplástica y fibra (fibras cortas e hilos). Es utilizada en la elaboración de hilos, telas, sogas y filamentos son las cerdas de cepillos dentales, suturas quirúrgicas y cuerdas para instrumentos musicales y otros productos. Según estudios realizados sobre reciclaje de poliamidas, establece que la mayoría está relacionada al reciclaje mecánico, es decir, al reprocesamiento, por fusión de fibras de poliamidas. Sin embargo, se puede decir que en el proceso de despolimerización se involucran reacciones a altas presiones, 13-18 hidrólisis y aminólisis convirtiéndola en un proceso químico.

- **Polipropileno (PP):** es el plástico que se utiliza para elaboración de tapas de botellas, algunos empaques flexibles de alimentos, envases de yogures entre otros.
- **Polietileno de baja densidad (PEBD):** principalmente lo encontramos en bolsas de supermercados o en las bolsas de las leches.
- **Polietileno de alta densidad (PEAD):** se utiliza para la elaboración de envases de detergentes, lubricantes entre otros.
- **Policloruro de Vinilo (PVC):** se usa en la fabricación de envases de shampoo, de aceites de cocina y tuberías para agua.
- **Poliestireno (PS):** se utiliza en la fabricación de envases de un solo uso para bebidas calientes.

Este proceso comienza con la recolección del material plástico desechado, se deposita en las plantas recicladoras, el primer paso consiste en clasificar el plástico y retirar todo tipo de elementos como etiquetas, suciedad, entre otros, también se clasifican según el color del plástico, luego de esto pasa a través de un proceso de triturado por medio de cuchillas giratorias, con esto se busca que el tamaño del grano del plástico sea homogéneo y de más fácil manejo. Una vez triturado el plástico pasa al lavado donde por medio de agua y agitadores, posterior a esto el material pasa al secado, dentro de una centrifuga, en la que por medio de la fuerza centrífuga el material se va separando del agua y se sigue eliminando impurezas u otro material remanente.

Luego el plástico se almacena en silos para homogenizar todo el material y después pasa al proceso de extrusión, el cual emplea una extrusora que por medio de calor y su eje en movimiento, genera fricción entre el material que va pasando, y produce que el

plástico se funde y se crea una masa homogénea, que luego pasa por una nueva etapa de filtrado para remover impurezas que aún puedan permanecer, posterior a esto el material sale de la extrusora, fundido en forma de filamentos los cuales entran a una tina para enfriarse y por una cortadora de cuchillas (conocida como peletizadora) que cortan el plástico en pequeños granos llamados pellets, los cuales serán el producto final que se utilizará como materia prima para la conformación de nuevos productos hechos en plásticos (López, 2020).

6.5 Reciclaje de papel y cartón

El reciclaje del papel comienza con la separación o clasificación ya sea desde donde se produce el desecho durante su tránsito en la cadena de utilización de dicho material, existen plantas de acopio que reciben todos los derivados de la celulosa proveniente de la madera de los árboles, utilizada para la fabricación de papel y cartón. Una vez se tiene el material desechado, se procede al tratamiento comenzando con la conformación de la pasta de papel, que se obtiene adicionando aditivos químicos para disolverlo y para que las fibras de papel puedan aislarse. El segundo paso consiste limpiar el material, se hace pasar la pasta de papel por medio de un tamiz o filtro que permita separar los materiales que no son papel y que puedan contaminar o dañar el proceso. Luego se realiza el lavado, para retirar cualquier material que haya podido quedar de la etapa anterior y para finalizar se le adiciona determinados productos químicos como agentes blanqueadores, entre ellos el peróxido de hidrógeno, para obtener materia prima de excelente calidad (López, 2020).

Este tipo de reciclaje es de gran aprovechamiento ya que tiene un impacto ambiental positivo, debido que se está favoreciendo a la recuperación de la naturaleza, disminuyendo la utilización de madera, aunado a esto el hecho que implica menos consumo de agua durante su ejecución. Se puede decir que las ventajas de este proceso son las siguientes:

- Se disminuye la tala de la masa forestal.
- Durante el proceso se reduce hasta en un 85% el consumo de agua y un 65% de energía.
- El uso de incineradoras es nulo y se reduce el espacio de los vertederos de basura

6.6 Reciclaje de vidrio

El vidrio es un material variable que tiene alto porcentaje de aprovechamiento en el proceso de reciclaje (casi en un 100%) y de reutilización, sin que pierda sus propiedades o las del producto a envasar. Se puede decir que causa un impacto ambiental positivo al ambiente si es reciclado, sin embargo, por ser un producto que no es degradable el vidrio y los envases de vidrio pueden llegar a ser muy perjudiciales para la naturaleza ya que es un producto que resiste por muchas generaciones (Carrasco, 2019).

Si bien se puede decir que el impacto ambiental es mínimo hay que considerar que existe un impacto negativo ocasionado durante el proceso de elaboración de productos elaborados con vidrio, las grandes industrias que elaboran las botellas de vidrio consumen demasiada energía, y eso llega a afectar a la atmósfera del planeta tierra (Carrasco, 2019).

En busca de solución para no contribuir con el calentamiento global, las grandes empresas postulan al reciclado de vidrio como alternativa para ofrecer un producto sin necesidad de originarlo desde cero, ya que en este proceso el consumo energético es bajo, debido a que la temperatura de fusión del vidrio reciclado es menor, consiguiendo un ahorro energético y económico significativo dentro del proceso (López, 2020).

Para iniciar el proceso de reciclaje de vidrio, se comienza con la separación en la fuente de dicho material, ya sea en hogares, en empresas, locales comerciales, otros; con este tratamiento previo se asegura que no lleguen materiales aprovechables o reutilizables a los rellenos sanitarios o vertederos, disminuyendo con esto el volumen de desperdicios, luego se recibe el material en centro de acopio, este es incorporado a una banda transportadora, en la cual de forma automatizada, se remueven otros elementos que no son vidrio para depurar el proceso de reciclaje.

Para eliminar elementos que contienen hierro, como por ejemplo tapas de envases, se utiliza un imán, posteriormente el vidrio es triturado y pasa a través de tamices para clasificarse de acuerdo a su tamaño y por un equipo óptico que lo reclasifica de acuerdo a su color, este paso también permite eliminar otros materiales que aún permanezcan. Finalmente, el vidrio triturado, llamado Calcín pasa por un nuevo proceso de inspección manual para eliminar impurezas remanentes que hayan quedado, tales como plástico o etiquetas adhesivas. Con el ataque de disolventes especiales se consigue disolver los polímeros termoestables que impregnan el tejido de fibra de vidrio. Posteriormente se muelen para separar la fibra y lograr una mejor concentración de metales (López, 2020).

6.7 Reciclaje de metales

El reciclaje de metales (hierro, aluminio, cobre, plata y acero principalmente), representa un impacto positivo al medio ambiente ya que reciclarlo disminuye la cantidad de energía y recursos necesarios para extraerlos de la naturaleza. Es importante mencionar que, a diferencia del reciclaje de otros materiales, una de las ventajas que presenta el reciclaje de metales es que puede reutilizarse un sin fin de ocasiones sin perder sus propiedades, además de esto el costo de procesarlo es muy bajo (López, 2020).

Se puede decir que gran parte de los productos utilizados por el hombre para su confort llevan en su elaboración compuestos metálicos ya sea en mínima proporción o en su totalidad, por ejemplo cualquier equipo eléctrico está conformado por una placa de circuito impreso y componentes electrónicos cuya composición son diferentes metales; es decir estas placas están compuesta de una resina termo estable reforzada con fibras de vidrio, la estructura conductiva, que pueden ser, cobre, níquel, oro y otros. La composición de las actuales placas de circuito impreso es: el 70% no metales (fibra de vidrio, resina termo estable), 16% de cobre, 4% de soldaduras, 3% de hierro, 2% de níquel, 0,05% de plata, 0,003% de oro, 0,0001% de paladio y otros materiales. Por tanto, las placas de circuito impreso contienen una gran variedad de metales preciosos de distintas concentraciones. Una vez que los equipos eléctricos terminan su vida útil se convierte en basura electrónica, sin tomar en cuenta que se están desperdiciando metales de diferente composición, quizás en mínimas concentraciones, que aún se pudieran utilizar (Berenguer et al., 2006).

Es importante mencionar que el aluminio es un metal muy costoso de producir y, en consecuencia, uno de los más valiosos que aparecen como desechos en los vertederos de basura. Reciclar este tipo de material es 100% de provecho para conservar la naturaleza, unas de las ventajas de este proceso por ejemplo es que para fabricar una tonelada de aluminio a partir de latas recicladas representa (Berenguer et al., 2006):

- Evitar la extracción de cinco toneladas de Bauxita que es un mineral no renovable.
- Ahorrar de 4 a 6 toneladas de petróleo aproximadamente.
- Ahorrar el 95% de energía eléctrica.

El proceso inicia con la recolecta de material desechado, para luego ser enviado a la planta de reciclaje, donde se clasifican de acuerdo al tipo de metal, seguidamente pasan a proceso de trituración, donde se fraccionan en menor tamaño para posteriormente ser compactados y comercializados a las empresas fabricantes. Como se mencionó anteriormente los ahorros energéticos y por ende monetarios en este tipo de reciclaje son enormes (López, 2020).

6.8 Reciclaje de eléctricos y electrónicos

El hombre en búsqueda de generar comodidad y bienestar para su desenvolvimiento y desarrollo en el planeta, se encuentra en constante indagación por tecnificar muchos procesos seculares en áreas laborales, domésticas, de educación, entre otros, viviendo experiencias de constante invención de productos que día a día responden a las necesidades de un colectivo cada vez más exigente, provocando un aumento en la producción de equipos y artículos más tecnificados, esto ha traído como consecuencia inmediata el alto nivel de consumismo, en primer lugar por siempre querer tener el equipo o artículo de última generación y en segundo lugar existe un alto poder de acceso debido a la disminución en los costos de adquisición, lo que trae como consecuencia el posterior descarte temprano, incluso antes de haber cumplido con el ciclo de vida útil de estos productos (Berenguer et al., 2006).

El resultado de realizar una gestión inadecuada de los residuos eléctricos y electrónicos genera un problema de impacto ambiental negativo, debido a una gran variedad de sustancias potencialmente tóxicas presentes en los dispositivos tales como el Mercurio, Cadmio, Plomo, entre muchos otros (Triviño et al., 2021).

Este tipo de reciclaje corresponde a diversos productos, tales como: electrodomésticos, teléfonos celulares, pilas, computadores, y demás dispositivos eléctricos y/o electrónicos. Estos equipos se componen de una gran variedad de elementos potencialmente tóxicos, inclusive otros materiales también de provecho para reciclaje como el plástico. En los materiales electrónicos reciclables se pueden recuperar metales preciosos, tales como oro y plata (Berenguer et al., 2006).

El reciclaje de este tipo de materiales inicia, (como ya se ha mencionado en todos los materiales) con la separación en la fuente de dicho material y por medio de la recolección es enviado a la planta encargada de reciclaje de estos materiales. Allí se clasifican y

separan mecánicamente de acuerdo a la composición de materiales que conforman estos equipos, tales como metales, vidrio, plásticos y pasan a ser parte de materias primas de otro tipo de industrias o sectores. Los materiales potencialmente tóxicos como el Mercurio entre otros son separados durante el paso de clasificación y deben ser diligenciados a otras empresas que disponen este tipo de materiales. Una vez se han separado y triturado los diversos materiales que los componen son dispuestos como materiales para conformar nuevos productos a base de hierro, metales preciosos, vidrio, plástico, entre otros. En este tipo de materiales, como se ha visto, se puede reciclar la mayoría de los materiales, casi en un 80% o más, lo que evidencia la importancia de reciclarlos, considerando los volúmenes de desperdicio que se desechan en el mundo anualmente (López, 2020).

En la actualidad se han desarrollado métodos para la recuperación o reciclaje de las tarjetas de circuito impreso que tienen muchos aparatos electrónicos. Este proceso de reciclaje de las tarjetas de circuito impreso está direccionado a recuperar los metales y sobre todo los metales preciosos como oro y plata, que luego pueden ser empleados como materia prima en nuevos procesos, también se recupera el cobre, aluminio, plomo, zinc, etc. Las rutas para el reciclado de los componentes de las tarjetas de circuitos impresos incluyen los procesos mecánicos, pirometalúrgico (refinación de metales através de calor), hidrometalúrgico, electroquímico o combinaciones de los mismos (Berenguer et al., 2006).

Se puede decir que el proceso de reciclaje para separar los compuestos de metales y sustancias tóxicas presentes en los equipos eléctricos y electrónicos viene dado por aplicación de métodos físicos y químicos, mencionando algunos de ellos (Berenguer et al., 2006):

- **Tratamiento mecánico:** este método permite obtener de las placas y tarjetas de circuito impreso componentes metálicos, que se envían a un fundidor de metales para rescatar metales como el cobre, además existe la separación de otras fracciones de materiales no metálicos como la fibra de vidrio, plástico, que pueden ser aprovechadas para otras aplicaciones. El tratamiento mecánico puede incluir operaciones sucesivas de moliendas, separación de metales ferrosos y separación de metales no ferrosos (aluminio), cribado y separación por métodos electrostáticos.

- **Tratamiento de solvólisis:** se realiza con la aplicación de sustancias químicas especiales, que consigue disolver los polímeros termoestables que impregnan el tejido de fibra de vidrio. Seguidamente pasan a proceso de mecanización donde se muelen para separar la fibra y conseguir una mejor concentración de metales.
- **Tratamiento hidrometalúrgico:** consiste en una lixiviación ácida o cáustica de la placa y tarjeta de circuito impreso, para luego ser molida para disolver los metales. Posteriormente, estas soluciones se someten a procesos de separación, tales como extracción con disolvente, precipitación, intercambio iónico, concentración o electrolisis para recuperar selectivamente los metales disueltos.
- **Tratamiento por corrientes inducidas:** es un método físico, donde se busca inducir corrientes (corrientes de Foucault) en las partículas contenidas en la masa producto de la trituración de chatarra electrónica. Con este método se logra clasificar y separar los metales no ferrosos.
- **Tratamiento por efecto corona:** en este método físico, se realiza aplicando corriente de alto voltaje a los componentes presentes, para lograr la separación de partículas dependiendo de la permeabilidad de cada elemento, logrando clasificar y separar los metales no ferrosos. Estos métodos nos van permitir proteger el medio ambiente y al ahorro de recursos minerales, combustible y agua.

6.9 Contenedores para el reciclaje:

En el mundo se ha incrementado la recolección de forma selectiva de los residuos, pero aún no se ha unificado el código de colores existiendo incluso diferentes colores en localidades de un mismo país. Sin embargo, los más utilizados a nivel mundial según Admin. Cuidemos el planeta (2017) son los siguientes:

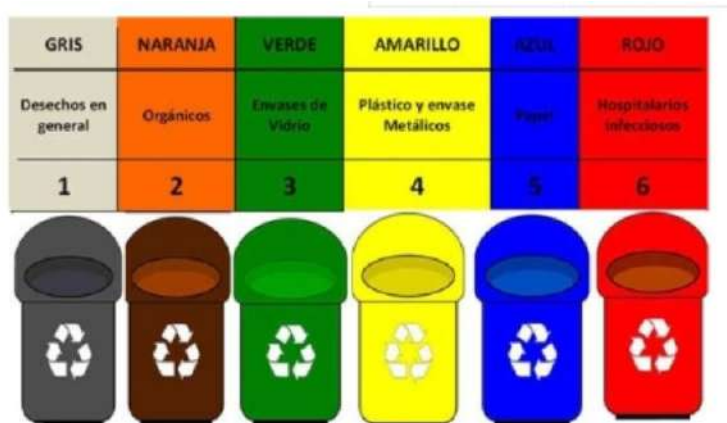
- Contenedor azul: es el utilizado para depositar papel y cartón (cajas, periódico, folletos, revistas, entre otros).
- Contenedor amarillo: es el utilizado para el reciclaje de plástico y latas (envases de plástico, bolsas de plástico, botellas, entre otros).
- Contenedor verde: es el utilizado para reciclar el vidrio (botellas, trozos de cristal, trozos de espejo, entre otros).
- Contenedor naranja: es el utilizado para el depósito de restos orgánicos.

- Contenedor rojo: es el utilizado para depositar desperdicios tóxicos y desperdicios peligrosos (desperdicios de hospitales, laboratorios, pilas, baterías, aceites, entre otros).
- Contenedor gris: es el utilizado para depositar desperdicios domésticos y aquellos que no cumplen con las otras categorías y para depositar desperdicios orgánicos en caso de no disponer del contenedor naranja.

En la figura 77 se puede apreciar los colores y la disposición de los contenedores diseñados para el reciclaje.

Figura 77

Contenedores para el reciclaje



Nota: Figura de *Contenedores para el reciclaje*, por Admin. Cuidemos el planeta (2017), (<https://cuidemoselplaneta.org/contenedores-reciclaje/>)

7. Razones para la implementación de un programa de reciclaje exitoso

- Calidad: los materiales reciclables deben cumplir con umbrales de calidad específicos para convertirse en nuevos productos, lo que requiere una cuidadosa clasificación y tratamiento. Por ejemplo, los diferentes tipos de plásticos tienen propiedades únicas que los hacen más o menos adecuados para el reciclaje. Si los plásticos de mayor calidad no se separan de los plásticos de menor calidad, la totalidad de los plásticos solo se puede utilizar para producir productos para los cuales los plásticos de menor calidad sean adecuados.
- Contaminación: los materiales reciclables se consideran contaminados cuando los no reciclables no se separaron completamente (por ejemplo, si las baterías de iones

de litio, que pueden causar incendios no se manipulan por separado, permanecen en los componentes electrónicos). Los materiales reciclables también pueden contaminar cuando los artículos no se limpian correctamente (hay residuos de alimentos aun presentes en el artículo cuando este ingresa al flujo de reciclaje) o a través de la dispersión de aditivos como el ftalato. La contaminación a menudo lleva a que un lote completo de materiales reciclables sea enviado a un vertedero en lugar de ser reciclado. La contaminación de materiales no reciclables también puede hacer que la maquinaria utilizada en el proceso de reciclaje no funcione correctamente.

- Mercados volátiles.: la demanda por los productos reciclables puede cambiar de maneras impredecibles, dando como resultado que los precios fluctúen. En algunos casos, las caídas repentinas en los precios de los materiales pueden hacer que las instalaciones de reciclaje que están en operación se vuelven insostenibles. En estos casos, los materiales reciclables pueden terminar siendo desechados en los vertederos.
- Altos costos operativos: las operaciones de reciclaje pueden implicar altos costos de mano de obra y transporte de materiales. En lugares donde estos costos son elevados, el reciclaje de materiales de menor valor a menudo no es rentable.
- Financiamiento para inversiones de capital: al igual que con cualquier proyecto de infraestructura, la construcción de instalaciones de reciclaje generalmente requiere de un financiamiento externo.
- Falta de plantas de procesamiento: la infraestructura puede ser una barrera importante para la implementación de programas de reciclaje. Muchas ciudades no están equipadas con instalaciones de recuperación de materiales (MRF), o puede haber una falta de industrias o mercados para la conversión de materiales reciclados en productos.
- Falta de tecnología adecuada: algunos artículos no pueden reciclarse sin tecnología avanzada (p. ej., plásticos de un solo uso). Si estos artículos ingresan al flujo de material reciclado, pueden quedar atrapados en la maquinaria y dañar el equipo de clasificación. Estos artículos a menudo terminan en vertederos o como basura marina.

- Inquietudes ambientales y de salud: el transporte y procesamiento de materiales reciclables puede provocar una mayor contaminación del aire. El reciclaje también puede llevar a un mayor uso de agua para garantizar que los artículos no estén contaminados. Algunos materiales son muy peligrosos cuando no se manipulan adecuadamente (las baterías de iones de litio pueden explotar y provocar incendios). Estos impactos ambientales deben sopesarse con las ganancias ambientales del reciclaje.
- Incorporación del sector informal: no siempre es fácil incorporar el sector informal, ya que a menudo desplaza a los intermediarios que han estado en el negocio del reciclaje durante mucho tiempo. Las ciudades también tienen presupuestos limitados y es posible que no puedan incorporar al sector informal en sus nominas
- Comprender el flujo del reciclaje: los planes de reciclaje deben basarse en el tipo de material generado y recolectado, y, por lo tanto, dependerán de la caracterización de los residuos.
- Realizar investigaciones de mercado: las ciudades han encontrado que es útil recopilar y analizar datos acerca de la dimensión del mercado local para los materiales reciclables. Las consideraciones claves incluyen cuán lejos se encuentra la planta de reciclaje o de fabricación más cercana, quien se hará cargo de los costos de transporte de materiales a esa planta y la volatilidad de los precios de mercado para los diferentes materiales.

8. Reciclaje en America Latina y en Venezuela

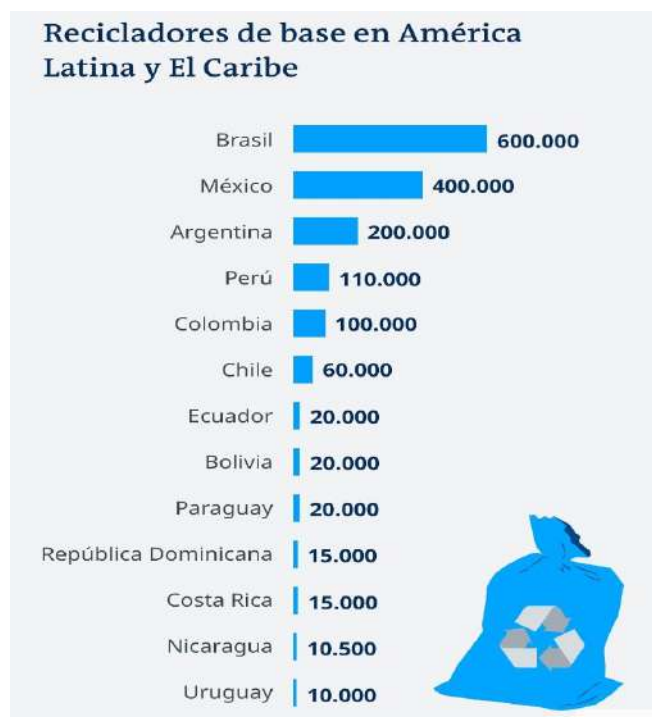
El reciclaje en América Latina se ha extendido y empieza con los llamados recicladores de base, los cuales son las personas que recorren las calles de las localidades buscando cartón, papel, vidrio o metal para recolectarlos y venderlos en los sitios de reciclaje y de esta manera obtener un ingreso, ya que por lo general son personas que carecen de un puesto de trabajo o que necesitan ganar un dinero extra, haciendo de esta forma de reciclaje una profesión.

Existen alrededor de 2 millones de recicladores de base en América Latina y el Caribe, los cuales proporcionan el 50% de los materiales que son reciclados en la región, pasando

a ser pieza importante para la implementación de los modelos de economía circular y dando origen al reciclaje inclusivo (Ver figura 78).

Figura 78

Recicladores de base en América Latina y el Caribe



Nota: Figura de *Recicladores en América Latina: clave para una economía circular*, por Latitud R citado por Alonso (2021), (<https://www.dw.com/es/recicladores-en-am%C3%A9rica-latina-clave-para-una-econom%C3%ADa-circular/a-56751077>)

Sin embargo, cabe destacar que la mayoría de los países de la región carecen de políticas públicas y planes para el manejo de residuos, donde habitualmente se consume del 20 al 40 % del presupuesto municipal afectando de esta manera las finanzas de las localidades (Medina, 1999).

En gran parte de los municipios se llevan a cabo los servicios de recolección, transporte y disposición final de los residuos generados, aunque existiendo programas de privatización de servicios en varios países, observándose experiencias positivas en ciudades como Buenos Aires y Bogotá. Se estima que en las ciudades de la región se recoge el 70 % de los desperdicios producidos, quedando un 30 % de estos que no son recogidos, en especial en aquellas comunidades de bajos recursos que tienden a carecer

del servicio de recolección, existiendo por lo menos un 60% de los desperdicios producidos en Latinoamérica que no recibe una disposición final adecuada (Yepes, 1989).

En base a lo anterior expuesto, reviste mayor importancia el proceso de reciclaje más aún cuando según el BID el reciclaje en América Latina y el Caribe no supera el 4,5%. Es así como muchos países entre los que se encuentran Brasil, México, Argentina, Colombia, Chile, entre otros que ya están trabajando en la legislación para la responsabilidad y el fomento del reciclaje.

Uno de los ejemplos de reciclaje lo constituye la empresa ECOCE y sus Asociados que funciona en México desde hace 18 años trabajando directamente con los gobiernos y las organizaciones civiles impartiendo orientación e instrucción sobre educación ambiental, el acopio y el manejo de empaques y envases de plástico.

La empresa ECOCE (Ecología y Compromiso Empresarial) es una Asociación Civil sin fines de lucro, la cual fue creada y patrocinada por la industria de alimentos y bebidas para contribuir con la preservación del medio ambiente, fomentando la cultura del reciclaje de los productos de las empresas asociadas, para su aprovechamiento en el país y compartiendo con las demás empresas o marcas asociadas la filosofía de Responsabilidad Compartida.

En Venezuela, al igual que muchos países, donde el aumento demográfico de la población va en punta, se maneja el tema de los desechos y residuos sólidos (basura) como uno de los principales problemas en materia ambiental y de salud pública. El aumento desmedido en la producción de desecho obliga a buscar alternativas para disminuir el impacto que esta causa, siendo la de mejor elección el reciclaje. Antes del año 1989, los municipios manejaban el servicio de gestión de residuos sin la incorporación de empresas privadas o mixtas, lo que trajo como consecuencia un deficiente manejo, partiendo desde su origen bien sea urbano, domiciliario o industrial. A partir del año 1989, con la aprobación de la Ley Orgánica de Régimen Municipal, Gaceta Nro. 4.019 del 15/6/1989, se incorpora el compromiso y sobre todo el capital privado al manejo y operación del servicio de gestión de residuos (Bausson, 2019).

Así mismo fueron surgiendo empresas dedicadas a reciclar, todo tipo de material una vez desechado, en primer lugar, para asegurar la recuperación de recursos naturales que se encuentran en estado de sobre explotación y como medio para disminuir el volumen

de desechos producidos (Bausson, 2019). Dentro de estas se encuentran tanto empresas de dominio público como del privado, se mencionan algunas de ellas en la Tabla 11:

Tabla 11

Empresas recicladoras de Venezuela

Empresa	Ubicación	Material reciclado
Venezolana de Reciclaje C.A.	Barquisimeto, Estado Lara	Papel, Cartón, Vidrio, Plástico, Desechos Electrónicos y Aceites usados
EMARLIM C.A	Maracay, Edo. Aragua	Papeles, cartones, plástico y otros materiales.
Reciclajes MYCO C.A.	Cagua, Edo. Aragua	Papel, cartón, periódico, vidrio, plásticos.
Novedades BYG, C.A.	Santa Ana de Coro, Edo. Falcón	Vidrio, plástico, papel, cartón, tetra pack.
Centro de reciclaje “Los Curos”	Los Curos, Edo. Mérida	Papel, cartón, periódico, aluminio, plástico y vidrio.
Recuperadora y Fundición ISFRA, C.A.	Santa Lucia, Edo. Miranda	Metales ferrosos y no ferrosos, plástico, papel y cartón.
Reciclaje de Electrónicos		
Ecoreciclaje Integral	Caracas	Electrónicos
Recicladora Industrial Metalmorfosis C.A.		Electrónicos
Reciclaje de Cartón		
Smurfit Cartones de Venezuela	Chuao-Caracas	Cartón
REPAVECA	Palo Verde, Edo. Miranda	Cartón
Cartonera El Pozo	Santa Rosa, Dto. Capital	Cartón
REINCA	Maracaibo, Edo. Zulia	Cartón
Recuperadora Cariaco II, C.A	Maracay, Edo. Aragua	Papel, cartón y periódico
Reciclaje de Plástico		
Plastitec Group, C.A	Chuao, Caracas Venezuela	Plástico
ECOPLAST	Guatire, Edo Miranda	Plástico
Recuperadora Venezolana de Plásticos	Edo. Carabobo	Plástico
Polímeros Nacionales C.A.	El Anís, Estado Mérida	Plástico
Reciclaje de Vidrio		
Recicladora Rency, C.A	Cagua, Edo. Aragua	Vidrio
Recuperadora de Vidrio	Guarenas, Edo. Miranda	Vidrio
Recuperadora Reinfra	Valera, Edo. Trujillo	Vidrio
Reciclaje de Aluminio y otros Metales		
Metalnet	Caracas, Dto. Capital	Metales

Empresa	Ubicación	Material reciclado
Siderúrgica del Turbio S.A. (SIDETUR)	Barquisimeto, Edo. Lara	Metales
Metales Indreversa SA	Caracas, Dtto. Capital	Metales

Nota: Tabla adaptación de *Directorio de empresas recicladoras*, por Vitalis (2015), (<https://vitalis.net/empresasrecicladoras/>)

Finalmente se puede mencionar que el reciclaje a nivel mundial se está convirtiendo en un proceso que ha contribuido a minimizar el impacto negativo que ocasiona la disposición inadecuada de los residuos sólidos, posicionándose como una alternativa viable para la recuperación y el aprovechamiento de los mismos contribuyendo a mejorar incluso la economía de diversos sectores, desde los recicladores de base que convirtieron la actividad de recolección de desperdicios en las calles de las ciudades en una profesión, al punto de crearse cooperativas donde son censados y organizados, hasta la creación de empresas de reciclaje generadoras de empleo y de energía con la recuperación de ciertos desperdicios que ofrecen una segunda utilidad.

En Latinoamérica el proceso de reciclaje está en una fase inicial ya que existe una falta de compromiso e interés por parte de los pobladores quienes aún no terminan de adoptar esta filosofía, sin embargo existen organizaciones abocadas a informar y a rescatar cada vez más ciudadanos y a empresas para que contribuyan desde la fuente de generación del desperdicio a implementar la fase de separación para facilitar el reciclaje, faltando aún mucho camino por recorrer pero ya hay países como Colombia, Argentina, Brasil, México y otros donde el reciclaje ha tomado un rumbo ascendente.

El reciclaje es una técnica que surge para dar respuesta a la serie de problemas generados por la inadecuada disposición de los desperdicios, la cual consiste en aprovechar los residuos que son generados, por medio de un proceso de transformación que puede ser físico o químico, y así obtener materia prima que puede ser utilizada de forma directa a un proceso productivo. Este proceso es importante ya que contribuye con la conservación de los recursos naturales, a la contaminación de los ecosistemas, al aprovechamiento de desperdicios minimizando su volumen, entre otros.

Su implementación va en ascenso, con la ya que es una opción viable a la hora de innovar e iniciar nuevas formas de producción alternativas que impulsen la reutilización de desperdicios susceptibles a ser reciclados en la elaboración de nuevos productos, siendo uno de los pilares que contribuyen a que sea posible la implementación de una

SISTEMAS DE TRATAMIENTO Y VALORIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

Méndez P., Arcos, J., Ureta, R., Freytez E.

ISBN 978-987-82816-3-6

economía circular, ya que la técnica de reciclaje cumple con las características de esta economía como lo es la disminución de insumos y minimización en la utilización de recursos naturales, utilización máxima de la energía y los recursos renovables disponibles, la reducción de emisiones dañinas, alargar la vida útil de los productos, entre otras.

CAPÍTULO 8.

Vertederos y rellenos sanitarios ¿Son una solución ambiental?

1. Introducción

La basura hoy en día se ha convertido en un gran problema social, ambiental y sanitario, al punto que organismos globales como el Banco Mundial (BM) han publicado reportes donde se ha pronosticado que para el año 2050 mundialmente se producirán una cantidad de residuos sólidos mayor a 3.400 millardos de toneladas (Kaza et al., 2018).

Por esta razón, tanto organizaciones internacionales como varios países han impulsado y ejecutado programas de investigación y desarrollo con el fin de crear diversos modelos de gestión para el manejo apropiado de los residuos sólidos.

Los vertederos, desde tiempos remotos, se han utilizado como depósito de diversos tipos de materiales, que para la sociedad, ya no son de uso, sin embargo, en vista del crecimiento poblacional, ya no es una solución factible que todo sea acumulado en un lugar; sino más bien que sean un espacio para la separación y clasificación de los materiales; debido a que muchas personas aún no tienen el hábito de realizar esta separación en casa o por lo menos no cuentan con la costumbre para ubicar los desechos en varias bolsas o contenedores.

Es a partir del siglo XXI que se hace viral el uso de las 3 R (Reciclar, Reutilizar y Reducir) y en las instituciones se inicia con actividades para aplicar el reciclaje en las escuelas, ya que en el actuar cotidiano es donde se debe implementar la técnica y así pueda formar parte de la costumbre, para pasar a constituir pieza importante en la cultura; pero primero se debe generar el hábito en las escuelas, transformando así mentalidades.

En países que están desarrollados, ya es cotidiano, que de no aplicar las 3R, el estado emplea multas con un costo significativo, lo cual afectaría la economía de estas personas; sin embargo, en países latinoamericanos, siguen usando los vertederos como lugar de depósito para residuos sólidos urbanos.

Un ejemplo de lo anterior, es que según datos de la Unión Europea, España generó 475 kilos de residuos sólidos urbanos (RSU) por persona en el 2018, (aproximadamente

490 kilos por persona al año), donde 19,8 millones de toneladas (menos de un 15%), se transformaron para dar origen a nuevos productos o materias primas (International Facility Management Association, 2022); en cambio tanto en América Latina como el Caribe, cada año se producen cerca de 216 millones de toneladas solo de residuos sólidos municipales, según lo expresó recientemente la División de Agua y Saneamiento, organismo dependiente del Banco Interamericano de Desarrollo (BID); de esto, solo se recicla el 4,5%, el 56% se envían a rellenos sanitarios y el 40% de residuos restantes son enviados a vertederos que funcionan a cielo abierto y con deficiente control (Banco Bilbao Vizcaya Argentaria (BBVA), 2022).

En este sentido, es deber del Estado incentivar a las compañías productoras a que apliquen la técnica de reciclaje, más que establecer sanciones; donde muchas veces las empresas invierten en obtener materia prima para fabricar envases de plástico, vidrio o cartón y de generarse una recolección por calle, pueblo o ciudad, en concordancia con los camiones recolectores de desperdicios, de los envases que distribuyen su producto inicial, pueda regresar a la compañía y ser utilizados como componente primario para ser procesados, tratados y acondicionados para su reutilización. Permitiendo de esta manera generar un ciclo en los productos distribuidos por las compañías, pasando a ser reusables y no quedando esparcidos por las áreas naturales, disminuyendo la contaminación, por restos sólidos urbanos, así como la contaminación de suelo, agua y atmósfera.

El modelo de gestión integral de los residuos sólidos (GIRS) ha sido adoptado por muchos países en el mundo, y el mismo comprende cuatro macro actividades fundamentales las cuales son: recolección, transferencia (acopio temporal), transporte y disposición final. Siendo esta última actividad la que bien planificada, diseñada, construida, mantenida y correctamente operada, permitirá la segura eliminación de los residuos de manera ambiental y sanitaria.

La disposición final implica destinar un sitio estratégicamente bien ubicado sobre el cual se habilitarán unas instalaciones para el confinamiento de los desechos, en la menor área posible, reduciendo al máximo el volumen, por otra parte, dichas instalaciones deberán contar con una infraestructura mínima adecuada, para la recolección de los gases productos de la degradación de materia orgánica contenida en los desechos sólidos depositados y para la recolección y tratamiento de los lixiviados.

Por lo anteriormente expuesto en el presente capítulo se llevará a cabo un análisis del impacto de dichos vertederos o rellenos sanitarios sobre el ambiente, sobre todo en los aspectos de aguas superficiales, subterráneas, ruidos y vibraciones, así como en la emisión de gases entre otros.

2. Vertederos

2.1 Definición de vertederos

Según la Real Academia Española (2021c), un concepto básico de vertedero es: “Lugar donde se vierte basuras, residuos o escombros, generalmente situado a las afueras de una población”. Otra definición más detallada es la planteada por la ambientóloga Roperó (2020), la cual señala, que estos son: un establecimiento destinado para almacenar restos de basura en el subsuelo o biósfera indefinidamente, con condiciones de seguridad e inspección, teniendo como propósito no dañar el entorno, evitando la contaminación del agua, suelo, transmisión de enfermedades, proliferación de sustancias peligrosas o posibles incendios.

Sin embargo, se debe hacer una diferenciación entre la palabra vertedero y relleno sanitario, ya que en varias oportunidades son utilizadas como sinónimo, pero no lo son; según la revista científica Decología.info (2022), señala que un vertedero:

“es un **agujero abierto en el suelo**, donde se entierra la basura y donde los animales a menudo pululan; por tanto, los vertederos no ofrecen protección ambiental y no están regulados; en cambio un relleno sanitario es una estructura cuidadosamente diseñada y monitoreada que aísla la basura del ambiente circundante (por ejemplo, agua subterránea, aire, lluvia) y este aislamiento se logra con el uso de un forro inferior y una cobertura diaria del suelo”.

Considerando lo antes planteado, en este capítulo se maneja la palabra vertedero controlado, para definir un relleno sanitario que posee características como cumplir con la regulación y control de la estructura, el diseño, la planificación y la operación de ingeniería; y los vertederos a cielo abierto o ilegales, son los que operan, como lo indica su nombre a cielo abierto, es decir, sin control alguno.

El primer tipo, relleno sanitario o vertedero controlado, cuenta con una impermeabilidad del suelo total, con tuberías que acumulan el biogás, producto de la degradación de la materia, el cual puede formar energía, además de contar con sistemas

de drenaje de lixiviados, generando una codificación dentro de los vertederos controlados, dependiendo de los restos que acopia.

En cuanto a los vertederos a cielo abierto o ilegales, se encuentran presentes en muchos países del mundo, especialmente en los más pobres, por no contar con una legislación o Estado que haga valer la ley, además de no poder destinar recursos para una correcta infraestructura, que garantice el objetivo o propósito antes mencionado; son peligrosos, porque no tienen ningún tipo de control o seguridad que proteja el ambiente, ni la salud de los trabajadores o colectores, por lo que son un foco de contaminación, para todo el planeta.

2.2 ¿Por qué enfocarse en vertederos abiertos?

Los vertederos abiertos (también conocidos como basurales) representan un riesgo de importancia para la salud pública y el medio ambiente. Hacer una transición de los vertederos abiertos a los rellenos sanitarios debe ser el objetivo final para la mayoría de las ciudades y centros poblados. Sin embargo, esa transición suele ser completa y costosa y requiere de una extensa planificación a largo plazo. Una transición por etapas, centrada en mejorar las operaciones de los basurales existentes utilizando técnicas de bajo costo a medida que se desarrollan los rellenos sanitarios y finalmente su cierre y el paso a rellenos sanitarios es una mejor práctica en la mayoría de las situaciones.

Sin unas adecuadas medidas de gestión, estos vertederos abiertos pueden ser causantes de una gran cantidad de impactos al ambiente y a la salud, entre los cuales, según la Environmental Protection Agency de United States EPA (2020), se tiene:

- Contaminación del aire: los vertederos abiertos producen emisiones de metano, el cual es un precursor del ozono, a nivel del suelo. Además, los incendios producidos en vertederos abiertos liberan al aire partículas y dioxinas, causando impactos en la salud de los humanos y contribuyendo al cambio climático global y regional.
- Riesgo de incendios: en vertederos abiertos existe mayor riesgo de producirse incendios espontáneos (tanto en la superficie, como subsuperficiales) a causa de que una gran parte de los residuos se encuentran expuestos al oxígeno. Adicionalmente, en algunos de estos lugares, los recicladores de tipo informal queman estos residuos para la recuperación de metales, lo que aumenta la probabilidad de ocurrencia de incendios superficiales.

2.3 Mejora de las operaciones en los vertederos abiertos

En vertederos abiertos es posible hacer actualizaciones sencillas con bajo capital de inversión y costos fijos mínimos para disminuir el impacto al ambiente y a la salud que estos causan. Como se plantea a continuación, según la Environmental Protection Agency United States (EPA, 2021):

- Colocar una cubierta a diario: aplicar diariamente material para recubrir (compost, tierra, entre otros) logra disminuir amenazas a la salud y así prevenir enfermedades que traen consigo los residuos expuestos.
- Colocar drenajes alrededor de todo el vertedero para canalizar las escorrentías y los lixiviados.
- Minimizar el lixiviado: compactar el suelo y nivelarlo regularmente (bimensualmente resulta eficiente) permite minimizar la producción de lixiviados a través del suelo. Esto permite que el agua de lluvia fluya a los drenajes del perímetro y no se concentre en el suelo. Es posible realizar esta operación manualmente o utilizando equipos pesados (el alquiler de estos equipos pesados podría ser la opción más económica).
- Implantar prácticas de protección a la salud humana: proteger la salud de los trabajadores propios y del sector informal, a través de capacitaciones referidas a la higiene y seguridad, facilitación de agua y jabón, minimizando el riesgo de lesiones causadas por objetos punzantes presentes en los residuos, suministrando a los trabajadores ropa, calzado y equipos de protección personal.
- Realizar análisis regularmente: realizar análisis periódicamente al agua subterránea con el fin de detectar contaminantes químicos orgánicos tóxicos, bacterias y metales pesados.
- Detener el vertido en lugares poco estables: el vertido de residuos en terrenos poco estables aumenta el riesgo de que ocurran fallas en la inclinación del mismo. Es conveniente la utilización de excavadoras y otros equipos replantear el lugar y lograr que las inclinaciones del terreno sean más graduales, y, por consiguiente, más estables.
- Instalación de cercas: un cercado puede evitar que los desechos migren fuera de la instalación por acción del viento. Además, también regulan el acceso al vertedero, lo que disminuye el riesgo de accidentes por incendios y por exposición a peligrosas sustancias.

2.4 Conversión de vertederos abiertos a vertederos controlados

Adicionalmente a la implementación de las mejoras de costo inicial reducido, los vertederos abiertos han sido mejorados en muchas ciudades transformándolos a vertederos controlados. Según EPA (2021), esta conversión implica generalmente los pasos siguientes:

- Hacer una evaluación del lugar: esto servirá para determinar si la localización del vertedero abierto que existe es adecuada para ser convertido en un vertedero controlado o para ser cerrado definitivamente. Es necesario un sitio de eliminación alternativo, en caso que la conversión no sea práctica.
- Acondicionar el lugar existente: convertir un vertedero abierto a un vertedero controlado involucra varios pasos, que incluyen la nivelación y compactación de los residuos que existen y la construcción de canales o zanjas para drenaje, entre otras acciones de acondicionamiento.
- Los procedimientos de operatividad involucran, además, delimitar el área de trabajo, cubrir los residuos que están expuestos con arena, tierra o arcilla y colocar una barrera de basura (EPA, 2002). En algunos casos, donde existe una cantidad de residuos mínima en el vertedero, estos pueden ser eliminados temporalmente, en tanto es instalado un revestimiento nuevo y un sistema para la recolección de los lixiviados.
- También es recomendable que las actividades de acondicionamiento consideren a futuro realizar planes y acciones de reciclaje en el sitio, que incluyan a trabajadores informales del sector. Existen ciudades que han interrumpido actividades de reciclaje dentro de los vertederos y, en cambio, permiten que los trabajadores informales del sector realicen acciones de reciclado más organizado fuera del sitio.
- Realizar supervisión a las instalaciones de forma frecuente para determinar la composición y el volumen de los residuos, la generación de gas metano, el estado del agua superficial y subterránea, y la condición del sistema de drenaje, son prácticas necesarias en vertederos controlados. Pues si estos no tienen un monitoreo regular, pueden llegar a presentar algunos problemas que deberán ser abordados con urgencia, tales como fallas en las inclinaciones del terreno a medida que los residuos se van compactando.

- Cerrar y cubrir por etapas el vertedero a medida que se va agotando la capacidad para recibir residuos.
- Realizar monitoreos programados hasta que los análisis indiquen que ya no es necesario realizarlos; esto se requerirá tal vez durante unos 10 años, y hasta unos 30 años o más.

2.5 Cierre de los vertederos abiertos

Cerrar definitivamente un vertedero abierto no es sinónimo de simplemente abandonarlo. Los productos generados en la descomposición siguen siendo producidos mucho tiempo después de ejecutarse el cierre; por lo tanto, es necesario realizar a largo plazo una planificación y un mantenimiento, para disminuir los riesgos a las poblaciones alrededor, después del cierre, Según EPA (2021), las prácticas más adecuadas para cerrar vertederos abiertos y controlados involucran:

- Realizar actividades y programas de extensión: se ha determinado que algunas ciudades han comprobado que es de mucha utilidad identificar funciones y responsabilidades de las personas que serán afectadas por el cierre, tales como operadores, residentes, entre otras partes involucradas. Además, propiciar debates con estos grupos puede ayudar a los responsables de tomar decisiones y a las autoridades locales a reunir información sobre posibles inconvenientes y lograr aceptabilidad. Como un ejemplo de esto, es aconsejable contactar a los trabajadores informales del sector que dependen de los materiales del vertedero abierto para su sustento, incluirlos de manera formal en los planes de cierre del vertedero y emplearlos como trabajadores en las instalaciones nuevas.
- Desarrollar un programa o plan para el cierre: un plan para el cierre define detalladamente actividades a realizar durante el cierre del lugar. Las acciones del plan pueden incluir la implantación de sistemas de gestión de gases y lixiviados, la estabilización de las pendientes e inclinaciones del terreno, evitando peligros por erosión, y el diseño de una adecuada cubierta definitiva. El plan debe considerar también, la aplicación de medidas de prevención del vertido ilegal a futuro, el acceso al sitio por personal no autorizado, una vez este sea cerrado, la reubicación de trabajadores informales (si existen) y la instalación de pozos para el monitoreo.
- Gastos de capital: la inversión de capital para el lograr el cierre incluyen los costos de materiales de la cubierta final, el sistema de drenaje, de lixiviación y de la gestión del

gas, y la reubicación de la población informal, entre otras. Los gastos operativos también incluyen requerimientos de los equipos y el trabajo de obreros.

- Desarrollo de un plan de gestión tras el cierre: un vertedero continuará generando gases y produciendo lixiviados por mucho tiempo luego de dejar de recibir los residuos. Además, la cobertura final del lugar puede erosionarse con el tiempo a causa de las precipitaciones y la exposición a los elementos de la naturaleza. Un plan diseñado correctamente para ser aplicado en la etapa posterior al cierre garantiza el mantenimiento y el monitoreo continuo del lugar por al menos unos 10 años.
- Considerar otros usos para el vertedero una vez cerrado: siempre y cuando el vertedero haya sido cerrado correctamente, puede ser usado a futuro con otra finalidad, como áreas recreativas, espacios públicos verdes, o para construcciones. Pero resulta muy importante asegurarse que se hayan eliminado riesgos por emisiones de metano y contaminación por lixiviados antes de dar el uso alternativo.
- Actividades de preparación: resulta importante contar con una preparación para las actividades de limpieza y remediación, según sea lo necesario. Situaciones como exposición y escapes de lixiviados, deslizamiento de residuos, incendios y explosiones a menudo son el resultado de inadecuados procedimientos durante el cierre y posterior a este. Entre las soluciones se pueden incluir la excavación del suelo y tecnologías para limpieza un poco más agresivas.

3. Rellenos sanitarios

3.1 Definición de relleno sanitario

Un relleno sanitario está definido tradicionalmente como la instalación física utilizada para la disposición final de residuos sólidos en suelos, diseñada y operada de forma tal que, se logre minimizar el impacto que esta causa en la salud pública y en el ambiente. La operación del relleno sanitario generalmente se fundamenta en el extendido de los residuos, en capas muy delgadas, que se van compactando y cubriendo con tierra diariamente (Rodríguez, 2008)

El diseño de los rellenos sanitarios se ha enfocado en el control y la mitigación de la probable contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, la reducción de riesgos para los funcionarios del saneamiento, la mitigación de las emisiones de contaminantes atmosféricos y para permitir la recolección de gases de los vertederos para ser usados como fuente de energía potencial.

Los rellenos o vertederos sanitarios modernos son sitios para la eliminación, en los cuales se implementan sistemáticamente todas las prácticas siguientes:

- Utilización de revestimientos y sistemas para lixiviados, recolección de gases para el control y la prevención de impactos adversos al ambiente y por consiguiente a la salud y a la seguridad de la población.
- Eliminación de los residuos en un área operativa específica y definida claramente.
- Compactación de residuos para preservación de los recursos terrestres.
- Aplicación de material de recubrimiento diariamente para el control de riesgos y peligros a causa de los residuos expuestos.
- Diseño y operación adecuada del vertedero para el control y la minimización del asentamiento poblacional interno y externo al vertedero.
- Monitoreo de las aguas subterráneas para determinar posibles escapes en los revestimientos.

Un enfoque adecuado y establecido a largo plazo involucra la implantación sistemática de la totalidad de estas prácticas. Sin embargo, en países en desarrollo, resulta un desafío técnico y financiero implementar estas prácticas en su totalidad. De allí que, entre los objetivos a plazo corto se encuentra implementar la mayor cantidad posible, en las circunstancias que existen y considerando que el objetivo más significativo es la prevención de los impactos.

2.2 Tipos de vertederos controlados o rellenos sanitarios

Son clasificados según sus características, estructura, forma de vaciado, terreno, grado de compactación, o al tipo de residuos sólidos urbanos (RSU).

Según el terreno: se puede dividir en:

- Área: lo que rodea o está conformado el lugar.
- Trinchera: según el corte que tenga o que se le haga al terreno.
- Vanguardia/Depresión: por la geomorfología o relieve que presente el suelo.

Según el grado de Compactación se subdivide en:

- Vertedero de baja densidad: donde la consistencia que puede llegar a alcanzar los residuos por motivo del proceso de compactación es de 500Kg/m^3 .
- Vertedero de compactación media: cuya densidad por compactación puede alcanzar a 800Kg/m^3 .
- Vertederos de alta densidad: llegan a 1100Kg/m^3 , siendo los menos frecuentes, ya que adicionalmente al proceso de compactación, se produce una trituración de restos y el material no es vertido diariamente para su cobertura.

Por el tipo de Residuo Urbano Sólido (RSU) (Tchobanoglous et al., 1998):

- Vertedero para residuos peligrosos: tales como abrasivos, cenizas, carbonatos, escorias, sólidos inorgánicos, cauchos, amiantos, también los que son derivados de procesos químicos y físicos o de solidificación y estabilización como grasas minerales, pinturas, lodos, alquitrán, fangos triviales; entre otros que estén plasmados en la Resolución de Autorización Ambiental Integrada del Centro de Tratamiento de Residuos.
- Vertedero para residuos que son no peligrosos: un ejemplo de estos restos, son los llamados residuos comerciales y domiciliarios mezclados.
- Vertedero para restos inertes: comprenden los escombros; es decir, material inorgánico de construcción.
- Vertederos para residuos orgánicos.

Según la revista Decología.info (2022), existen 3 tipos de vertederos:

- Vertederos de residuos sólidos municipales o no peligrosos: los cuales van a aceptar residuos domésticos, comerciales, los procedentes de limpieza domiciliaria, algunos residuos industriales no peligrosos.
- Vertederos gestionados o de residuos peligrosos: que reciben, residuos de construcción, relleno limpio, de demolición con contaminantes ligeros, y en cuanto a los residuos peligrosos aceptan oxidantes; es decir, que tienen reacciones exotérmicas al estar en unión con otras sustancias, los explosivos, residuos cancerígenos, nocivos, inflamables, infecciosos, corrosivos y tóxicos; igualmente abarcan los residuos eco tóxicos, siendo un foco importante de peligro para el ambiente, ya que presentan riesgos y consecuencias inmediatas.

- Vertederos para residuos de construcción y demolición, también llamados de residuos inertes: que aceptan desechos de madera, placas de yeso, asfalto, aislamiento, entre otros y no sufren transformaciones químicas, físicas o biológicas.

3.3 Aspectos de generación de un relleno sanitario

Entre los aspectos más relevantes del proceso para generación en un relleno sanitario, se incluye la manera de determinar la composición de sus residuos, el diseño, el costo del vertido, la localización, la gestión, la operación, el cierre y el postcierre del lugar.

- Composición de residuos: la cantidad y tipo de compuestos existentes en los residuos sólidos depositados bajo tierra en el vertedero es definitivo para poder determinar cantidades, tipo y características de los distintos subproductos que se emiten a suelos y aire. Pues dichas emisiones son liberadas como consecuencia de procesos de degradación ocurrientes en el interior del vertedero. Una orientación bien establecida es diseñar estos rellenos sanitarios con el fin de manejar cantidad y tipos de residuos que se proyecta desechar en el lugar (Savage et al., 1998). Muchas ciudades consideran importante las variables siguientes que están relacionadas con los residuos en el momento de planificar los rellenos sanitarios:
 - ✓ Que las ciudades tengan información de calidad referida a la cantidad y la composición de los residuos que se depositarán en el relleno, la cual es diferente a la composición general de los residuos producidos por la población a la que presta servicios. Durante el desarrollo de planes y programación, la ciudad determina el volumen y el flujo de residuos sólidos en el sitio de la eliminación; además, identifica todos los aspectos que, en el tiempo, influyen en el volumen, ya que los vertederos funcionarán durante muchos años.
 - ✓ Los planes presentes y futuros de retiro de residuos a otros procesos de reciclaje, como residuos orgánicos o reciclables, y la afectación de esto en el volumen y el tipo de residuos desechados en el lugar.
 - ✓ La probabilidad que los residuos incluyan residuos peligrosos o residuos que presentes riesgos en el momento de ser desechados, y que deban tratarse por separado, por ejemplo, residuos médicos, los cuales considerarse como “inaceptables” en vertederos sanitarios.
- Costo del relleno sanitario: es importante entender desde el principio el costo de diseño, de construcción, de operación y de monitoreo de los rellenos sanitarios en el

transcurso de su etapa operativa, su etapa de cierre y su etapa postcierre. Si no existe una comprensión real de los costos y la forma de afrontarlos, las ciudades correrán el riesgo de cancelar el proyecto antes de ser completado, por financiaciones insuficientes, o de cerrar el mismo luego de su construcción, en caso que las operaciones demuestren ser muy costosas. Es necesario tener una reserva de fondos que sean suficientes para cubrir la totalidad de los costos de mantenimiento y de monitoreo de los vertederos luego de su cierre; pues un inadecuado el mantenimiento tras el cierre puede causar que el lugar no pueda contener los residuos y los subproductos generados.

- Selección del sitio: resulta muy importante el hecho de considerar varios elementos al seleccionar un lugar para instalar un relleno sanitario, incluyendo elementos de tipo geológicos y no geológicos.
 - ✓ Elementos hidrológicos y geológicos: la información de tipo hidrológica y geológica puede ser utilizada en la selección de las zonas más favorables para la instalación de los rellenos y para el diseño del mismo, con la finalidad de disminuir la contaminación ambiental potencial.
 - ✓ Elementos no geológicos:
 - a. Demográficos y políticos: la ciudad debe considerar factores demográficos y políticos, como posesión de la propiedad, límites y derechos de uso, reacciones de la población aledaña e impactos posibles sobre las poblaciones marginales.
 - b. Capacidad del relleno: los rellenos sanitarios generalmente son diseñados para operar durante muchos años de recolección de residuos. El cálculo del volumen o capacidad deseado del mismo por lo general se realiza en función de la cantidad de residuos *per cápita* por año, el crecimiento económico y tamaño de la población, y de la proyección de la población, las alternativas de tratamiento de los desechos y la cantidad de los años proyectados para que él esté en funcionamiento.
 - c. Recorridos del transporte: considerando que mientras más distante se encuentre el relleno del lugar de generación y recolección de los residuos, mayor será el costo del transporte de estos, hasta el vertedero. Por estos motivos las estaciones de transferencia han sido consideradas de mucha

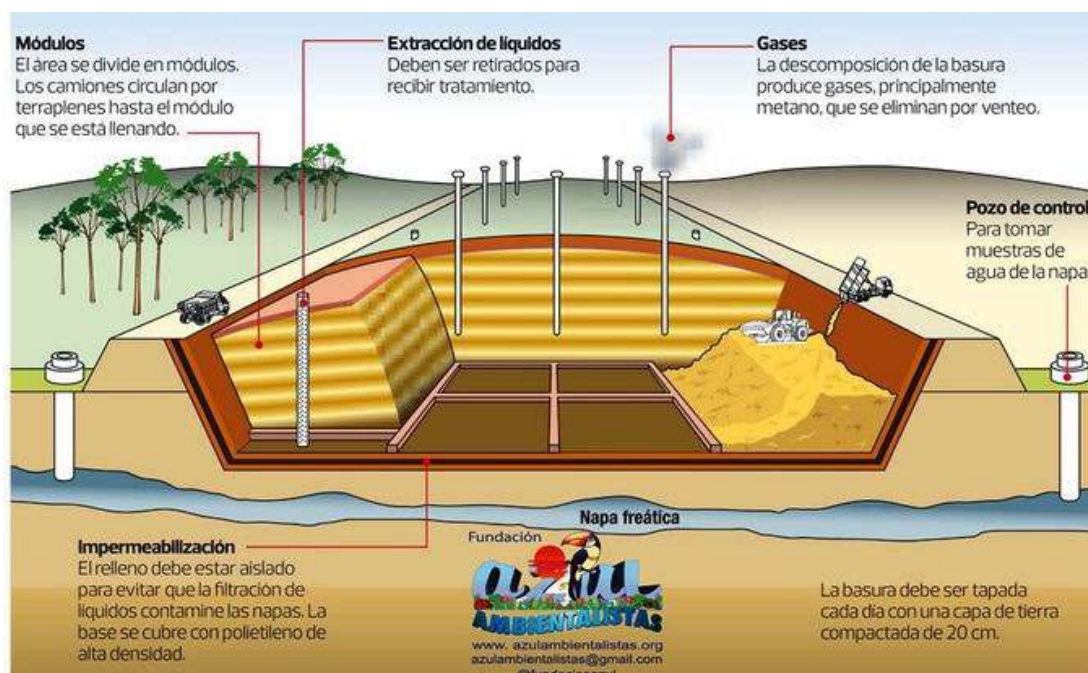
utilidad para el almacenamiento temporal y trasvase de los residuos provenientes de los vehículos de recolección para ser transportados por un sistema a gran escala.

3.4 Diseño de los rellenos sanitarios

Es importante señalar que, el diseño de los rellenos sanitarios con el fin de proteger la salud de la población y el medio ambiente es una de las prácticas más aceptables. Por lo cual, los criterios para el diseño específico deben considerar requisitos nacionales o regionales, sin embargo, existen varias características de diseño generales que es necesario revisar, las cuales se presentan a continuación y se pueden observar en la Figura 79:

Figura 79

Características de diseño de un relleno sanitario



Nota: Figura de *Rellenos sanitarios*, por Web Veo Verde citado por Chile.Cubica (2017), (<https://www.chilecubica.com/eficiencia-energ%C3%A9tica-nzeb/rellenos-sanitarios/>)

- **Revestimiento inferior:** estos son utilizados con el fin de evitar que los lixiviados ingresen a las aguas subterráneas, manteniendo así los fluidos dentro de la zona del vertedero. Los revestimientos más comunes están hechos de materiales impermeables como tierras o arcillas compactadas, de materiales sintéticos, o de una mezcla

compuesta de materiales de tierra y materiales sintéticos. Los suelos arcillosos bien compactados se utilizan con mucha frecuencia, gracias a sus características de impermeabilidad y a su fácil disponibilidad general (Savage et al., 1998).

- **Recolección y tratamientos de los lixiviados:** en los rellenos sanitarios, aunque estén debidamente revestidos, los lixiviados se acumulan en el interior de los mismos. De manera que, es muy importante mantener los lixiviados en el interior del relleno en el nivel mínimo, porque la presión del agua puede llegar a desplazar lixiviados a través del revestimiento permeable o de imperfecciones en este. Por lo tanto, un relleno diseñado correctamente incluye equipos para la recolección y el desvío de los lixiviados fuera del relleno para ser tratado. Por ejemplo, se pueden realizar instalaciones de tuberías perforadas para recolectar los lixiviados y desviarlos para su tratamiento. Entre las alternativas para tratamientos se incluyen:
 1. Descargas a sistemas de tratamientos de aguas residuales
 2. Evaporación de los lixiviados almacenados en tanques de evaporación
 3. Reciclaje y/o recirculación de lixiviados alrededor del vertedero (lo que puede llegar a aumentar la cantidad de generación y recolección de lixiviados)
 4. Tratamientos en el lugar (EPA, 2002)
- **Cubierta:** todo relleno sanitario común debe tener dos formas diferentes de cubiertas:
 1. Una cubierta colocada diariamente sobre los residuos en el área de trabajo al final de las operaciones del día
 2. Una cobertura final, o tapa, que se trata de un material colocado sobre el relleno acabado. La cubierta por lo general incluye materiales tanto naturales, como sintéticos entre los que se cuentan tierras, compostajes, membranas geosintéticas y neumáticos triturados.
- **Recolección de gases de vertedero y recuperación de energía:** la recolección de los gases de vertederos y la recuperación de energía son actividades muy importantes en las operaciones de rellenos sanitarios. Los llamados gases de vertederos (LFG, por sus siglas en inglés), se generan como subproductos de la degradación de algunos tipos de residuos. Los sistemas para la recolección de los LFG pueden ayudar no solo a recolectar, sino a mover, quemar o aprovechar este gas de forma productiva. Quemar este gas ayuda a disminuir los riesgos de incendios espontáneos y amortigua las emisiones del gas metano. Los proyectos para recuperación de energía con los LFG

pueden ser diseñados con la finalidad de aprovechar el gas recogido para producir electricidad o con diferentes usos productivos.

- **Monitoreo en aguas subterráneas:** un monitoreo en aguas subterráneas es necesario para poder determinar su calidad en la instalación y así determinar si ha ocurrido una fuga de contaminantes por la base del vertedero. Este sistema de monitoreo comprende unos pozos que son colocados en un sitio adecuado y a una profundidad ideal para poder realizar una toma de las muestras de agua representativas de su calidad (EPA, 1995).
- **Acceso al sitio:** la instalación de un cercado perimetral en el sitio es necesario para controlar el acceso de personas al vertedero de forma estricta y así evitar lesiones, recolecciones de residuos no autorizadas, y vertidos ilegales (EPA, 2002). Resulta importante considerar la restricción del acceso al lugar y las consecuencias que esto puede traer a personas que tienen la recolección y la recuperación de estos residuos como medio de subsistencia, con la venta de materiales reciclables. Muchas ciudades están logrando una mitigación de estos impactos al integrar estos trabajadores informales a operaciones formales de recogida y eliminación, asesorándoles para lograr que se organicen en cooperativas y ofreciéndoles acceso planificado a los distintos rellenos sanitarios.

3.5 Construcción de un relleno sanitario

En primer lugar se debe seleccionar una zona que esté alejada de la urbe, de ríos, lagos y mares, para posteriormente realizarle estudios de suelo y determinar que no existen afluentes de agua subterráneas que puedan ser contaminadas; luego adaptar el terreno corroborando la barrera geológica artificial, el geosintético de refuerzo, para la impermeabilización, las mallas y tuberías de drenaje para los lixiviados, capa de filtro, y determinar finalmente la disposición de esos subproductos que se van a originar por la acumulación de sustancias.

Posteriormente, verificar la maquinaria que se necesita; es decir, los recursos que se requieren y los que se van a emplear para salvaguardar las riquezas naturales del lugar, así como garantizar la salud tanto de las personas que operan en el vertedero, como de los seres vivos que se encuentran en la zona. Una vez cumplidos los pasos antes descritos, se puede proceder al uso del vertedero controlado.

En algunos países existe legislación para el control de los rellenos sanitarios, por ejemplo en Venezuela existe una ley del año 1990 pero aún vigente, publicada según el Decreto 230, y titulada “Normas Sanitarias para Proyecto y Operación de un Relleno Sanitario de Residuos Sólidos de Índole Atoxico”, la cual establece varios parámetros sanitarios que deben cumplir los proyectos de construcción o la operación de los rellenos sanitarios (Ministerio de Salud y Desarrollo Social, 1990), entre los cuales se mencionan:

- ✓ Supervisión: desde un punto de vista legal esta ley establece que todo relleno sanitario privado o público, estará bajo vigilancia exclusiva del Ministerio de Sanidad y Asistencia Social.
- ✓ Autorización: este documento legal indica que, para ser aprobada la operación del relleno, se debe solicitar por escrito, con firma de la empresa o de una institución pública (Ministerio o Alcaldía), a la autoridad sanitaria de competencia, la intención de iniciar la ejecución de dicho relleno; la cual debe estar suscrita por los responsables técnicos, quienes deben ser profesionales en ejercicio legal, tanto para el proyecto, como para la ejecución.
- ✓ Documentos Técnicos: por otra parte, la solicitud debe indicar la ubicación geográfica del lugar, donde se instalará el relleno sanitario y debe estar acompañada de cuatro (04) copias de los documentos y planos siguientes:
 - a. Descripción y ubicación exacta de la propiedad.
 - b. Detalles topográficos del lugar.
 - c. Topografía definitiva y ubicación de las instalaciones.
 - d. Estrato geológico subterráneo del lugar.
 - e. Información detallada acerca del sistema de agua freática, donde se incluya el nivel más alto y los patrones de flujo.
 - f. Tiempo de percolación en el sitio considerado para realizar la disposición final de estos residuos sólidos.
 - g. Uso actual y a futuro del sitio considerado para realizar la disposición final de estos residuos sólidos.
 - h. Información meteorológica y climatológica tal como: vientos que prevalecen, precipitaciones pluviales, variaciones de temperatura.
 - i. Información del suelo como: análisis de los suelos y del material de recubrimiento, sea que se obtenga en el sitio o se traiga de otro lugar.

- ✓ Documentación Servicios Públicos: en relación a los servicios públicos de apoyo del relleno, la documentación del proyecto debe incluir la siguiente información:
 - a. Suministro del agua potabilizada.
 - b. Suministro del agua para el control de los incendios.
 - c. Sistemas de alcantarillados, de tipos sanitario y pluvial.
 - d. Información acerca de las vías de acceso donde se incluyan puentes y pasos internos.
 - e. Métodos de recolección en el lugar de la disposición final.
 - f. Disponibilidad de servicio eléctrico y telefónico en el relleno sanitario.
 - g. Sistemas para la prevención y el de control de incendios, donde se explique los procedimientos para ayudas de emergencia.
- ✓ Documentación Técnica y Equipos: en cuanto a los equipos que se usarán en el relleno sanitario, la información debe incluir:
 - a. Requisitos para seleccionar del equipo.
 - b. Mantenimiento necesario.
 - c. Técnicas de operación.
 - d. Información legal acerca de los documentos de propiedad del terreno, con previa conformidad de uso, que haya sido expedida por el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables.
 - e. Métodos de operación.

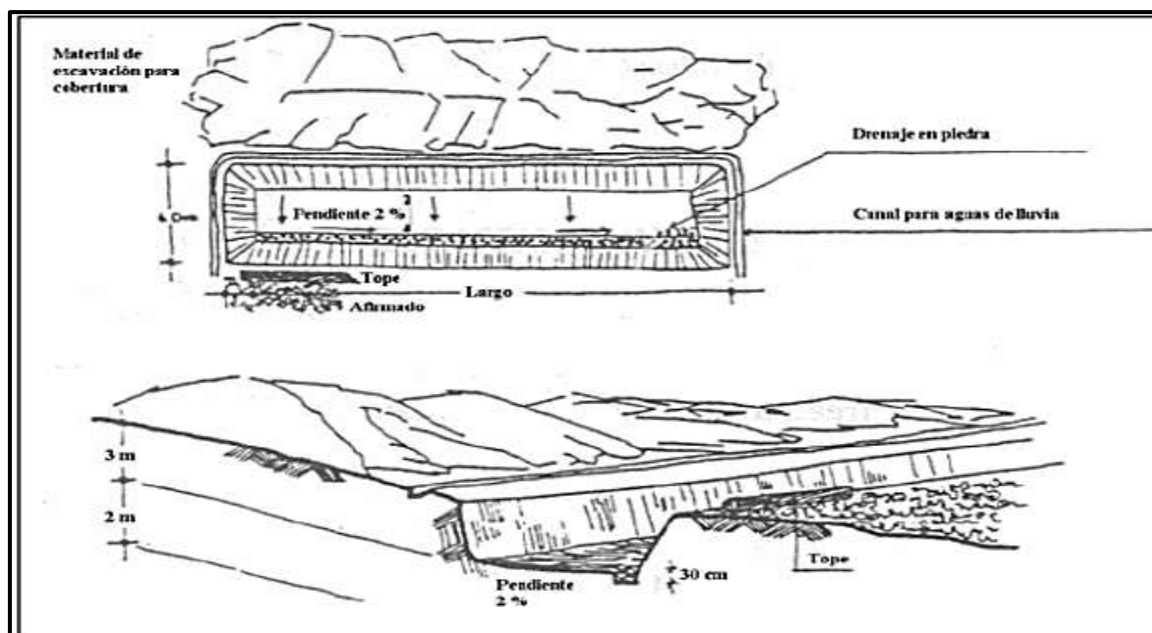
Una vez elaborado el diseño y el proyecto, y de haberse seleccionado el sitio definitivo, delimitado su área o superficie se procede a su construcción, siguiendo las instrucciones establecidas en el manual de operación de dicho vertedero. En la práctica de la construcción de vertederos de basura existen tres métodos constructivos, que dependiendo de las variables como: tipo de suelo, nivel freático, topografía que afectan en su construcción y operación, se seleccionará uno u otro método o una combinación de ellos (Paolini, 2007).

- ✓ Construcción en Zanja o Trinchera (Ver Figura 80), el cual consiste en excavar una zanja en forma de talud, o escalonada, con unas dimensiones tales (largo, ancho, y profundidad) preestablecidas en la memoria de proyecto o en el manual de operaciones del vertedero. Esta zanja se ubicará en un sitio destinado solo para la

deposición de desechos sólidos específicos a almacenar y recibe el nombre genérico de celda. En el fondo de la celda y dependiendo si el tipo de suelo presente es permeable o no, se colocará una capa de plástico impermeable que evitará la infiltración del lixiviado, y para facilitar su drenaje el fondo se deberá construir con una pendiente. Sobre los bordes laterales del fondo se deben instalar tuberías de drenajes y tanto estas tuberías como el punto más bajo del fondo deberán estar conectado a un sistema de desagüe que conducirá el lixiviado drenado hacia un sistema de tratamiento del mismo. Sobre la capa de fondo impermeable natural o construido se colocará una cama de piedra que junto con las tuberías y la descarga de fondo constituirán el sistema de drenaje de la celda. El volumen de tierra excavado será usado como capa de cobertura, sobre el volumen de desecho depositado, el cual deberá ser previamente extendido y compactado adecuadamente, con maquinaria pesada para minimizar el volumen de los desechos.

Figura 80

Método de construcción en zanja de un relleno sanitario

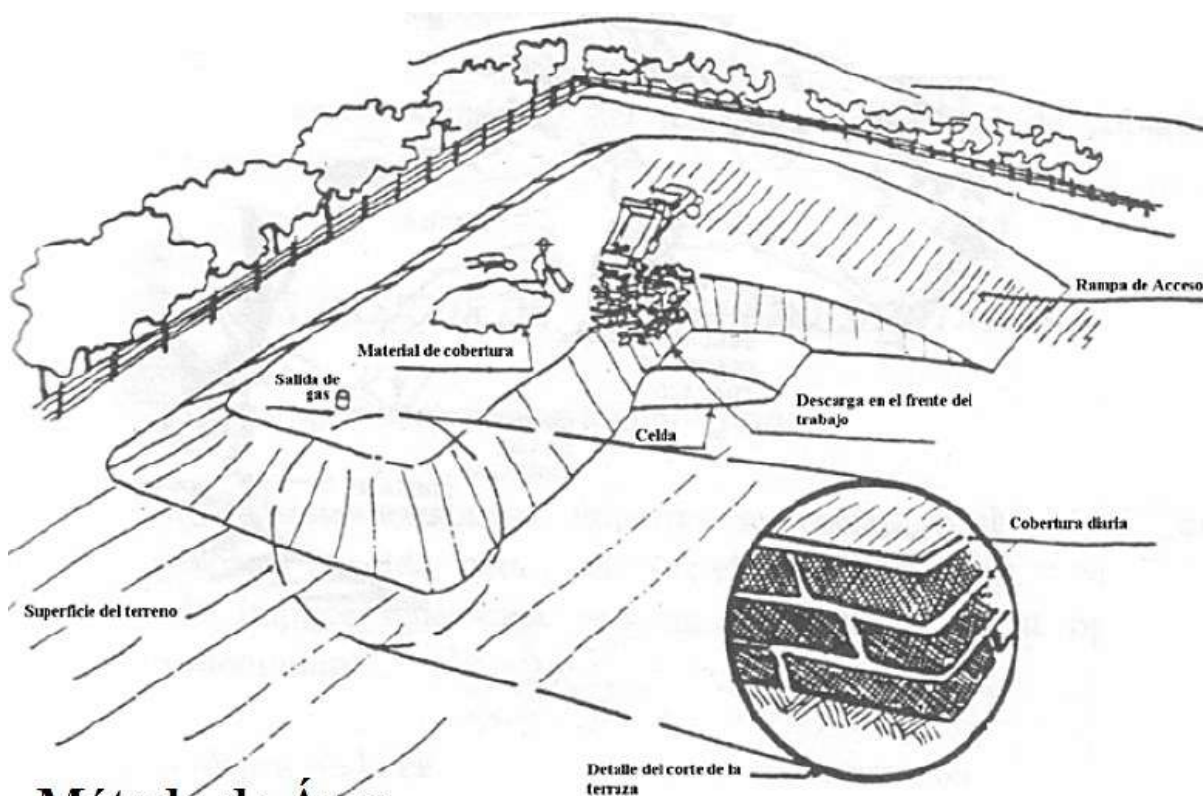


Nota: Figura de *Validación de la metodología EVIAVE en vertederos en Venezuela. Análisis y propuestas de soluciones* (p.45), por Jaramillo (1997) citado por Paolini (2007), Tesis doctoral, Universidad de Granada (<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=72183>)

- ✓ **Construcción en Área o Superficie (Ver Figura 81):** es usado cuando en el sitio o terreno donde se implantará el relleno, no puede realizarse excavaciones, ya sea porque el tipo de suelo no sea el adecuado, porque el nivel freático esté cercano a la superficie, o pueda sufrir de inundaciones. Este método es constructivamente más fácil de hacer ya que consiste en construir una terraza con talud sobre el terreno, y a diferencia del método de zanja, se necesita construir una rampa para permitir a los camiones recolectores depositar los desechos sobre la terraza o área destinada. Otro punto importante es que se requiere de material de préstamo o relleno para poder realizar la cobertura sobre la capa de desechos que ha sido previamente extendida y adecuadamente compactada. La terraza se subdivide en áreas más pequeñas llamada celdas, sobre el cual se deberá colocar o depositar los desechos. Si bien en este método, la terraza no requiere la construcción de un sistema de drenaje interno para el lixiviado, se necesita de un sistema que encauce exteriormente tanto las aguas de lluvia como los lixiviados.

Figura 81

Método de construcción en área de un relleno sanitario



Método de Área.

SISTEMAS DE TRATAMIENTO Y VALORIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

Méndez P., Arcos, J., Ureta, R., Freytez E.

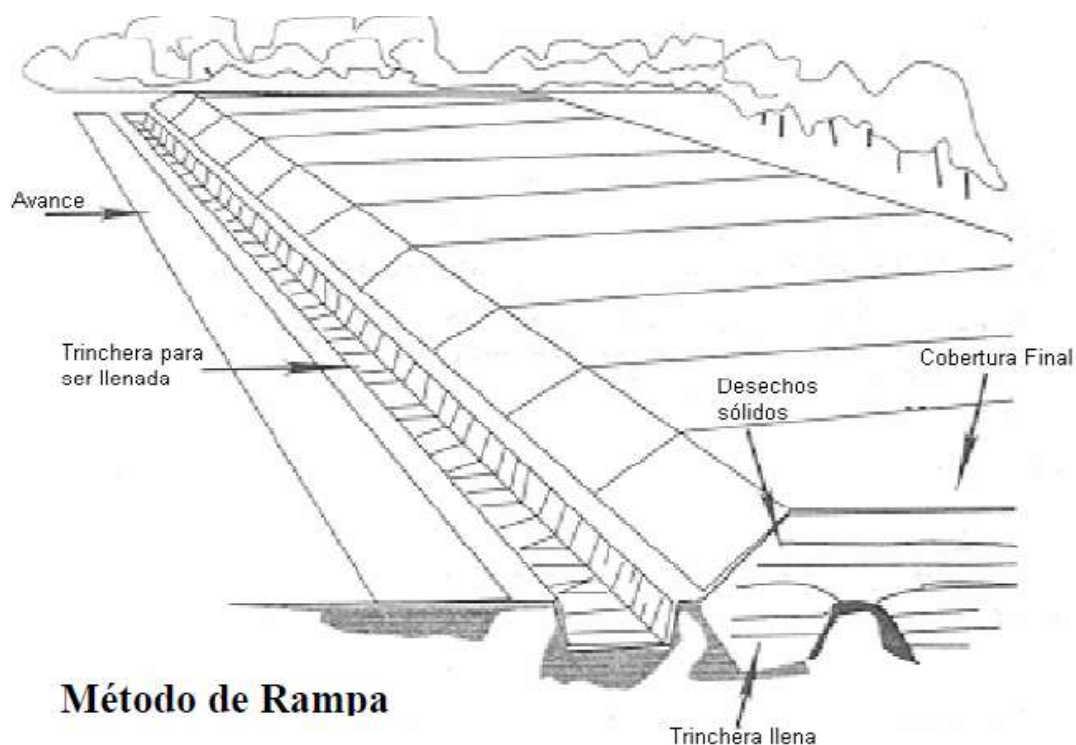
ISBN 978-987-82816-3-6

Nota: Figura de *Validación de la metodología EVIAVE en vertederos en Venezuela. Análisis y propuestas de soluciones* (p.45), por Jaramillo (1997) citado por Paolini (2007), Tesis doctoral, Universidad de Granada (<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=72183>)

- ✓ Construcción en Rampa (Ver Figura 82): se trata de una modificación del método del Área y usa la pendiente natural del terreno para la conformación de la terraza, lo que permite el uso óptimo de la topografía del terreno, siendo el método constructivo más ampliamente usado para la construcción de distintos rellenos sanitarios en varios países de Latinoamérica, por lo económico de su construcción.

Figura 82

Método de construcción en Rampa de un vertedero de basura



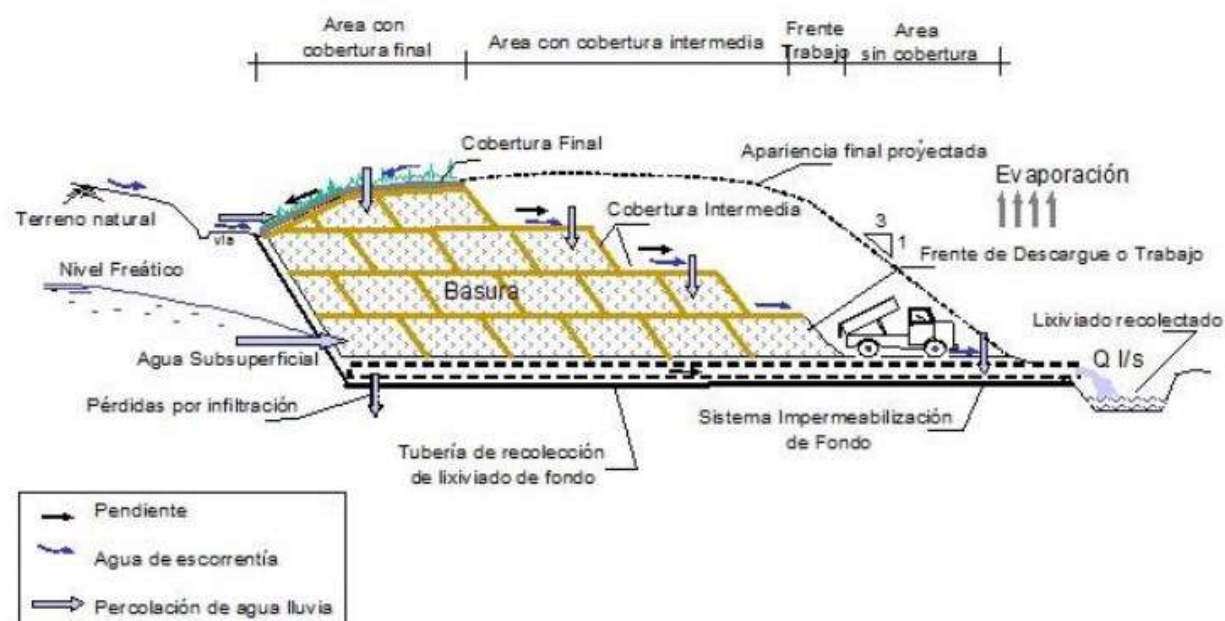
Nota: Figura de *Validación de la metodología EVIAVE en vertederos en Venezuela. Análisis y propuestas de soluciones* (p.45), por Jaramillo (1997) citado por Paolini (2007), Tesis doctoral, Universidad de Granada (<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=72183>)

Por último, una vez que la celda o terraza no puede seguir almacenando desechos se procederá a su sellado (Ver Figura 83), siguiendo los procedimientos y normas aplicables, para la cual se colocará la última capa protectora o cobertura final, y para esto se dispondrá de un sistema adecuado de ventilación. Algunos expertos recomiendan que en

esta última capa se siembre especies vegetales como grama u otras para protegerla de la intemperie y de la lluvia (EPA, 2021).

Figura 83

Cobertura final y sistema de ventilación en vertedero de basura



Nota: Figura de *Estado del arte de las investigaciones sobre la disposición de los residuos sólidos en Cundinamarca* (p.11), por Datateca citado por Morales et al. (2016), Trabajo de Grado, Universidad de La Gran Colombia (https://repository.ugc.edu.co/bitstream/handle/11396/5305/Estadoarte_investigaciones_disposicci%C3%B3n_residuos%C3%B3lidos_Cundinamarca.pdf?sequence=1)

3.6 Funcionamiento de los rellenos sanitarios

Se debe tener claro, que el objetivo de los rellenos es enterrar los residuos de manera que no contaminen ningún medio, sea el agua, aire o tierra; de cumplir con esta condición, la basura no se descompondrá tanto como lo hace cuando está en contacto con el medio, y así los desechos se convertirán en compost.

En este orden de ideas, se describirán a continuación los aspectos principales que han de presentar los rellenos sanitarios:

- No deben estar colindantes a un poblado, debido a la emisión de gases que pueden causar incendios si no se da un tratamiento adecuado para generar energía; igualmente hay atracción de animales, a causa de los desechos, que son nocivos para la salud de los individuos, ya que son transmisores de enfermedades.

- Los encargados de recolectar y del vertedero, deben estar en constante comunicación con la población, para el recojo de los residuos a una hora y fecha específica para evitar la permanencia de residuos en las calles y que los animales callejeros rompan las bolsas o tiren los contenedores de basura.
- El relleno debe estar señalizado y bien delimitada su área, para que los trabajadores sigan un esquema de trabajo, vertiendo los desperdicios donde corresponde y sean sellados al llegar a su tope.
- El diseño del relleno sanitario debe estar apoyado en estudios geológicos, climatológicos, e hidrológicos, además de realizar un estudio de capacidad, para no sobrepasarla.
- Realizar la impermeabilización para mantener el aislamiento con el ambiente y llevar a cabo un control permanente de la cantidad de residuos vertidos.

Seguidamente, se hará la descripción general sobre el funcionamiento de los vertederos controlados; teniendo claro las características que deben cumplir, se contará con la llegada del camión para descargar los residuos, que se van a extender por la zona, para ser compactados y depositar una capa de material para finalmente compactar y repetir la operación con la llegada del siguiente camión; todo esto es necesario ya que se deben aislar los residuos e impedir la entrada de diversos vectores; también se debe evitar la salida de los gases generados y malos olores; al disminuir la concentración de oxígeno, se disminuye también el riesgo de incendios; se reduce el contacto con el agua de lluvia, estrechando los lixiviados; así como también, el que se esparza por el aire los residuos a través del vuelo de los mismos.

En los vertederos controlados hay varios factores a controlar, como la concentración de agua, emisión de gases debido al proceso de degradación y así controlar los lixiviados que pueden generar daños en la estructura y organización, que sean peligrosos para la vida de los ciudadanos que allí trabajan; por otra parte los gases son producto de la fermentación, cuyos componentes principales son: metano (CH_4), amoníaco (NH_3), dióxido de carbono (CO_2), ácido sulfhídrico (H_2S), vapor de agua y gases traza producto de la descomposición orgánica.

Es importante el control de los gases porque pueden romper las capas y emigrar, por ello las tuberías son necesarias, dividiendo la recolecta de forma activa, o pasiva, la primera los gases migran de manera espontánea, hasta las tuberías y la pasiva utiliza

SISTEMAS DE TRATAMIENTO Y VALORIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

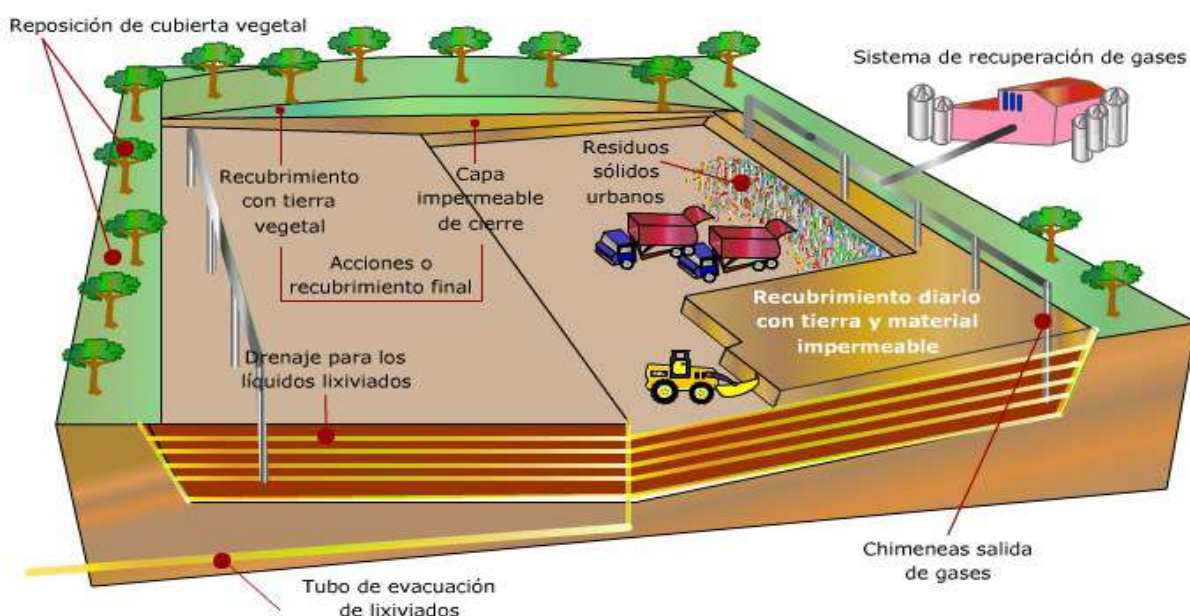
Méndez P., Arcos, J., Ureta, R., Freytez E.

ISBN 978-987-82816-3-6

equipos de aspiración, los cuales succionan los gases; existe en algunos vertederos, al final de las tuberías, un filtro de carbón activo y antorchas para quemar el gas y eliminar dioxinas (compuesto apolar), pudiéndose o no aprovechar la energía generada. A continuación, la Figuras 84, 85, 86 y 87, se presenta de forma esquematizada, la estructura y conformación de un vertedero y sus capas de cierre.

Figura 84

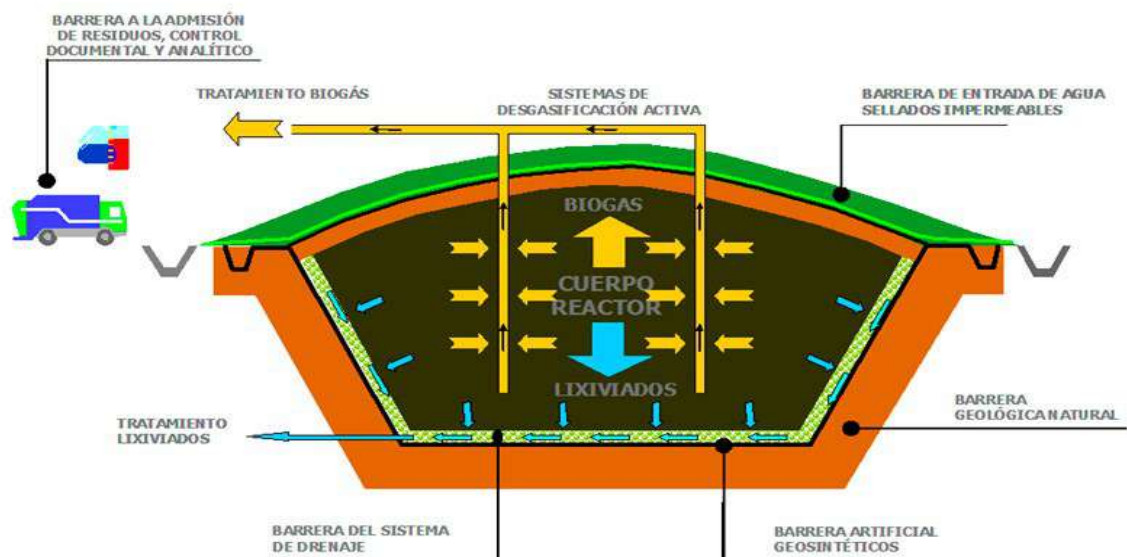
Estructura de un relleno sanitario



Nota: Figura de *Almacenamiento de residuos: vertederos y depósitos*, por Cienciasfera (s. f.), Cienciasfera (http://www.cienciasfera.com/materiales/biologiageologia/cienciatierra/tema22/32_almacenamiento_de_residuos_vertederos_y_depsitos.html)

Figura 85

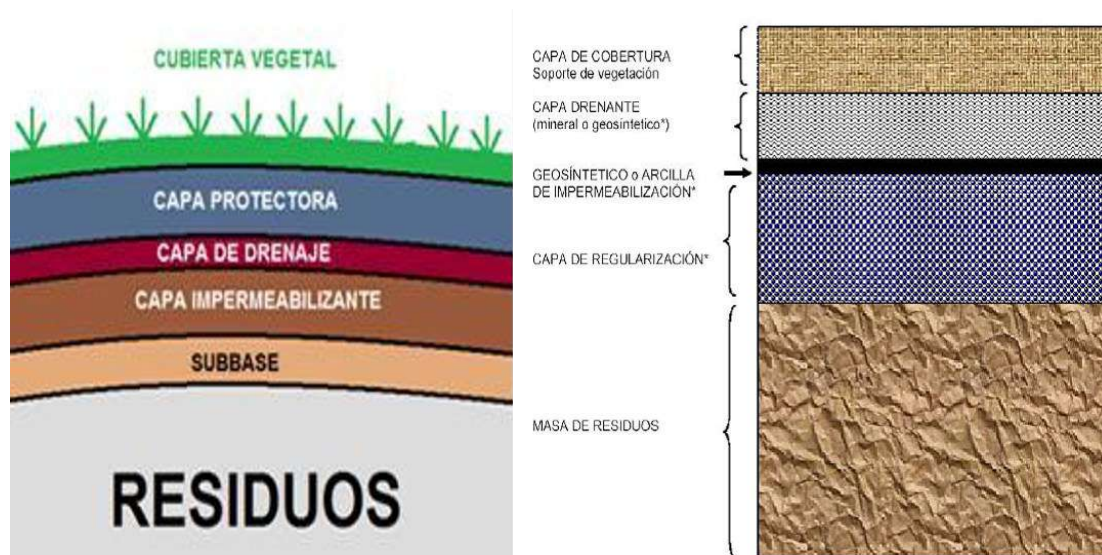
Conformación de un relleno sanitario



Nota: Figura de Depósito controlado, por Wikipedia (2022), Wikipedia (https://es.wikipedia.org/wiki/Dep%C3%B3sito_controlado)

Figura 86

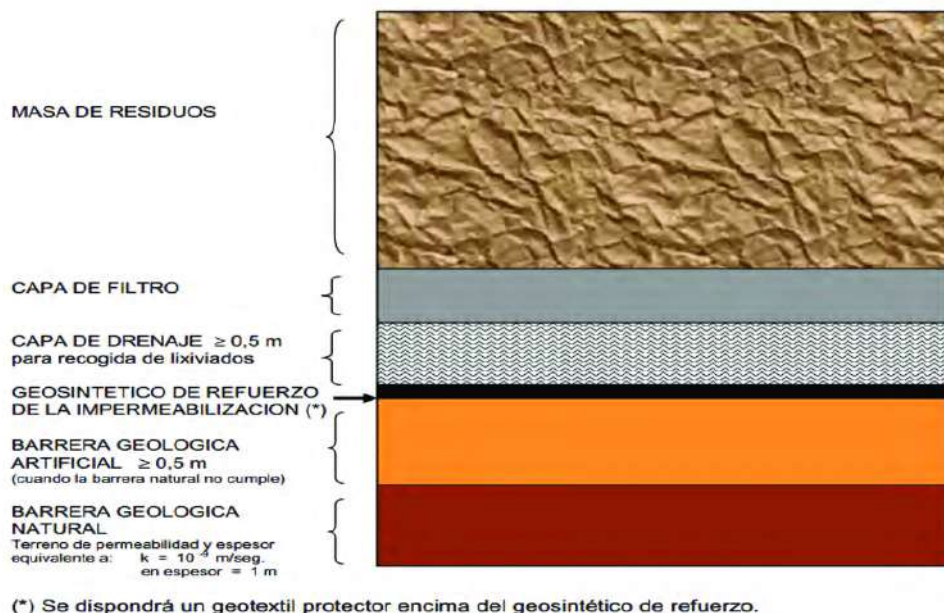
Capa de cierre o sellado superior e inferior del recubrimiento del relleno sanitario



Nota: Figura de Geocompuestos para impermeabilizar vertederos, por TexDelta (2019), El Blog de TexDelta (<https://texdelta.com/blog/geocompuestos-para-impermeabilizar-vertederos-2/>)

Figura 87

Capa de cierre o sellado superior e inferior del recubrimiento de un relleno sanitario de residuos no peligrosos



Nota: Es importante tener claro, que las capas de regularización, impermeabilización, drenaje, se colocaran en caso de ser necesarias, quedando a juicio de la autoridad competente para la autorización de la clausura del vertedero. Figura de *Geocompuestos para impermeabilizar vertederos*, por TexDelta (2019), *El Blog de TexDelta* (<https://texdelta.com/blog/geocompuestos-para-impermeabilizar-vertederos-2/>)

De no cumplir con todos estos requisitos, pasa a ser un vertedero ilegal o no controlado, lo cual puede ser muy peligroso, tanto a la salud integral de las personas que allí trabajan, como al ambiente en general, porque genera contaminantes para el suelo, agua y aire, ampliando la zona de contaminación y de plagas.

En países Latinoamericanos, el uso de vertederos a cielo abierto es un comportamiento usual, donde las consecuencias de generar desechos no es un problema a pensar, ni que cause preocupación alguna en la vida cotidiana del ciudadano, de allí los problemas ambientales y contaminación, que se traducen en enfermedades, que incrementan su auge actualmente.

Un ejemplo de lo anterior está Chile, donde el 68% de los vertederos trabaja al margen del reglamento, sin autorización sanitaria o ambiental; es decir, aproximadamente 7 de cada 10 lugares donde se deposita la basura eliminada de los hogares, funciona de manera irregular; así lo registran las mismas autoridades sanitarias y medioambientales.

En contraposición, se encuentra Finlandia, donde se establece un orden de prioridad para residuos que serán desechados; primeramente, se debe evitar el generar residuos, y de hacerlo se debe pensar en su reutilización, de no ser posible deben ser recuperados, sea dividiéndolo en partes para ser recicladas; y como opción final eliminar los residuos en estos vertederos solo si su recuperación no es posible o viable.

Todo esto ha sido posible, porque la Legislación Europea ha sancionado y amenazado con enjuiciar a los responsables de los vertederos ilegales, reduciendo su número; igualmente dictaron un Real Decreto número 646/2020 el 7 de julio, que va a regular la eliminación de residuos en depósitos de vertederos ilegales o a cielo abierto.

3.7 Operaciones del relleno sanitario

Algunas ciudades han considerado de mucha utilidad contratar a un personal capacitado que asuma la función de gerente del relleno para que administre y opere el lugar de forma adecuada. Este gerente debe desarrollar planes que funcionen como un manual de operaciones dentro del mismo y sea aplicado antes de la eliminación de cualquier residuo en el este. El plan generalmente presenta especificaciones y detalles de la localización del sitio donde se colocarán los desechos, como se operará el lugar, cuál será la frecuencia y donde serán colocadas cubiertas en el suelo; además, debe incluir la forma correcta de abordar los diferentes problemas ambientales y las consecuencias que trae consigo, entre las cuales se tienen la presencia de animales, de incendios, emisiones gaseosas, y generación de lixiviados. Algunas prácticas operativas adicionalmente incluyen la compactación de residuos, tratamiento de lixiviados, aplicación de cubiertas diarias, monitoreo de las aguas y su calidad, así como también, el monitoreo de emisiones gaseosas del vertedero y de la colocación de la cubierta final (Munawar, 2013).

Las operaciones para la apertura y luego del cierre se ejecutan al completar la capacidad máxima, pues el proceso para el llenado del relleno se detiene y el sitio deber ser cerrado con un sistema final de cubierta. El tiempo luego del cierre debe ser mantenido y monitoreado con regularidad se denomina “periodo postcierre”. Las actividades presentadas a continuación según EPA (2020), están incluidas en la etapa de cierre y la postcierre.

Entonces, se tiene que un cierre de relleno involucra las actividades siguientes:

- Se detiene la introducción de residuos para su posterior eliminación, por medio del entierro en el relleno.

- Acondicionamiento para soportar el sistema final de cobertura o ser tapado.
- Instalación de un sistema final de cobertura.
- Evaluación del sistema de gestión de los lixiviados para calificar su efectividad.
- Consideraciones para procesos como la recolección y el control de emisiones de gas.
- Mejoras en los sistemas para drenajes, control de erosión y vías de acceso.
- Restauración de las zonas de alrededor alteradas.
- Disposiciones legales que prohíban el uso del área del relleno cerrada para actividades de ciertos tipos.

Entre las necesarias actividades postcierre se incluyen también el mantenimiento al sistema de cobertura, el sistema para gestión de lixiviados, el sistema de gestión de gases, el control de sedimentación y la erosión, la gestión de aguas las superficiales, el acceso y la seguridad del lugar, el monitoreo ambiental y las disposiciones para la utilización futura del sitio.

El cuidado durante y posterior al cierre es una actividad muy importante del ciclo de vida de los vertederos, porque se completan los requisitos planteados en la gestión ambiental de estos. Por lo general, el cuidado postcierre debe continuar hasta la estabilización de los residuos sólido, logrando resultados de análisis en los que no sean de riesgo ni peligrosos a la salud y seguridad pública, ni a la calidad del ambiente, pudiendo durar este proceso de estabilización por varias décadas.

3.8 Problemas de los rellenos sanitarios

El producir gran volumen de residuos sólidos como: residuos agrícolas, de industrias, construcción, manufactura y del hogar, a consecuencia del crecimiento poblacional, va a generar una necesidad de crear más vertederos y a pesar de poder estar controlados, siempre surgirá la insuficiencia por la cantidad de restos a desechar (bioacumulación) y por ende mayor posibilidad de efectos atmosféricos por contaminantes presentes en el aire, agua y suelo; teniendo como resultado efectos adversos en la salud de los individuos y seres vivos del lugar, tales como enfermedades, mutaciones, deformaciones y hasta la posible extinción de algunas especies, causando un impacto ambiental significativo (Ver Figura 88).

Figura 88

Peligros de un vertedero no controlado



Nota: Figura de *Vertederos*, por *Sensibilízate* (2022), *Sensibilízate Salud Ambiental* (<http://saludambientalydena.blogspot.com/2009/02/>)

Los rellenos sanitarios están sujetos a factores biológicos y físicos del medio y sufrirán cambios con el tiempo a consecuencia de la operación de tales factores en los desechos depositados. Varios de estos cambios son indeseables porque presentan los siguientes problemas si no se tratan de forma correcta:

- **Producción de metano:** más de la mitad de los desechos son materia orgánica, están sujetos a la descomposición natural. Ahora bien, los desechos enterrados no tienen oxígeno, por lo que su descomposición es anaerobia, cuyo principal producto es el biogás, que este compuesto por dos tercios de metano y el resto por hidrogeno y dióxido de carbono, una mezcla muy inflamable. Generado en el fondo de los rellenos es posible que el biogás se escurra en dirección horizontal a través del suelo y rocas, penetre en los cimientos e incluso cause explosiones si se acumula y prende. Tales explosiones han destruido más de 20 casas a distancia de hasta de 300 metros de los rellenos y han causado varias muertes. Además, los gases que se abren paso a la

superficie acaban con la vegetación, el suelo se erosiona y queda al descubierto la basura horrible.

- **Descomposición incompleta:** los componentes de plástico de los desechos sólidos resisten la descomposición natural. Por esto se ha insistido mucho en la producción de plástico biodegradables, aunque quedan muchas dudas acerca de su degradabilidad. Biodegradación se refiere a la descomposición de los compuestos de carbono en bióxido de carbono y agua. Todo lo que hacen los supuestos plásticos biodegradables es desintegrarse en un polvo fino de polímero que resista la descomposición bacteriana.
- **Generación de lixiviado:** uno de los problemas más serios es la contaminación de las aguas freáticas. Cuando el agua se filtra por cualquier material es posible que disuelva sustancias químicas y las arrastre, proceso llamado lixiviación. Este líquido lleno de contaminantes es llamado lixiviado. Cuando el agua se filtra por los desechos municipales sólidos se genera un lixivio nocivo con residuos de materia orgánica en descomposición junto con hierro, mercurio, plomo, zinc y otros metales de latas oxidadas, acumuladores viejos y artefactos.
- **Asentamientos:** los desechos se asientan al compactarse y descomponerse. Como esta eventualidad fue reconocida desde el principio, nunca se han levantado edificios sobre los rellenos. Los asentamientos presentan problemas en los rellenos que han sido convertidos en áreas de juego o campos de golf porque crean depresiones (y a veces hoyos profundos) que acumulan y retienen agua. Este problema se enfrenta vigilando las instalaciones para llenar o nivelar las superficies.

3.9 Análisis de los vertederos en Venezuela y América Latina

1. Situación de los vertederos en Venezuela

En Venezuela existen pocos estudios públicos y oficiales que realicen un análisis crítico sobre los vertederos de basura oficiales existentes en el país. Como referencia en el año 2000, la Organización Panamericana de la Salud (OPS), realizó un estudio diagnóstico que abarcó a todo el sector de la basura en el país, en el cual se detectaron múltiples fallas y problemas, realizándose un conjunto de observaciones y recomendaciones al gobierno nacional con la finalidad de mejorar significativamente la situación de este sector (Organización Panamericana de la Salud, 2000).

En el año 2010, el Instituto Nacional de Estadística (INE), publicó un documento titulado “Generación y Manejo de Residuos y Desechos Sólidos en Venezuela 2008-2010”, donde se clasificó y agrupó a los vertederos en tres grupos funcionales y se presentó la siguiente información (Instituto Nacional de Estadísticas, 2010):

- **Relleno Sanitario:** se define así a toda obra de Ingeniería que está destinada a la disposición final de los desechos sólidos, y que debe cumplir con la normativa técnica para su localización, que delimita su espacio físico, las normas técnicas de diseño y de operación, y, además, tienen controles para la entrada y descarga de desechos sólidos.
- **Vertedero a cielo abierto:** terreno en el cual son depositados y acumulados los residuos y desechos sólidos de manera indiscriminada, sin recibir tratamiento sanitario, ambiental o de control técnico.
- **Botadero:** lugar sin previa preparación, donde son depositados desechos sólidos, en el cual no existen técnicas adecuadas de manejo, ni se ejerce ningún control. Representa grandes riesgos, tanto para la salud pública, como al ambiente.

Existen en Venezuela un total de 311 sitios de disposición final distribuidos así:

- 95 rellenos sanitarios (31%), siendo los más importantes el relleno sanitario de la Bonanza (Caracas, Distrito Capital), el de Pavía (Barquisimeto, Estado Lara), la Ciénaga (Maracaibo, Estado Zulia), entre otros.
- 136 vertederos (43%), como el vertedero San Josecito en San Cristóbal, ciudad capital del Estado Táchira.
- 80 botaderos (26%), como el botadero de Onia en la ciudad del Vigía Estado Mérida.

En la Tabla 12 se puede apreciar de forma resumida, la distribución de vertederos por estados y municipios:

Tabla 12

Vertederos de basura en Venezuela

Nombre del vertedero	Estado	Municipio
Metropolitano de Barinas	Barinas	Barinas
La Paragüita	Carabobo	Juan José Mora

SISTEMAS DE TRATAMIENTO Y VALORIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

Méndez P., Arcos, J., Ureta, R., Freytez E.

ISBN 978-987-82816-3-6

Nombre del vertedero	Estado	Municipio
Chaparralito	Cojedes	Tinaco
Pavia	Lara	Iribarren
Los Palmares	Lara	Morán
Los Jebes – Quibor	Lara	Jiménez
Curva del viento	Lara	Andrés Eloy Blanco
Chirico	Lara	Torres
Guanarito	Lara	Urdaneta
La Pica	Lara	Crespo
La Jabonera	Mérida	Caracciolo Parra y Olmedo
Onia	Mérida	Alberto Adriani
San Felipe	Mérida	Antonio Pinto Salinas
El Balcón	Mérida	Sucre
Boconó	Trujillo	Boconó
Lomas de Bonilla	Trujillo	Carache
Jiménez	Trujillo	Pampanito
Quebrada del Toro	Trujillo	Miranda
Sucre	Trujillo	Sucre
Andrés Bello	Trujillo	Andrés Bello
Jaime	Yaracuy	Cocorote
Tapa la Lucha	Yaracuy	Peña

Nota: Tabla adaptación de *Validación de la metodología EVIAVE en vertederos en Venezuela. Análisis y propuestas de soluciones*, por Paolini (2007), Tesis doctoral, Universidad de Granada (<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=72183>)

En las Tablas 13 y 14 se describe información más específica sobre los vertederos de Venezuela desde tipo hasta su funcionamiento, entre otras características, con información tomada de Paolini (2007).

Tabla 13

Información de los vertederos de basura en Venezuela

Nombre del vertedero	Superficie de vertido (Ha)	Superficie afectada (Ha)	Propietario del terreno	Tipo de Explotación	Año inicio	Edad (años)
Metropolitano de Barinas	52,00	93,00	Mancomunidad Noroccidental de Barinas	Mancomunidad Noroccidental de Barinas, DESMIR y la comunidad de Burdeos	1997	25
La Paragüita	20,00	55,00	Mancomunidad Mancosta	Publica	1997	25
Chaparralito	5,00	10,00	Municipal	Publica	2002	20
Pavia	40,00	107,00	En Litigio	Privada coordinado por IMAUBAR		
Los Palmares	10,00	15,00	Municipal	Publica Alcaldía	1983	39
Los Jebes – Quibor	2,00	4,00	Privada	Publica(alcaldía)	1958	64
Curva del viento	1,50	3,00	Privado	Publica(alcaldía)	1985	37

SISTEMAS DE TRATAMIENTO Y VALORIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

Méndez P., Arcos, J., Ureta, R., Freytez E.

ISBN 978-987-82816-3-6

Nombre del vertedero	Superficie de vertido (Ha)	Superficie afectada (Ha)	Propietario del terreno	Tipo de Explotación	Año inicio	Edad (años)
Chirico	6,00	10,00	Privado en proceso de trámite legal por parte de la alcaldía	Publica IMAUTO	1982	40
Guanarito	0,50	6,50	Ejido	Publica(alcaldía)	2003	19
La Pica	4,00	13,00	Propiedad del Municipio	Publica(alcaldía)	1986	36
La Jabonera	3,00	26,22	Mancomunidad Mazpa	Publica, Mancomunidad Mazpa	1998	24
Onia	8,00	16,00	MINEA bajo comodato de la alcaldía del Municipio Alberto Adriani	Publica(alcaldía)	1976	46
San Felipe	0,87	2,00	Municipal	Publica (Alcaldía)	1994	28
El Balcón	0,87	2,00	Instituto Nacional de Tierras	Privada bajo la supervisión de la Alcaldía	1993	29
Boconó	3,89	6,00	Instituto Nacional de Tierras	Publica (Alcaldía)	1980	42
Lomas de Bonilla	0,50	1,00	Municipal	Publica (alcaldía)	1989	33
Jiménez	14,00	20,27	Instituto Nacional de Tierras	Publica (alcaldía)	1980	42
Quebrada del Toro	2,50	5,00	Municipal	Publica (alcaldía)	1999	23
Sucre	5,00	6,00	Municipal	Publica (alcaldía)	1984	38
Andrés Bello	0,50	2,00	Privado	Privado	1985	37
Jaime	6,00	14,00	Instituto Agrario Nacional	Privada		
Tapa la Lucha	12,00	15,00	Alcaldía	Publica	1994	28

Nota: Tabla adaptación de *Validación de la metodología EVIAVE en vertederos en Venezuela. Análisis y propuestas de soluciones*, por Paolini (2007), Tesis doctoral, Universidad de Granada (<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=72183>)

Tabla 14

Información de los vertederos de Venezuela

Nombre del vertedero	¿Estudio Impacto Ambiental?	Cantidad RSU		Clasificación del suelo	Infraestructura Mínima Recolección Aguas de Lluvia o de Lixiviado	Infraestructura Mínima Recolección Gases	Observaciones	Páginas
		Día	Anual Ton/año					
Metropolitano de Barinas	No	195,00	71.175,00	Agrícola semi-intensiva y ganadería semiextensiva	No	No	Tiene más de 25 años de funcionamiento, en el año 2000 se realizó un saneamiento	676-682
La Paragüita	Si	144,00	52.560,00	Industrial	No	No	Se estima que el vertedero comenzó a funcionar a mediados del año 1997	683-689
Chaparralito	No	54,00	19.710,00	Ganadería extensiva, agropecuaria.	No	No	Empezó a funcionar en el año 2002	690-696
Pavia	No	700,00	255.500,00	Urbano	No	Si	En 1996 se realizó el saneamiento del crematorio y se transformó en un relleno con técnicas de vertedero controlado	567-571
Los Palmares	Si	40,00	14.600,00	Urbano	No	No	Ese vertedero inició en el año 1983	577-581
Los Jebes – Quíbor	Si	48,00	17.520,00	Agrícola intensivo	No	No	Inicio sus operaciones en el año 1958	572-576

SISTEMAS DE TRATAMIENTO Y VALORIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

Méndez P., Arcos, J., Ureta, R., Freytez E.

ISBN 978-987-82816-3-6

Nombre del vertedero	¿Estudio Impacto Ambiental?	Cantidad RSU		Clasificación del suelo	Infraestructura Mínima Recolección Aguas de Lluvia o de Lixiviado	Infraestructura Mínima Recolección Gases	Observaciones	Páginas
		Día	Anual Ton/año					
Curva del viento	Si	8,00	2.816,00	Erial	No	No	Inicio sus operaciones en el año 1985	582-585
Chirico	No	86,00	31.171,00	Erial	No	No	Este vertedero inicio en el año 1982	590-596
Guanarito	No	3,00	1.095,00	Erial	No	No	Este vertedero inicio en el año 2003	586-590
La Pica	No	28,00	10.220,00	Ganadero, agrícola intensivo	No	No	Año de inicio 1986	597-601
La Jabonera	Si	95,00	34.675,00	Ganadero, agrícola intensivo	No	No	Empezó a funcionar como vertedero controlado En el año 1998	638-644
Onia	No	68,00	24.820,00	Ganadería	No	No	Inicio operaciones aproximadamente en el año 1976	645-650
San Felipe	No	42,00	15.330,00	Erial	No	No	Inicio operaciones aproximadamente en el año 1994	651-656
El Balcón	No	314,00	114.610,00	Agrícola extensivo	No	No	Inicio de operaciones 1993	657-662
Boconó	Si	25,00	8.996,00	Urbano	No	No	En 1980 inicio operaciones del vertedero	602-607
Lomas de Bonilla	No	4,00	1.456,00	Agrícola intensivo y Erial	No	No	Fecha inicio aproximado 1989	608-612
Jiménez	No	165,00	59.957,00	Agrícola semicom	No	No	No existe registro de	613-619

SISTEMAS DE TRATAMIENTO Y VALORIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

Méndez P., Arcos, J., Ureta, R., Freytez E.

ISBN 978-987-82816-3-6

Nombre del vertedero	¿Estudio Impacto Ambiental?	Cantidad RSU		Clasificación del suelo	Infraestructura Mínima Recolección Aguas de Lluvia o de Lixiviado	Infraestructura Mínima Recolección Gases	Observaciones	Páginas
		Día	Anual Ton/año					
				ercial y urbano			fecha aproximada de inicio	
Quebrada del Toro	No	14,00	4.951,00	Ganadería extensiva y urbano	No	No	No existe registro de fecha de inicio	620-625
Sucre	No	21,00	7.637,00	Ganadería extensiva y urbano	No	No	No existe registro de fecha de inicio	626-632
Andrés Bello	No	3,00	983,00	Ganadería extensiva y urbano	No	No	Fecha inicio aproximado 1985	633-637
Jaime	No	150,00	54.750,00	Agrícola semi-intensiva	No	No	Funciona hace más de 20 años	669-675
Tapa la Lucha	No	20,00	6.240,00	Agrícola Extensivo	No	No	Comenzó a operar en el año 1994	663-668

Nota: Tabla adaptación de *Validación de la metodología EVIAVE en vertederos en Venezuela. Análisis y propuestas de soluciones*, por Paolini (2007), Tesis doctoral, Universidad de Granada (<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=72183>)

Situación de vertederos en América latina

En este apartado se presenta una visión de manera general de la situación y de los comportamientos y tendencias de la gestión y disposición de residuos en América Latina, según lo planteado en el (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2021).

La producción total de residuos en América Latina sigue en aumento, y se estima, que la tasa de generación *per cápita* actual, que está situada en promedio de 1 kg/hab/día y continuará en aumento en los siguientes años. Algunas estimaciones previas han indicado que aproximadamente 145.000 t/día es la cantidad de residuos sólidos que se depositan en vertederos, se queman o se someten a otras prácticas, por falta de una adecuada gestión. La composición de estos residuos puede variar entre países, sin embargo, es común

observar que en promedio el 50% representa la fracción orgánica de los residuos (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2021).

Aunque el sistema de recolección de los residuos ha mejorado de forma progresiva en algunos países de América Latina, llegando a cubrir en centros urbanos hasta un 90% de la recogida, en ciudades más pequeñas, en zonas rurales o apartadas, este indicador presenta una tendencia a disminuir, por lo cual, se estima que unas 35.000 t/día de residuos, dejan de ser recolectados en esta región de América, originando la aparición de basurales y por consiguiente, de riesgos por manejos inadecuados de los residuos (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2021).

Además, y a pesar del incremento continuo en la tasa de producción de residuos, el porcentaje de recuperación o reciclaje de los mismos, se mantiene debajo del 10%, significando esto, que los programas para un manejo adecuado de instalaciones de disposición final de residuos a nivel de América Latina, cada vez se encuentran con mayores desafíos para su implementación.

Es importante señalar que, aunque lo anteriormente expuesto es una realidad en la región, la disposición final de la basura ha presentado una mejoría en las últimas décadas, pues se tiene que entre los años 2002 y 2010, hubo un aumento del uso de los rellenos sanitarios, que llevó las cifras de 22,6% hasta 54,4%, a la vez que se reducía el uso de vertederos de un 45,3% a un 23,3% (Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2018). Sin embargo, pese a la disminución del uso de vertederos, la cantidad de residuos que son destinados a los rellenos sanitarios, no han sufrido incrementos significativos, sino que se han mantenido alrededor del 54,6% (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2021).

No todos los países de la región presentan un comportamiento similar, en cuanto a la disposición de residuos en los rellenos sanitarios, pues algunos alcanzan cifras de hasta un 75%, mientras que otros continúan disponiendo sus residuos de manera inadecuada en vertederos a cielo abierto (llamados también basurales) o en vertederos controlados (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2021).

En la Tabla 15 y en la Figura 89, se muestra en cifras la situación de la disposición final de residuos en algunos países de América Latina y el Caribe.

Tabla 15

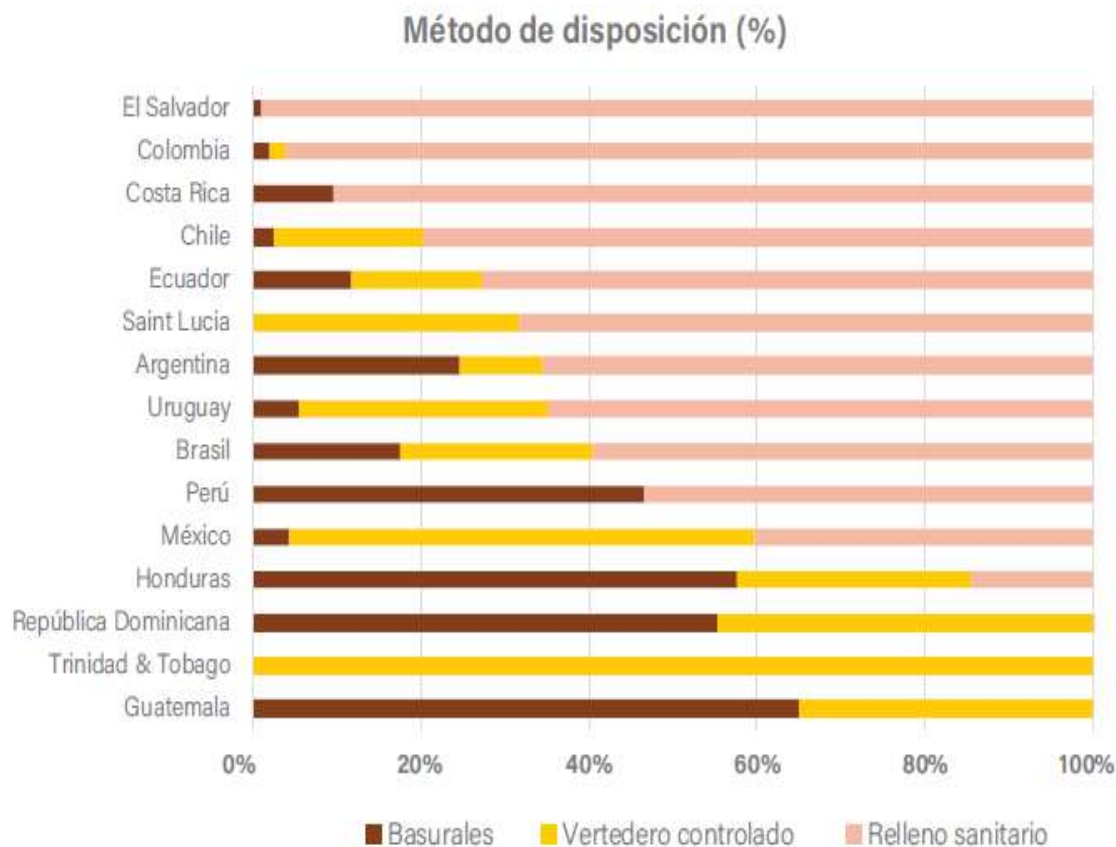
Situación de la disposición final en países de América Latina y el Caribe

País	Vertedero o Basurales (%)	Vertedero controlado (%)	Relleno Sanitario (%)
Argentina	24.5%	9.9%	65.6%
Brasil*	17.5%	23.0%	59.5%
Chile	2.4%	18.0%	79.6%
Colombia	2.0%	1.9%	96.1%
Costa Rica	9.6%	--	90.4%
Ecuador	11.6%	15.5%	72.8%
El Salvador	1.0%	--	99.0%
Honduras	57.6%	27.9%	14.5%
Guatemala	65.0%	35.0%	0.0%
México	4.3%	55.5%	40.2%
Perú	46.6%	--	53.4%
República Dominicana	55.3%	44.6%	0.05%
Saint Lucia	0.0%	31.7%	68.3%
Trinidad & Tobago	0.0%	100%	0.0%
Uruguay	5.5%	29.6%	64.8%

Nota: Los datos están referidos al porcentaje (%) de la cantidad de residuos destinados a cada tipo de instalación. Tabla tomada de *Hoja de ruta para el cierre progresivo de los basurales en América Latina y El Caribe* (p.14), por Ministerio del Medio Ambiente (2020) citado por Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2021), ONU Programa para el Medio Ambiente (PNUMA), (https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/34919/Roadmap_ES.pdf?sequence=8)

Figura 89

Disposición final en rellenos sanitarios VS disposición final inadecuada en basurales y vertederos controlados en países de América Latina y el Caribe



Nota: Figura tomada de *Hoja de ruta para el cierre progresivo de los basurales en América Latina y El Caribe* (p.15), por Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2021), ONU Programa para el Medio Ambiente (PNUMA), (https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/34919/Roadmap_ES.pdf?sequence=8)

Por otra parte, se tiene que en América Latina y el Caribe se han llegado a identificar más de 14.000 instalaciones inadecuadas de disposición final de residuos, entre los que se incluyen unos 10.000 basurales o vertederos a cielo abierto, de dimensiones y con condiciones diferentes. De igual manera, se han identificado alrededor de 2.000 rellenos sanitarios, en los cuales es depositada la mayor proporción de los residuos identificados, la cual se ubica cerca al 55%, y que abarca a los principales centros urbanos (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2021), tal como se puede observar en la Tabla 16.

Tabla 16

Disposición final de residuos en América Latina y el Caribe

Tipología de sitio de disposición final	Número de sitios identificados	Estimación de los residuos depositados (Ton/día)	Estimación de los residuos depositados (%)
Basurales	11.460	80.357	16,7
Vertederos a cielo abierto	2.890	138.213	28,7
Rellenos sanitarios	1.993	262.944	54,6
TOTAL	16.343	481.514	100

Nota: Los vertederos a cielo abierto son llamados también basurales. Tabla tomada de *Hoja de ruta para el cierre progresivo de los basurales en América Latina y El Caribe* (p.15), por Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2021), ONU Programa para el Medio Ambiente (PNUMA), (https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/34919/Roadmap_ES.pdf?sequence=8)

4. Diferencias entre un vertedero y un relleno sanitario

Como se ha observado en el desarrollo de este capítulo, existen una serie de características que describen los vertederos a cielo abierto y los rellenos sanitarios, y que estas pueden llegar a diferir dependiendo el país o la región geográfica donde se encuentren. Sin embargo, en la Tabla 17 se presentarán las diferencias entre un vertedero o basural y un vertedero controlado o relleno sanitario, siendo enfocadas desde el punto de vista de las medidas técnicas, el manejo de lixiviados y gases, y las medidas operativas de cada una de estas instalaciones (Tchobanoglous et al., 1998).

Tabla 17

Diferencias entre un vertedero y un relleno sanitario

Característica	Vertedero	Relleno sanitario
Medidas técnicas	Ninguna	Infraestructura apropiada, transporte y tratamiento de emisiones in situ.
Manejo de lixiviados	Descarga sin restricción	Tratamientos biológicos y fisicoquímicos de lixiviados, contenedores para recolección.
Manejo de gases	Ninguno	Antorchas para evacuación de gases.
Medidas de operación	Operación mayormente manual, poca tecnificación.	Compactación de residuos, registros de ingresos, cobertura diaria, planes de cierre.

Nota: Tabla adaptación con información de *Gestión integral de residuos sólidos* (p.), por Tchobanoglous et al., (1998), McGraw Hill México.

En la Tabla 17, se puede observar de manera resumida que en un vertedero a cielo abierto se realiza la disposición de residuos de forma indiscriminada, teniendo pocas o ningunas medidas de control técnico, sin sistemas de gestión de lixiviados y gases, y sin programas o manuales de operación. Al contrario, en un relleno sanitario es un lugar en el cual se realizan depósitos de residuos, que ha sido diseñado para tal fin, que cumple con los requerimientos legales, pues se evidencia con las medidas técnicas que aplica, con la existencia de sistemas de gestión de emisiones gaseosas y de lixiviados y con planes para la clausura (Tchobanoglous et al., 1998). De igual manera, en la Figura 90 se presenta una infografía de los riesgos de los vertederos a cielo abierto, contrastados con los beneficios de un relleno sanitario.

Figura 90

Riesgos de un basural a cielo abierto y beneficios de un relleno sanitario

RIESGOS DE UN BASURAL A CIELO ABIERTO	BENEFICIOS DE UN RELLENO SANITARIO
	
Los basurales a cielo abierto representan una amenaza para la salud pública y para el ambiente.	El relleno sanitario permite la disposición final de los residuos sólidos confinándolos en la menor superficie posible y reduciendo su volumen al mínimo.
 Intensifica la contaminación. Facilita la migración de gases al suelo o al aire y la quema incontrolada de residuos, aumentando el riesgo de explosiones e incendios.	 Es un método completo y definitivo para recibir gran cantidad y variedad de residuos sólidos sin dañar la salud pública.
 Promueve la proliferación de moscas, roedores e insectos en todo el terreno.	 Posibilita el reciclaje de muchos materiales y reduce los peligros para el medio ambiente.
 El deslizamiento de tierra y/o de residuos sólidos tiene como consecuencias la dispersión de polvos y olores en el terreno.	 Genera nuevos empleos para personal capacitado en tareas relacionadas al manejo de residuos.
 Perjudica la salud de los vecinos y de los trabajadores y recuperadores de residuos. Además, daña la flora y fauna de la zona.	 Permite recuperar y dar valor a terrenos que se consideraban improductivos o marginales.

Nota: Infografía tomada de *Infografía: Diferencias entre un basural y un relleno sanitario*, por Banco Mundial, (2017), (<https://www.bancomundial.org/es/news/infographic/2017/09/15/infografia-diferencias-entre-basural-cielo-abierto-y-relleno-sanitario>)

A lo largo de la temática planteada en este capítulo se ha planteado la posibilidad de crear o no un vertedero, señalando las ventajas y desventajas de forma indirecta; sin embargo, siempre existirá la posibilidad de un error en cualquier acción a ejecutarse; por tanto, los vertederos controlados no son 100% confiables, a no contaminar el ambiente por estar controlados y asegurados por capas protectoras, las cuales si disminuyen el riesgo de contaminación, pero no de forma absoluta e inequívoca en la acción humana.

Por tanto, para la disposición de los materiales a desechar, no solo es factible un lugar donde verter los productos, enterrarlos y olvidarse de ellos, es necesario crear ciclos de reciclaje de materia orgánica e inorgánica y destinarlos a donde son necesaria su reutilización; sean empresas de origen, industrias de reciclaje, compañías para la transformación de la materia, entre otros.

De allí que, el construir un vertedero más, debe ser la última elección para hacer llegar los residuos que se generan; por tanto, se debe estimular un cambio radical en la mentalidad para que llegue a ser comportamiento cotidiano desde el sector productivo hasta el usuario final. En conclusión, la naturaleza es sabia y hay que aprender de sus procesos, su forma de trabajo y de sus ciclos biogeoquímicos para poder llegar a ese equilibrio que tanto deseamos como sociedad, donde las condiciones atmosféricas sean estables, garantizando la calidad de vida a futuro.

SISTEMAS DE TRATAMIENTO Y VALORIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

Méndez P., Arcos, J., Ureta, R., Freytez E.

ISBN 978-987-82816-3-6

BIBLIOGRAFÍA

- Abarca, D., Martínez, R., Muñoz, J., Torres, M., & Vargas, G. (2010). Residuos de Café, Cacao y Cladodio de Tuna: Fuentes promisorias de Fibra Dietaria. *Revista Tecnológica ESPOL-RTE*, 23(2), 63-69. <http://200.10.150.204/index.php/tecnologica/article/view/57/28>
- Abarca Guerrero, L., Maas, G., & Hogland, W. (2013). Solid waste management challenges for cities in developing countries. *Waste Management*, 33(1), 220-232. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.09.008>
- Abraham, E. R., Ramachandran, S., & Ramalingam, V. (2007). Biogas: Can it be an important source of energy? *Environmental Science and Pollution Research-International*, 14(1), 67-71. <https://doi.org/10.1065/espr2006.12.370>
- ACERETECH. (s. f.). *Peletizadora con compactadora* [Imagen]. ACERETECH recycling & peletizing. <https://www.aceretech.com/webbs-tran-c/Cutter-Compactor-Recycling-Pelletizing-System.html>
- Acosta, Y., Prieto, A., & Rosales, Y. (2019). Dinámica de carbono y nitrógeno en suelos tratados con residuos orgánicos. *INGENIUM ET POTENTIA. Revista Electrónica Multidisciplinaria de Ciencias Básicas, Ingeniería y Arquitectura*, 1(1). <http://portal.amelica.org/ameli/journal/264/2641278001/2641278001.pdf>
- Admin. Cuidemos el planeta. (2017). *Contenedores para el reciclaje*. Cuidemos el planeta. <https://cuidemoselplaneta.org/contenedores-reciclaje/>
- Agámez, M. (2006). *Determinación de los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y de los compuestos orgánicos volátiles presentes en un proceso de compostación* [Tesis Doctoral].
- Agencia de Residuos de Cataluña. (2016). *Guía práctica para el diseño y la explotación de plantas de compostaje*. Agencia de Residuos de Cataluña ARC. https://residus.gencat.cat/web/.content/home/lagencia/publicacions/form/GuiaPC_web_ES.pdf
- Aguilar, R., Heydrich, S., Sánchez, M. T., & Araiza, J. (2019). La valorización de los residuos sólidos urbanos en el estado de México, una visión geográfica. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(3), 693-704. <https://doi.org/10.20937/rica.2019.35.03.14>
- Alonso, J. (2021). *Recicladores en América Latina: Clave para una economía circular*. Deutsche Welle (DW). <https://www.dw.com/es/recicladores-en-am%C3%A9rica-latina-clave-para-una-econom%C3%ADa-circular/a-56751077>

- Álvarez, C. (2008). *Caracterización y tipificación de los parámetros físico-químicos y componentes del sabor y aroma de una población de cacao criollo híbrido (Theobroma cacao L.) de Venezuela* [Estudio]. Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación.
- Ambientum. (2021). *Composición de los residuos sólidos urbanos* [Portal Profesional del Medio Ambiente]. Ambientum. https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/suelos/composicion_de_los_rsu.asp
- Ambientum. (2022a). *Características físicas de los residuos sólidos urbanos* [Portal Profesional del Medio Ambiente]. Ambientum. https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/suelos/caracteristicas_fisicas.asp
- Ambientum. (2022b). *Incineración y tratamientos térmicos* [Portal Profesional del Medio Ambiente]. Ambientum. https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/suelos/incineracion_y_tratamientos_termicos.asp
- Antonio, G. V., Yasser, O. P., & Alberto, V. S. (2016). Manejo de residuos sólidos urbanos en empresas ENTRIDE-ALMA en la ciudad de Managua Nicaragua. En *Manual de buenas prácticas para el manejo de residuos sólidos urbanos en empresas ENTRIDE-ALMA en la ciudad de Managua Nicaragua*.
- Aparcana, S. (2017). Approaches to formalization of the informal waste sector into municipal solid waste management systems in low- and middle-income countries: Review of barriers and success factors. *Waste Management*, 61, 593-607. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.12.028>
- Areatecnología. (s. f.). Turbina de vapor [Imagen]. Areatecnología. <https://www.areatecnologia.com/mecanismos/turbina-de-vapor.html>
- Arhoun, B. (2017). *Digestión y codigestión anaerobia de residuos agrícolas, ganaderos y lodos de depuradora* [Tesis Doctoral, Universidad de Málaga]. <https://core.ac.uk/download/pdf/214842277.pdf>
- Arrigoni, J. P. (2011). *Evaluación del desempeño de diferentes prototipos de compostadores en el tratamiento de residuos orgánicos* [Trabajo Fin de Máster, Universidad Nacional del Comahue]. https://www.researchgate.net/publication/230787246_Evaluacion_del_Desempeño_de_Diferentes_Prototipos_de_Compostadores_en_el_Tratamiento_de_Residuos_Organicos
- Ley de Gestión Integral de la Basura, Pub. L. No. Gaceta Oficial N°6.017 Extraordinaria 30 diciembre 2010, 29 (2011). <http://www.corpoelec.gob.ve/sites/default/files/ley-de-gestion-integral-de-la-basura.pdf>

ASECA. (2020). *Conoce los beneficios de una gestión de RSU responsable* [Imagen]. ASECA. <https://aseca.com/conoce-los-beneficios-de-una-gestion-de-rsu-responsable/>

Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. (2018). *Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos*. Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS).

Banco Bilbao Vizcaya Argentaria (BBVA). (2022). *La valorización de los residuos: Una segunda oportunidad para los materiales*. Banco Bilbao Vizcaya Argentaria.

Banco Mundial. (2017). *Infografía: Diferencias entre un basural y un relleno sanitario* [Imagen]. Banco Mundial. <https://www.bancomundial.org/es/news/infographic/2017/09/15/infografia-diferencias-entre-basural-cielo-abierto-y-relleno-sanitario>

Banco Mundial. (2018). *Cifras del Banco Mundial*. Banco Mundial. <https://datos.bancomundial.org/>

Baños, M., & Gámez, A. (2019). Prevención de la generación de residuos en el marco de una economía ecológica y solidaria: Un análisis del manejo de residuos en los municipios de México. *Sociedad y ambiente*, 21, 7-31. <https://doi.org/10.31840/sya.v0i21.2036>

Bausson, N. (2019). *Basura: Algo huele muy mal* [Estudio]. Transparencia Venezuela. <https://transparenciave.org/project/epe-ii-estudio-sector-basura/>

Berenguer, M., Trista, J., & Deas, D. (2006). El reciclaje, la industria del futuro. *Ciencia en su PC*, 3. <https://www.redalyc.org/pdf/1813/181322792005.pdf>

Bohórquez, W. (2019). *El proceso de compostaje*. Universidad de La Salle.

Campos-Rodríguez, R., Brenes-Peralta, L., & Jiménez-Morales, M. F. (2016). Evaluación técnica de dos métodos de compostaje para el tratamiento de residuos sólidos biodegradables domiciliarios y su uso en huertas caseras. *Revista Tecnología en Marcha*, 29(5), 25-32. <http://dx.doi.org/10.18845/tm.v29i8.2982>

CARE Internacional-Avina. (2012). *Gestión integral de residuos sólidos (GIRS).: Vol. Módulo 9*. CARE-AVINA. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2018/CD002947.pdf>

Carrasco, T. (2019). El reciclaje de vidrio y su impacto en la conservación del medio ambiente. *Explorador digital*, 1(2), 22-31. <https://doi.org/10.33262/exploradordigital.v1i2.319>

Castro, A. (2018). *Estudio bibliográfico del estado del arte de la digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos y mejora del proceso mediante pretratamientos* [Trabajo Fin de Grado, Universidad de Cádiz]. <https://core.ac.uk/download/pdf/162565001.pdf>

- Cerdá, E., & Khalilova, A. (2015). Economía Circular. *Economía Circular, Estrategia y Competitividad Empresarial*, 11-20. <https://www.mincotur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/401/CERD%C3%81%20y%20KHALILOVA.pdf>
- Chile.Cubica. (2017). Rellenos sanitarios [Imagen]. *Chile.Cubica*. <https://www.chilecubica.com/eficiencia-energ%C3%A9tica-nzeb/rellenos-sanitarios/>
- Chiumenti, A., Chiumenti, R., Díaz, L. F., Savage, G., Eggerth, L., & Goldstein, N. (2005). Modern composting technologies. Biocycle. *Journal of Composting Organics Recycling*, 96.
- Chomicki, C., Decunto, V., & Nogar, A. G. (2020). La biodigestión anaeróbica como oportunidad para generar bioenergía descentralizada en Argentina. *RedBioLAC*, 4, 28-32. <https://redbiolac.org/wp-content/uploads/2020/12/RedBioLAC-2020-3M.pdf>
- Cienciasfera. (s. f.). Almacenamiento de residuos: Vertederos y depósitos. *Cienciasfera*. http://www.cienciasfera.com/materiales/biologiageologia/cienciatierra/tema22/32_almacenamiento_de_residuos_vertederos_y_depsitos.html
- COGENERACIÓN México. (2020). *Tecnologías. Cogeneración con turbina de gas*. COGENERACIÓN México. <https://www.cogeneramexico.org.mx/public/Cogeneracion/Tecnologias/Conceptos>
- Cóndor, E. (2015). *Influencia de elaboración del compost en la educación ambiental de estudiantes de IE 32842 Potracancha* [Trabajo Fin de Máster, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/4605/Anaya%20Ezequ%C3%ADas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Contreras, F., Rivero, C., & Paolini, J. (1995). Efecto de la incorporación de residuos orgánicos y dos tipos de labranza sobre la actividad de la ureasa en un alfisol. *Venesuelos*, 3(1), 1-6.
- Cury R., K., Aguas M., Y., Martínez M., A., Olivero V., R., & Chams Ch., L. (2017). Residuos agroindustriales su impacto, manejo y aprovechamiento. *Revista Colombiana De Ciencia Animal - RECIA*, 9(S1), 122-132. <https://doi.org/10.24188/recia.v9.nS.2017.530>
- Davis, M. L., & Masten, S. J. (2005). *Ingeniería y ciencias ambientales* (Primera edición en español). McGraw Hill Interamericana. <https://es.scribd.com/doc/247864072/Ingenieria-y-Ciencias-Ambientales-Davis-Masten>

- Decología.info. (2022). *Vertederos: Definición, causas, efectos, tipos, reducción y más* [Medio Ambiente]. Decología.info. <https://decologia.info/medio-ambiente/vertederos/>
- Dinamarca, A. (2010). *Tratamiento biológico combinado anaeróbico/aeróbico de Estiercol Generado en la cría intensiva de cerdo* [Proyecto de Grado, Universidad FASTA]. <https://docplayer.es/82712658-Proyecto-final-de-graduacion-en-ingenieria-ambiental-tratamiento-biologico-combinado-anaerobico-aerobico-de-estiercol-generado.html>
- Dreamstime. (2022). *Comparación de economía lineal frente a economía circular a partir del esquema de aspecto de reciclado* [Imagen]. Dreamstime. <https://es.dreamstime.com/comparaci%C3%B3n-de-econom%C3%ADa-lineal-frente-circular-partir-del-esquema-aspecto-reciclado-sostenibilidad-consumo-recursos-en-el-image212897645>
- D-Waste. (2013). *Waste Atlas Report 2013*. <https://www.waste.ccacoalition.org/document/waste-atlas-2013-report>
- ECOPLAS. (2020). *Sustentabilidad: Recuperación energética de los plásticos y sus beneficios* [Entidad especializada en plásticos y medio ambiente]. ECOPLAS Plásticos y medio ambiente. <https://ecoplas.org.ar/2017/12/01/sustentabilidad-recuperacion-energetica-de-los-plasticos-y-sus-beneficios/>
- Edelmann, W. (2007). *Die Rolle von Biogas in der zukünftigen energievorsorgung*. Herstellung von Biomethan aus Biogas, 2007. <https://docplayer.org/43593379-Die-rolle-von-biogas-in-der-zukuenftigen-energieversorgung.html>
- Elgegren, M., Tiravanti, G., Ortiz, B., Otero, M., Wagner, F., Cerrón, D., & Nakamatsu, J. (2012). Reciclaje químico de desechos plásticos. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 78(2), 105-119. <https://www.redalyc.org/pdf/3719/371937627005.pdf>
- ELIKA. (2021). *Dioxinas, Furanos y PCBs*. ELIKA Seguridad Alimentaria. <https://seguridadalimentaria.elika.eus/fichas-de-peligros/dioxinas-furanos-y-pcbs/>
- EMGIRS. (2022). *Quito genera energía eléctrica con el Biogás de su basura*. EMGIRS Empresa Pública de Gestión de Residuos. <https://www.emgirs.gob.ec/index.php/zentools/zentools-slideshow/45-travels-3/265-quito-genera-energia-electrica-con-el-biogas-de-su-basura>
- EPA. (1995). *Decision-makers' guide to solid waste management, volumen II* (N.º EPA530-R-95-023; Solid Waste and Emergency Response, p. 372). United States Environmental Protection Agency. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/10000VWJ.PDF?Dockey=10000VWJ.PDF>

- EPA. (2002). *Solid waste management: A local challenge with global impacts* (Solid Waste and Emergency Response N.º EPA530-F-02-026; p. 5). United States Environmental Protection Agency. <https://archive.epa.gov/region4/rcra/mgttoolkit/web/pdf/folder.pdf>
- EPA. (2016). *Wastes—Non—Hazardous Waste—Municipal Solid Waste*. EPA's Web Archive. <https://archive.epa.gov/epawaste/nonhaz/municipal/web/html/>
- EPA. (2020). *Mejores prácticas para la gestión de residuos sólidos: Una guía para los responsables de la toma de decisiones en los países en vía de desarrollo* (p. 169). United States Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-02/documents/swm_guide-spanish-reducedfilesize_publication_october.pdf
- EPA. (2021). *Página Oficial*. EPA United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov>
- EPA. (2022a). *Municipal solid waste landfills*. EPA United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/landfills/municipal-solid-waste-landfills>
- EPA. (2022b). *Sustainable material management: Non-hazardous materials and waste management hierarchy*. EPA United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/smm/sustainable-materials-management-non-hazardous-materials-and-waste-management-hierarchy>
- Epstein, E. (1997). *The Science of Composting* (Primera Edición). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203736005>
- Equipo de Redacción PartesDel. (2019). *Partes de una turbina de gas* [Portal Educativo]. PartesDel.com. https://www.partesdel.com/partes_de_una_turbina_de_gas.html
- Escobar, J., Pereira, L., Martínez, Y., & Sánchez, N. (2012, 20/04). *Evaluación de la fitotoxicidad de lodos residuales de industrias alimenticias y papeleras*. XIX Congreso Latinoamericano de la ciencia del suelo XXIII Congreso Argentino de la ciencia del suelo, Mar de Plata, Argentina. https://www.academia.edu/49584438/Evaluaci%C3%B3n_De_La_Fitotoxicidad_De_Lodos_Residuales_De_Industrias_Alimenticias_y_Papeleras
- FAO. (1991). *Normas de calidad de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. Food and Agriculture Organization.
- FAO. (1997). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <https://www.fao.org/3/w5800s/w5800s.pdf>
- Font, X. (2017). *La digestión anaeróbica en Europa: Investigación y desarrollo*. UAB Divulga Barcelona Investigación e Innovación. <https://www.uab.cat/web/detalle-noticia/la-digestion-anerobica-en-europa-investigacion-y-desarrollo-1345680342040.html?noticiaid=1345734427688>

FOR REC. (2022a). *Cribas de discos DS/RSU*. FOR REC Recycling Systems. <https://www.forrec.es/productos/otro-equipo/cribas-de-discos/ds-rsu.html>

FOR REC. (2022b). *Trituradora monorotor XM*. FOR REC Recycling Systems. <https://www.forrec.es/productos/trituradoras-de-eje-simple/trituradoras-de-eje-simple-reforzadas/xm.html>

Franco-Urquiza, E., Ferrando, H. E., Luis, D. P., & MasPOCH, M. Ll. (2016). Reciclado mecánico de residuos plásticos. Caso práctico: Poliestireno de alto impacto para la fabricación de componentes de TV. *Afinidad*, 73(575), 226-235. <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/313761>

García, J. (2014, septiembre 25). La historia de la basura. ¿Hemos cambiado? [Blog de Historia]. *Ciencia Histórica*. <https://www.cienciahistorica.com/2014/09/25/la-historia-de-la-basura-hemos-cambiado/>

Gavilanes, I. (2016). *Sostenibilidad del sector agroindustrial de Ecuador mediante el compostaje de sus residuos y el uso agrícola de los materiales obtenidos* [Tesis Doctoral, Universidad Miguel Hernández de Elche]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=60918>

GECOLSA CAT (Director). (2015). *Clasificador de Aire Metso* [Canal de YouTube]. <https://www.youtube.com/watch?v=8jwCS6nLbLo>

General Kinematics. (s. f.). *Clasificador neumático de -Stoner de una sola cuchilla* [Imagen]. General Kinematics. <https://www.generalkinematics.com/es/producto/destoner-air-classifier-2/>

González, R. A. (2016). *Desarrollo del estudio de factibilidad técnico y económico de un sistema de biogás productivo para la finca San Ramón, de la Cooperativa Multisectorial El Rey, R.L, (COMMUREY)*. BioGas Nicaragua. https://www.researchgate.net/publication/330638550_Estudio_de_Factibilidad_Tecnica_y_Economica_del_Proyecto_de_Planta_de_Biogas_en_el_Sector_Lechero_de_la_Cooperativa_Multisectorial_El_Rey_R_L_COMMUREY

Google Images. (2022a). *Bicicleta o triciclo para recoger desperdicios* [Imagen]. Google Images. https://www.google.com/search?q=bicicleta+o+triciclo+para+recoger+desperdicios&hl=es-419&tbm=isch&sxsr=ALiCzsZbZNB_eyJPRZjqGtEM-rYSELGAxWQ%3A1669797757407&source=hp&biw=1280&bih=824&e

Google Images. (2022b). *Camión con tolva para residuos* [Imagen]. Google Images. https://www.google.com/search?q=cami%C3%B3n+con+tolva+para+residuos&tbm=isch&ved=2ahUKEwjJsZPrzNX7AhVLh-AKHf3ZDy0Q2-cCegQIABAA&oq=cami%C3%B3n+con+tolva+para+residuos&gs_lcp=CgNpbWcQAzoECCMQJ1DoEFicHWCaH2gAcAB4AIAB0gGIAZoLkgEFMC44LjGYAQCGAQGqAQnd3Mtd2l6LWltZ8ABAQ&sclient=img&ei=fyOHY4n2EMuOggf9s7_oAg&bih=807&biw=1263&hl=es-419#imgcr=30nX3c3eDmvKIM

Google Images. (2022c). *Camión volteo aseo* [Imagen]. Google Images.
https://www.google.com/search?q=cami%C3%B3n+volteo+aseo&tbm=isch&ved=2ahUKEwiDmOK0ytX7AhXjdN8KHWe4B1kQ2-cCegQIABAA&oq=cami%C3%B3n+volteo+aseo&gs_lcp=CgNpbWcQAzoECMqJzoFCAAQgAQ6BggAEAgQHjoECAAQHICLEVjmMmDnNWgAcAB4AIABkwGIAbMNkgEEMC4xMpgBAKABAAoBC2d3cy13aXotaW1nwAEB&client=img&ei=9CCHY4POFePp_Qbn8J7IBQ&bih=807&biw=1263&hl=es-419

Google Images. (2022d). *Carretilla de mano plástica grosor 3.5mm 55lbs* [Imagen]. Google Images.
https://www.google.com/imgres?imgurl=https://www.ferreterasanluis.com/uploads/images/full/_1576673747-4cf35292c1ee1ea0098b08222aa23ee0.png&imgrefurl=https://www.ferreterasanluis.com/p/carretilla-de-mano-plastica-grosor-35mm-55-lbs&tbnid=APWckBspkWwJIM&vet=1&docid=p0rBZiO3mCPcuM&w=1200&h=1200&itg=1&hl=es-US&source=sh/x/im

Google Images. (2022e). *Carro de desperdicios tirado por animal* [Imagen]. Google Images.
https://www.google.com/search?q=carro+de+desperdicios+tirado+por+animal&tbm=isch&ved=2ahUKEwja0YKGxdX7AhVuUt8KHYi2CV8Q2-cCegQIABAA&oq=carro+de+desperdicios+tirado+por+animal&gs_lcp=CgNpbWcQAzoECCMQJ1DgB1jgB2C6C2gAcAB4AIABlQGIAaYCKgEDMC4ymAEAoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWfAAQE&client=img&ei=VBuHY9rXCO6k_Qal7ab4BQ&bih=824&biw=1280&hl=es-419

Google Images. (2022f). *Tractores remolques* [Imagen]. Google Images.
https://www.google.com/search?q=tractores+remolques&tbm=isch&ved=2ahUKEWjd25vldX7AhUexikDHWAhCvcQ2-cCegQIABAA&oq=tractores+remolques&gs_lcp=CgNpbWcQAzoIGCAAQCB AeMgYIABAIEB4yBggAEAgQHjIGCAAQCBAeMgYIABAIEB4yBggAEAgQHjIGCAAQCBAeOgQIIxAnOgQIABBDogUIABCABDoICAAQgAQQsQM6BwgAELEDEEM6BggAEAUQHjoHCAAQgAQQGFDwB1jrIWDZlmgAcAB4AIABvgKIAeMYkgEIMC4xOC4wLjGYAQCgAQGqAQtnD3Mtd2l6LWltZ8ABAQ&client=img&ei=GxyHY4PiL56Mp8kP4MKouA8&bih=824&biw=1280&hl=es-419

Google Images. (2022g). *Triciclo motorizado para desperdicios* [Imagen]. Google Images.
https://www.google.com/search?q=triciclo+motorizado+para+desperdicios&tbm=isch&ved=2ahUKEwiS_9jdxX7AhWBGd8KHYYTZD9sQ2-cCegQIABAA&oq=triciclo+motorizado+para+desperdicios&gs_lcp=CgNpbWcQAzoECCMQJzoECAAQzoFCAAQgAQ6BggAEAcQHjoECAAQHjoGCAAQCBAeOgcIABCABBAyUO0FWJgcYJEeaABwAHgAgAGZAYgB-RWSAQQwLjE5mAEAoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWfAAQE&client=img&ei=DBYHY5JJgbP8BoSzv9gN&bih=824&biw=1280&hl=es-419

- Gunt Hamburg. (2019). CE 275 Windsichtung. https://www.gunt.de/images/datasheet/24/CE-275-Windsichtung-gunt-24-pdf_1_de-DE.pdf
- Gutiérrez, V. (2006). *Diagnóstico básico para la gestión integral de residuos* (Primera Edición). Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT). https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/196519/Diagnostico_basico_pgir_2006.pdf
- Hermida, C., & Domínguez, M. (2014). Economía circular como marco para el ecodiseño: El modelo ECO-3. *Informador Técnico (Colombia)*, 78(1), 82-90. https://www2.uned.es/egi/publicaciones/articulos/Economia_circular_como_marco_para_el_ecodiseno_el_modelo_ECO-3.pdf
- Hernández, A. J., & Román. (2016). *Phosphorus and nitrogen utilization efficiency in rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) fed diets with lupin (Lupinus albus) or soybean (Glycine max) meals as partial replacements to fish meal*. 61(2), 67-74. <https://doi.org/10.17221/8729-CJAS>
- Hidalgo, L. (1991). Poda de la Vid. En C. Flancy, *Enología: Fundamentos científicos y tecnológicos* (p. 237). Mundi-Prensa.
- Hidronor. (2021). *Exportación e incineración de residuos*. Hidronor Gestión y Tratamiento de Residuos. <https://www.hidronor.cl/servicios-integrales-en-residuos/exportacion-e-incineracion-de-residuos/>
- Hinkel, M., & Blume, S. (2018). *The role of pre- and Co-Processing in sustainable waste management*. ISWA World Conference, Kuala Lumpur, Malasia.
- Hofmann Group. (s. f.). *OUTCART* [Imagen]. Hofmann Group. <https://www.hofmanngroup.com/vagli/vaglio-a-dischi/outcart>
- Huerta, O., Martínez, X., Gallart, M., Soliva, M., & López, M. (2010). *El uso de compost de residuos sólidos municipales como enmienda orgánica: Aportaciones de diferentes componentes según origen*. Departamento de Ingeniería Agroalimentaria y Biotecnología. Universidad Politécnica de Cataluña. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/11638/Huerta%20et%20?sequence=1>
- GTC53-7 Guía para el aprovechamiento de residuos sólidos no peligrosos, 29 (2006). <https://pdfslide.net/documents/gtc53-7.html>
- INCINEROX. (2018). *Proceso para la incineración de residuos*. INCINEROX. <https://incinerox.com.ec/proceso-para-la-incineracion-de-residuos/>
- Instituto Nacional de Estadísticas. (2010). *Generación y Manejo de Residuos y Desechos Sólidos en Venezuela 2008-2010* [Boletines INE]. Instituto Nacional de Estadística.

- International Facility Management Association. (2022). *Grandes cifras del sector reciclado de residuos 2022*. International Facility Management Association Comisión Research y Formación.
- Junta de Andalucía. (2002). *Sistemas y técnicas para el compostaje*. https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/sistemas_y_tecnicas_para_el_compostaje.pdf
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a waste 2.0 A global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank Group. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>
- Kaza, S., Yao, L., & Stowell, A. (2016). *Sustainable financing and policy models for municipal composting*. World Bank Group. <https://www.waste.ccacoalition.org/document/sustainable-financing-and-policy-models-municipal-composting>
- López, C. (2020). *Tipos de reciclaje y separación de la fuente, como métodos para disminuir el porcentaje de materiales aprovechables que llegan al relleno sanitario Doña Juana en la ciudad de Bogotá* (p. 70) [Monografía]. Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/37256/calopezse.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- López, G. (2004). *Digestión anaerobia de residuos sólidos urbanos (RSU). Estimación del tiempo de retención dependiendo de la concentración de sólidos y de la presencia o no de inóculo* [Trabajo Fin de Máster, Universidad de los Andes]. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/10251/u245573.pdf?sequence=1>
- López, Ma. E., & Sainz, Ma. J. (2011). *Gestión de residuos orgánicos de uso agrícola* (Primera edición). Santiago de Compostela: servicio de publicaciones e Intercambio científico, Universidad de Compostela. https://www.academia.edu/36160772/Gesti%C3%B3n_de_residuos_org%C3%A1nicos_de_uso_agr%C3%ADcola
- Made in China. (2022). *Compactador de rodillos de doble tambor de alta presión para granulación de fertilizante compuesto* [Imagen]. Made in China. https://es.made-in-china.com/co_fuyimt/product_High-pressure-double-drum-roller-compactor-for-compound-fertilizer-granulation_hnrnhhygg.html
- Mallia, A., Dautant, R., Keyloun, C., & Oropeza, Z. (2002). *Utilización de la lombricultura en la transformación de lodo residual de una empresa productora de papel en abono orgánico (Humus)* (p. 8) [Estudio]. Universidad de Carabobo. <https://docplayer.es/17034177-Utilizacion-de-la-lombricultura-en-la-transformacion-de-lodo-residual-de-una-empresa-productora-de-papel-en-abono-orgnico-humus.html>

- Martínez, J. (2005). *Guía para la gestión Integral de Residuos Peligrosos. Fundamentos TOMO I*. Centro Coordinador del Convenio de Basilea para América Latina y El Caribe.
https://www.cempre.org.uy/docs/biblioteca/guia_para_la_gestion_integral_residuos/gestion_respel01_fundamentos.pdf
- Mavares, C., Chavarri, O., Rada, L., & Gil, L. (2018). Diseño de molinos de martillo. Parte 1: Conceptos Básicos. *Fundación Instituto de Ingeniería para Investigación y Desarrollo Tecnológico*. <http://www.fii.gob.ve/?p=4991>
- Mavropoulos, A. (2015). *Wasted health The tragic case of dumpsites*. International Solid Waste Association ISWA.
https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/E-Learning/Moocs/Solid_Waste/W1/tragic_case_dumpsites_2015.pdf
- Medina, M. (1999). Reciclaje de desechos sólidos en América Latina. *Frontera Norte*, 11(21).
<https://fronteranorte.colef.mx/index.php/fronteranorte/article/download/1411/863/5523>
- Mejías-Brizuela, N., Orozco-Guillén, E., & Galán-Hernández, N. (2016). Aprovechamiento de los residuos agroindustriales y su contribución al desarrollo sostenible de México. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 2(6), 27-41.
https://www.researchgate.net/publication/323959087_Aprovechamiento_de_los_residuos_agroindustriales_y_su_contribucion_al_desarrollo_sostenible_de_Mexico
- Decreto 230 Normas Sanitarias para Proyecto y Operación de un Relleno Sanitario de Residuos Sólidos de Indole Atóxico, 19 (1990).
- Ministerio del Medio Ambiente Colombia. (2002). *Guía para selección de tecnologías de manejo integral de residuos sólidos. Algunas alternativas tecnológicas*.
http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=8409&shelfbrowse_itemnumber=8901
- Möller, K. (2009). Influence of different manuring systems with and without biogas digestion on soil organic matter and nitrogen inputs, flows and budgets in organic cropping systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 84, 179-202.
<https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201301637046>
- Morales, D., Bello, M., & Martínez, Y. (2016). *Estado del arte de las investigaciones sobre la disposición de los residuos sólidos en Cundinamarca* [Trabajo Fin de Grado, Universidad La Gran Colombia].
https://repository.ugc.edu.co/bitstream/handle/11396/5305/Estadoarte_investigaciones_disposicci%C3%B3n_residuoss%C3%B3lidos_Cundinamarca.pdf?sequence=1

- Munawar, E. (2013). *Guidelines for design and operation of municipal solid waste landfills in tropical climates*. Asociación Internacional de Residuos Sólidos.
- Mutz, D., Hengevoss, D., Hugi, C., & Gross, T. (2017). *Opciones para el aprovechamiento energético de residuos en la gestión de residuos sólidos urbanos. Guía para los responsables de la toma de decisiones en países en vías de desarrollo y emergentes*. GIZ. <https://www.giz.de/en/downloads/Guia%20GIZ%202017%20WasteToEnergy%20-%20SP.pdf>
- Nabalia. (2018). Contenedores de reciclaje: Tipos, colores y significado [Imagen]. *Nabalia Energía viva*. <https://nabaliaenergia.com/blog/contenedores-reciclaje/>
- Noriega, M., & Estrada, O. (2016). *Recuperación Energética de los Residuos Plásticos: Una gran oportunidad*. Tecnología del Plástico. <https://www.plastico.com/es/noticias/recuperacion-energetica-de-los-residuos-plasticos-una-gran-oportunidad>
- NCh2880.Of2004 Compost—Clasificación y requisitos, 27 (2005). https://miros.cl/wp-content/uploads/2020/01/NCh_2880_Compost_Clasificaci%C3%B3n.pdf
- OECD. (2022). Environment at a Glance—OECD Indicators. *OECD Publishing*. <https://doi.org/10.1787/ac4b8b89-en>
- ONU-HABITAT. (2010). *Collection of municipal solid waste in developing countries*. United Nations Human Settlements Programme. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207233.2013.853407>
- Organización Panamericana de la Salud. (2000). *Análisis sectorial de residuos sólidos de Venezuela*. Organización Panamericana de la Salud. <https://iris.paho.org/handle/10665.2/48150?locale-attribute=es>
- Ormaza, E. (2015). *Diseño de una planta clasificadora de residuos sólidos urbanos para la empresa pública municipal mancomunada del pueblo Cañari de los Cantones: Cañar, Biblián, El Tambo y Suscal en el año 2014* [Trabajo Fin de Grado, Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/8979/1/UPS-CT005269.pdf>
- Ortega-Rivas, E. (2005). Handling and processing of food powders and particulates. En C. Onwulata (Ed.), *Encapsulated and Powdered Foods* (p. 501). Taylor & Francis Group. <https://epdf.tips/encapsulated-and-powdered-foods-food-science-and-technology.html>
- OVACEN. (2022). Economía circular; qué es y cómo funciona [Imagen]. *OVACEN*. <https://ovacen.com/economia-circular/>
- Palau, C. (2016). *Digestión anaerobia de residuos de biomasa para la producción de biogás* [Trabajo Fin de Grado, Universidad Politécnica de Valencia]. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/68331/Palau%20-%20Digesti%C3%B3n%20anaerobia%20de%20residuos%20de%20biomasa%20>

0para%20la%20producci%C3%B3n%20de%20biog%C3%A1s.%20Fundament
os..pdf?sequence=1#:~:text=La%20digesti%C3%B3n%20anaerobia%20produce
%20biog%C3%A1s,como%20fertilizante%20en%20suelos%20agr%C3%ADcol
as.

Paolini, A. (2007). *Validación de la metodología EVIAVE en vertederos en Venezuela. Análisis y propuestas de soluciones* [Tesis Doctoral, Universidad de Granada]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=72183>

Parra, R. (2015). Digestión anaeróbica mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. *Producción + Limpia*, '10(2), 142-159. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1909-04552015000200014&script=sci_abstract&tlng=es

Pérez, C. (2013). *Reducción de tamaño. Operaciones Unitarias 1*. <https://sites.google.com/site/opcristinal/home/reducciondetamano>

Picco, P. (2021). *Análisis de la generación y valorización de residuos sólidos domiciliarios de papel y cartón en Lima Metropolitana* [Trabajo Fin de Grado]. Universidad Nacional Agraria La Molina.

Pizano, R. (2018). *¿Cómo funciona un biodigestor?* [Infografía]. ProyectoFSE. <http://www.proyectofse.mx/2018/08/06/como-funciona-un-biodigestor/>

Plastics Technology México. (2021, septiembre 3). *Empresa mexicana que se enfoca el manejo de residuos sólidos urbanos ve gran oportunidad para recuperación de plásticos*. Plastics Technology México. <https://www.pt-mexico.com/noticias/post/empresa-mexicana-que-se-enfoca-el-manejo-de-residuos-solidos-urbanos-ve-gran-oportunidad-para-recuperacion-de-plasticos>

PlasticsEurope. (2022). *Reciclado y recuperación de energía*. PlasticsEurope Productores de Materias Plásticas. <https://legacy.plasticseurope.org/es/focus-areas/circular-economy/zero-plastics-landfill/recycling-and-energy-recovery>

Ponte de Chacín, C. (2008). Manejo Integrado de Residuos Sólidos: Programa de reciclaje. Instituto Pedagógico de Caracas. *Revista de Investigación*, 32(63), 173-200. https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S1010-29142008000100010&script=sci_abstract

Portillo, G. (s. f.). *Pirólisis. Renovables Verdes*. https://www.renovablesverdes.com/pirolisis/#google_vignette

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2021). *Hoja de ruta para el cierre progresivo de los basurales en América Latina y El Caribe*. ONU Programa para el Medio Ambiente (PNUMA). https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/34919/Roadmap_ES.pdf?sequence=8

Ramírez, S. (2012). *Aprovechamiento de residuos Agroindustriales, cascarilla de arroz (Oriza sativa) y residuos de papa (Solanum tuberosum) para la producción de*

- Trichoderma spp* [Trabajo Final de Grado, Universidad Técnica de Ambato].
<https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/3063>
- Ramos-Casselis, M. E. (2015). *BUAP crea fibra, alimento y biocombustible de residuos frutales*. Comunicación Institucional BUAP.
http://cmas.siu.buap.mx/portal_pprd/
- Real Academia Española. (2021a). *Desecho*. Diccionario de la lengua española (23a. ed.).
<https://dle.rae.es/desecho?m=form>
- Real Academia Española. (2021b). *Residuo*. Diccionario de la lengua española (23a. ed.).
<https://dle.rae.es/residuo?m=form>
- Real Academia Española. (2021c). *Vertedero*. Diccionario de la lengua española (23a. ed.). <https://dle.rae.es/vertedero?m=form>
- RECYTRANS. (2013). Funcionamiento de una planta de clasificación de residuos. *RECYTRANS soluciones globales para el reciclaje*.
<https://www.recytrans.com/blog/funcionamiento-de-una-planta-de-clasificacion-de-residuos/>
- Redobrán, M. (2013). *El manejo de desechos sólidos y su incidencia en la calidad de vida de los habitantes de la Parroquia Rivera del Cantón Azogues* [Trabajo Fin de Grado]. Universidad Técnica de Ambato.
- Reyes C., A., Pellegrini B., N., & Reyes G., R. (2015). El reciclaje como alternativa de manejo de los residuos sólidos en el sector minas de Baruta, Estado Miranda, Venezuela. *Revista de Investigación*, 39(86), 157-170.
https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S1010-29142015000300008&script=sci_abstract
- Reyes R., G. (2018). El fenómeno del consumismo y sus desafíos para la mejora del medio ambiente. *Ciencias Administrativas y Contaduría*, 1.
<https://doi.org/10.33132/26654644.1265>
- Richard, T., Trautmann, N., Krasny, M., Fredenburg, S., Stuart, C., & New York State College of Agriculture and Life Sciences. (1995). *Cornell composting*. Dept. of Agricultural & Biological Engineering New York State College of Agriculture and Life Sciences. <http://www.cals.cornell.edu/dept/compost/>.
- Rivero, C., Chirenje, T., Ma, L. Q., & Martínez, G. (2004). Influence of compost on soil organic matter quality under tropical conditions. *Geoderma*, 123(3-4), 355-361.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.002>
- Rodríguez, D. (2008). *Características e importancia de los rellenos sanitarios* (p. 111). Gobierno del Estado de Michoacán División de Educación Continua y a Distancia.
http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/16306/1/de_cd_5173.pdf

- Rodríguez, H. (2012). *Gestión integral de residuos sólidos* (Centro de educación a distancia). Fundación Universitaria del Área Andina. <https://digitk.areandina.edu.co/repositorio/handle/123456789/518>
- Rojo, J. (1988). *Teoría y práctica de la compactación: Vol. I Suelos*. Dynapac.
- Romero, A. (2010). La incineradora de residuos: ¿está justificado el rechazo social? *Revista Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 104(1), 175-187. <https://rac.es/ficheros/doc/00913.pdf>
- Rondón, E., Szantó, M., Pacheco, J., Contreras, E., & Gálvez, A. (2016). *Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios*. CEPAL Naciones Unidas. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/40407-guia-general-la-gestion-residuos-solidos-domiciliarios>
- Ropero, S. (2020, mayo 27). *Vertederos: Qué son, tipos y consecuencias* [Ecología]. Ecología Verde. <https://www.ecologiaverde.com/vertederos-que-son-tipos-y-consecuencias-2788.html>
- Rosas-Callejas, D., Ortiz-Laurel, H., Herrera-Corredor, J. A., & Leyva-Ovalle, O. (2016). Revalorización de algunos residuos agroindustriales y su potencial de aplicación a suelos agrícolas. *Agroproductividad*, 9(8), 18-23. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/796/661>
- Rubio, F. (2014). *Motores de combustión interna*. Tecnología Industrial. <https://sites.google.com/site/federubiotecindbachillerato/home/2o-bachillerato/mquinas/5-motores-de-combustion-interna>
- Sáez, A., & Urdaneta, J. (2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *Omnia*, 20(3), 121-135. <https://www.redalyc.org/pdf/737/73737091009.pdf>
- Salamanca, E. (2014). *Estrategias para el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en la plaza de mercado de Fontibón, Bogotá D.C* [Trabajo Fin de Máster, Universidad de Manizales]. <https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/handle/20.500.12746/1931>
- Salazar, T. (2014). Actividad microbiana en el proceso de compostaje aerobio de residuos sólidos orgánicos. *Revista de Investigación Universitaria*, 3(2), 74-84. <https://revistas.upeu.edu.pe/index.php/riu/article/view/680>
- Salud Sin Daño. (2022). *Pirólisis, gasificación y plasma*. Salud Sin Daño. <https://saludsindanio.org/americalatina/temas/pirolisis-gasificacion-plasma>
- Sánchez, J. (2019). *Aprovechamiento energético y material mediante digestión anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos que se producen en el Barrio Moravia—Medellín* [Trabajo Fin de Máster, Universidad de Antioquia]. https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/14222/1/SanchezJoe_2019_AprovechamientoEnergeticoMaterial.pdf

- Sanderson, J., Hettiaratchi, P., Hunte, C., Hurtado, O., & Keller, A. (2008). Methane balance of a bioreactor landfill in Latin America. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 58(5), 620-628. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.58.5.620>
- Sanmartín, Zhigue, R., & Alaña, T. (2017). El reciclaje: Un hecho de innovación y emprendimiento con enfoque ambientalista. *Revista Universidad y Sociedad*, 9(1), 36-40. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202017000100005
- Savage, G. M., Díaz, L. F., Golueke, C. G., & Martone, C. (1998). *Guidance for landfilling waste in economically developing countries* (EPA/600/SR-98/040). United States Environmental Protection Agency. <https://p2infohouse.org/ref/07/06458.pdf>
- SEDEMA. (s. f.). *De la separación primaria a la avanzada, historia del reciclaje en la CDMX* [Imagen]. SEDEMA. <http://data.sedema.cdmx.gob.mx/nadf24/separacion.html>
- Segura, Á., Rojas, L., & Pulido, Y. (2020). Referentes mundiales en sistemas de gestión de residuos sólidos. *Revista Espacios*, 41(17). <https://www.revistaespacios.com/a20v41n17/a20v41n17p22.pdf>
- Sensibilízate. (2022). Vertederos. *Sensibilízate Salud Ambiental*. <http://saludambientalydena.blogspot.com/2009/02/>
- Sepúlveda, L., & Alvarado, J. (2013). *Manual de compostaje. Manual de aprovechamiento de residuos orgánicos a través de sistemas de compostaje y lombricultura en el Valle de Aburrá* (Primera edición). Área Metropolitana del Valle de Aburrá. <https://www.metropol.gov.co/ambiental/residuos-solidos/Documents/cartillas/Manual%20de%20Aprovechamiento%20de%20Residuos%20Organicos.pdf>
- Shuster, K. A. (1974). *A five stage improvement process for solid waste collection systems* (Federal Solid Waste Management Programs). United States Environmental Protection Agency. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/9100RVVR.PDF?Dockey=9100RVVR.PDF>
- Solans, X., Alonso, R., & Gadea, E. (2001). *NTP 597: Plantas de Compostaje para el tratamiento de residuos: Riesgos higiénicos* (p. 7) [Norma Técnica]. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. https://www.cso.go.cr/legislacion/notas_tecnicas_preventivas_insht/NTP%20597%20-%20Plantas%20de%20compostaje%20para%20el%20tratamiento%20de%20residuos%20riesgos%20higienicos.pdf

- Soto, J. (2020). ¿Sabes qué es la incineración de residuos y por qué no debe aprobarse en México? *Greenpeace*. <https://www.greenpeace.org/mexico/blog/4106/sabes-que-es-la-incineracion-de-residuos-y-por-que-no-debe-aprobarse-en-mexico/>
- Soto-Cortés, J. J. (2015). El crecimiento urbano de las ciudades: Enfoques desarrollista, autoritario, neoliberal y sustentable. *Paradigma económico*, Año 7(1), 127-149. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5926288>
- Tchobanoglous, G., Szanto, M., Gil, J. L., Tejero, J. I., Vigil, S., & Theisen, H. (1998). *Gestión integral de residuos sólidos* (Vol. 1-2). McGraw Hill México. https://scholar.google.co.ve/scholar?q=tchobanoglous.+g.+1998.+gestion+integral+de+residuos+s%C3%B3lidos&hl=es&as_sdt=0%2C5&as_vis=1&lookup=0&as_ylo=1998&as_yhi=1999
- TexDelta. (2019). Geocompuestos para impermeabilizar vertederos. *El Blog de TexDelta*. <https://texdelta.com/blog/geocompuestos-para-impermeabilizar-vertederos-2/>
- Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, P., Schertenleib, R., & Zurbrugg, C. (2019). *Filtro anaerobio de flujo ascendente*. Sustainable Sanitation and water management toolbox. <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-saneamiento/recoleccion-y-almacenamiento/filtro-anaerobio-de-flujo-ascendente>
- Triviño, J., Reyes, C., & Sánchez, J. (2021). Subproductos generados en el tratamiento y valorización de residuos sólidos urbanos dentro del concepto de biorrefinería: Una revisión sistemática. *Ingeniería y Región*, 25, 60-74. <https://doi.org/10.25054/22161325.2783>
- TYMSA. (2015). *Cribas* [Imagen]. TYMSA Trituración y Molienda. <https://www.trituracionymolienda.com.mx/cribas/>
- Uemura, S., Ohashi, A., Harada, H., Hoaki, T., Tomozawa, T., Ohara, T., Ojima, R., & Ishida, T. (2008). Production of biologically safe digested manure for land application by a full-scale biogas plant with heat-inactivation. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 26(3), 256-260. <https://doi.org/10.1177/0734242X07087138>
- UNED. (2021). *Valorización de residuos y subproductos: Aplicaciones agroambientales* [Guía de Estudio Pública]. Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- United Nations Environment Programme. (2005). *Solid waste management: Vol. I*. United Nations Environmental Programme. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/30733/SWM1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- United Nations Environment Programme. (2009). *Developing Integrated Solid Waste Management Plan-Training Manual Vol. I: Waste Characterization and Quantification with Projections for Future: Vol. I*. United Nations Environmental Programme. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/7502>

- United Nations Environment Programme. (2019). *Waste to Energy. Considerations for informed decision-making*. United Nations Environmental Programme.
- USAID. (2018). *Sector environmental guideline solid waste*. USAID. https://www.usaid.gov/sites/default/files/documents/1860/SectorEnvironmentalGuidelines_SolidWaste_2018.pdf
- Valdez-Vázquez, I., Acevedo-Benítez, J., & Hernández-Santiago, C. (2010). Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 2147-2153. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.034>
- Vargas, Y., & Pérez, L. (2018). Aprovechamiento de residuos agroindustriales para el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 14, 59-72. <http://dx.doi.org/10.18359/rfcb.xxxx>
- Vilet, V. (2021). *¿Qué es la compactación de residuos y para qué sirve?* El valor de los residuos. <https://gtaambiental.com/compactacion-residuos/>
- Virtual Expo Group. (2022). *Compactador de basura estacionario CS series* [Imagen]. Direct Industry. <https://www.directindustry.es/prod/bob-sistemi-idraulici-spa/product-164907-1985980.html>
- Vitalis. (2015). Directorio de empresas recicladoras. Vitalis. <https://vitalis.net/empresasrecicladoras/>
- Wikipedia. (2022). *Depósito controlado*. Wikipedia. https://es.wikipedia.org/wiki/Dep%C3%B3sito_controlado
- Wilson, D., Araba, A., Chinwah, K., & Cheeseman, C. (2009). Building recycling rates through the informal sector. *Waste Management*, 29(2), 629-635. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.06.016>
- Wilson, D., Rodic, L., Modak, P., Soos, R., Carpintero, A., Velis, C., Iyer, M., & Simonett, O. (2015). *Global waste management outlook*. United Nations Environmental Programme - International Solid Waste Association. <https://www.greenreport.it/wp-content/uploads/2015/09/Global-Waste-Management-Outlook-2015.pdf>
- Yepes, G. (1989). *Management and operational practices of municipal and regional water and sewerage companies in Latin América and the Caribbean* (Infraestructure and Urban development papers REPORT INU 61; p. 34). Infraestructure and Urban Development Department The World Bank. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/929181468743928996/pdf/multi-page.pdf>
- Yepes, S., Montoya, L., & Orozco, F. (2008). Valorización de residuos agroindustriales—Frutas—En Medellín y el sur del Valle del Aburrá, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín*, 61(1), 4422-4431. <https://www.redalyc.org/pdf/1799/179914077018.pdf>

- Yokoyama, S., Jonouchi, K., & Imou, K. (2007). Energy production from Marine Biomass: Fuel cell power generation driven by methane produced from seaweed. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Marine and Environmental Sciences*, 1(4), 24-27. <https://zenodo.org/record/1334728/files/8749.pdf>
- Zafranet. (2016). *Déficit mundial no afecta el abasto azucarero de México: Rello Lara*. Zafranet. <http://www.zafranet.com/2016/06/deficit-mundial-no-afecta-el-abasto-azucarero-de-mexico-relo-lara/>
- Zakaria, Z. A., Boopathy, R., & Dib, J. R. (Eds.). (2020). *Valorisation of Agro-industrial residues—Volumen I: Biological Approaches*. Springer. <https://www.springerprofessional.de/valorisation-of-agro-industrial-residues-volume-i-biological-app/17770868>

DE LOS AUTORES

Patricio Vladimir Méndez Zambrano



Nacionalidad: ecuatoriana

Títulos académicos:

- Máster en gestión ambiental
- Ingeniero en biotecnología ambiental

Filiación:

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Sede Morona Santiago, EC140101, Macas, Morona Santiago, Ecuador.

Resumen hoja de vida:

Es Ingeniero en Biotecnología Ambiental por la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Riobamba Ecuador). Es Master en Gestión Ambiental de la Universidad Internacional SEK (Quito Ecuador) y actualmente cursa el doctorado de Ingeniería del agua y medioambiente en la universidad politécnica de valencia (Valencia España)

En el 2014 fue técnico de monitoreo de campo en el laboratorio ambiental CESTTA; organismo acreditado por el SAE. De 2016 a 2018 Fue Monitor Ambiental de campo en operaciones petroleras, en el BLOQUE 57. Shushufindi. Desde 2018 a la Actualidad es Docente en la sede Morona Santiago de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Jessica Paola Arcos Logroño



Nacionalidad: Ecuatoriana

Títulos académicos:

- Máster en Ciencias Agroambientales y Agroalimentarias
- Ingeniera en Biotecnología Ambiental

Resumen hoja de vida:

Ingeniera en Biotecnología Ambiental de la Escuela Superior de Chimborazo, Máster Universitario en Ciencias Agroambientales y Agroalimentarias de la Universidad Autónoma de Madrid, actualmente trabajo como Docente en la ESPOCH- Sede Morona Santiago en la carrera de Ingeniería Ambiental impartiendo las cátedras de Biodiversidad, Ecotoxicología e Impactos Ambientales entre otras, Directora del proyecto de vinculación “Proyecto para determinar la factibilidad para la creación de una empresa recicladora de plásticos y su comercialización como materia prima en la ciudad de Macas”. Directora y asesora en diferentes Tesis de Pregrado en la formación de Ingenieros Ambientales, además cuenta con publicaciones en revistas indexadas en temas relacionados con el ambiente.

Rogelio Estalin Ureta Valdez



Nacionalidad: ecuatoriano

Títulos académicos:

- Máster en Gestión de la Producción
- Magister en Prevención de Riesgos Laborales
- Ingeniero en Industrias Pecuarias

Filiación:

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Sede Morona Santiago, EC140101, Macas, Morona Santiago, Ecuador.

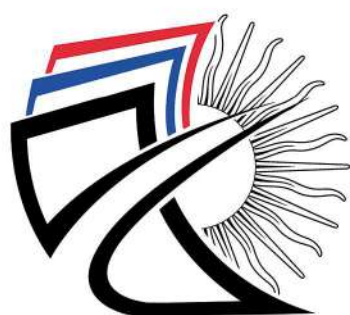
Resumen hoja de vida:

Ingeniero En Industrias Pecuarias, Magister en Gestión de la Producción, Máster en Prevención de Riesgos Laborales. Ayudante de cátedra de la asignatura de Control de Calidad por méritos de Beca Académica, Supervisor de Control de Calidad en las áreas de empackado, desposte y faenamiento de aves y cerdos en Planta Procesadora de Carnes “Avícolas Fernández S.A” (pasantías); Supervisor de proceso Planta de Lácteos “6 de Enero” (pasantías); Docente desde el año 2012 hasta la actualidad de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo Sede Morona Santiago, miembro de la Comisión de Evaluación y Aseguramiento de la Calidad de las carreras de Industrias Pecuarias, Zootecnia, Minas e Ingeniería Ambiental; Miembro del Grupo de Investigación de Recursos Mineros e Ingeniería “GIRMI”.

Estefanía Freytez Boggio



Nació en Barquisimeto, estado Lara, Venezuela en 1983. Desde el año 2006 recibió su título en Ingeniería Agroindustrial en la Universidad Centro-Occidental Lisandro Alvarado. Desde 2016, recibió su título de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental en la Universidad de Carabobo. Desde 2021 recibió su Doctorado en Ingeniería en la Universidad de Carabobo. Entre 2007 y 2008 fue profesora en la Universidad Nacional Experimental Llanos Ezequiel Zamora, impartiendo las cátedras de Residuos Agroindustriales y Agroindustria Vegetal. Para el 2008 fue profesora en el Instituto Tecnológico Apure, impartiendo la cátedra de Agroindustria Vegetal. Entre 2008 y 2010 se desempeñó como Jefa de Gabinete del Ministerio del Poder Popular para la Agricultura y Tierras, gestionando proyectos agropecuarios y colaborando con el Instituto Nacional de Agricultura y Tierras. Desde 2010 a la fecha es profesora del Programa de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Centro-Occidental Lisandro Alvarado, impartiendo las asignaturas de Residuos Agroindustriales I y II, y la optativa de Higiene y Seguridad Industrial. Desde 2014 a la fecha es miembro activo del Centro de Estudios Hidrológicos



**PUERTO MADERO
EDITORIAL**

ISBN 978-987-82816-3-6



9 789878 281636