



APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS MEDIANTE LA TÉCNICA DEL COMPOSTAJE PARA SU UTILIZACIÓN EN ÁREAS DEGRADADAS

Paola Mabel Caniza Prieto

2019



SHS
Departamento de Hidráulica e Saneamento

FIPAI



MINISTERIO DE
OBRAS PÚBLICAS
Y COMUNICACIONES

UNIVERSIDAD DE SÃO PAULO
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SÃO CARLOS
IMPACTOS AMBIENTALES EN OBRAS DE INFRAESTRUCTURA
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y COMUNICACIONES

PAOLA MABEL CANIZA PRIETO

**Aprovechamiento de Residuos Sólidos Orgánicos Mediante la Técnica del
Compostaje para su Utilización en Áreas Degradadas**

São Carlos

2019

PAOLA MABEL CANIZA PRIETO

**Aprovechamiento de Residuos Sólidos Orgánicos Mediante la Técnica del
Compostaje para su Utilización en Áreas Degradadas**

Monografía presentada en la Escuela de Ingeniería de São Carlos como parte de los requisitos para la conclusión del curso de Especialización en Impactos Ambientales en Obras de Infraestructura.

Orientadora: Prof. Dra. Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues

São Carlos

2019

AUTORIZO LA REPRODUCCIÓN Y DIVULGACIÓN TOTAL O PARCIAL DE ESTE TRABAJO, POR CUALQUIER MEDIO CONVENCIONAL O ELECTRÓNICO, PARA FINES DE ESTUDIO E INVESTIGACIÓN, DESDE QUE SE CITE LA FUENTE.

Ficha catalográfica preparada por la Sección de Atendimiento al Usuario
del Servicio de la Biblioteca
“Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes” de la EESC/USP

C223a

Caniza Prieto, Paola Mabel

Aprovechamiento de resíduos sólidos orgánicos mediante la técnica del compostaje para su utilización en áreas degradadas / Paola Mabel Caniza Prieto; orientador Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues. -- São Carlos, SP, 2019.

Monografía (Especialización en Impactos Ambientales en Obras de Infraestructura) -- Escuela de Ingeniería de São Carlos de la Universidad de São Paulo.

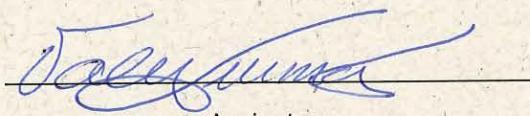
1. Materia orgánica. 2. Erosión. 3. Área contaminada.
4. Composta. I. Rodrigues, Valéria Guimarães Silvestre.
- II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato:	Paola Mabel Cañiza Prieto
Título do TCC:	Aprovechamiento de Residuos Sólidos Orgánicos mediante la técnica del compostaje para su utilización en áreas degradadas
Data da defesa:	09 de dezembro de 2019

Comissão Julgadora	Resultado
Profa. Dra. Valéria Guimarães S. Rodrigues	APROVADA
Instituição: Escola de Engenharia de São Carlos - Departamento de Geotecnia	
Prof. Dr. Valdir Schalch	APROVADA
Instituição: Escola de Engenharia de São Carlos - Departamento de Hidráulica e Saneamento	

Presidente da Banca: **Profa. Dra. Valéria Guimarães S. Rodrigues**



Assinatura

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a los directivos y docentes de la Escuela de Ingeniería de San Carlos, en especial a mi orientadora, la Prof. Dra. Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues, por toda la paciencia, consejos y correcciones; y al Prof. Dr. Davi Gasparini Fernandes Cunha por toda la colaboración prestada, gracias a los cuales fue posible el desarrollo de este trabajo de investigación.

Al Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones del Paraguay por la oportunidad de capacitación brindada, y la confianza depositada en todos los profesionales que participamos del curso de Especialización en Impactos Ambientales en Obras de Infraestructura.

A mi familia por ser el pilar fundamental y haberme apoyado incondicionalmente, pese a las adversidades.

A los colegas por toda la ayuda prestada durante el desarrollo del curso de especialización.

RESUMEN

Prieto, P. M. **Aprovechamiento de Residuos Sólidos Orgánicos Mediante la Técnica del Compostaje para su Utilización en Áreas Degradadas.** 119 p. Monografía (Trabajo de Conclusión de Curso) – Escuela de Ingeniería de San Carlos, Universidad de San Paulo, San Carlos, 2019.

El compostaje es un método utilizado en varios países con el fin de reducir el volumen de residuos sólidos orgánicos enviados a los rellenos sanitarios y poder así reaprovechar los mismos. Es una alternativa viable para la destinación ambientalmente adecuada del material orgánico.

El trabajo realizado fue del tipo no experimental sobre los compuestos orgánicos, de investigación documental, con enfoque cuantitativo; la investigación fue desarrollada a través de la metodología del análisis, se colectaron las informaciones, mediante una búsqueda bibliográfica seleccionada, en fuentes primarias y secundarias de confiabilidad, en el marco del tema abordado.

El nivel descriptivo del trabajo consistió en identificar y describir los distintos procesos del compostaje, así como evaluar las diferencias en la composición, conforme al método y al material de entrada, a través de la evaluación de los resultados de distintos trabajos, además, identificar los principales parámetros que deben ser considerados para garantizar la calidad del producto final y sus posibles usos en áreas degradadas (erosión y áreas contaminadas por metales potencialmente tóxicos) y en la agricultura.

De forma general se observó que el material de entrada no afecta particularmente la calidad final del compost, en cuanto a los parámetros físicos y químicos, sin embargo, a pesar de utilizar el mismo proceso de compostaje, los valores de concentración de metales potencialmente tóxicos presentan diferencias significativas cuando los materiales de entrada son diferentes.

El compostaje in situ, podría ser aplicado como una metodología de gerenciamiento en los campamentos de obras viales en el Paraguay, debido a la cantidad de residuos producidos, reduciendo de esta forma la cantidad de desechos que son destinados a los aterros sanitarios.

Podrían ser aplicados métodos como el de recipientes cerrados, del tipo alambrado o pilas estáticas, precisan de equipamientos sencillos, son adecuados para pequeñas áreas, requieren una baja inversión inicial y costo de mantenimiento, además de la simplicidad de la operación del procedimiento, y la rapidez con que el producto puede ser obtenido.

Palabras claves: Composta; Materia Orgánica; Erosión; Áreas contaminadas

RESUMO

Prieto, P. M. Aproveitamento de Resíduos Sólidos Orgânicos Mediante a Técnica da Compostagem para Utilização em Áreas Degradadas. 119 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

A compostagem é um método usado em vários países para reduzir o volume de resíduos sólidos orgânicos enviados para aterros e, assim, reutilizá-los. É uma alternativa viável para o destino ambientalmente adequado do material orgânico.

O trabalho realizado foi do tipo não experimental sobre compostos orgânicos, de pesquisa documental, com abordagem quantitativa; a pesquisa foi desenvolvida através da metodologia da análise, as informações foram coletadas, por meio de uma pesquisa bibliográfica selecionada, em fontes primárias e secundárias de confiabilidade, no âmbito do assunto abordado.

O nível descritivo do trabalho consistiu em identificar e descrever os diferentes processos de compostagem, além de avaliar as diferenças na composição, de acordo com o método e o material de entrada, através da avaliação dos resultados de diferentes trabalhos, além de identificar os principais parâmetros que devem ser considerados para garantir a qualidade do produto final e seus possíveis usos em áreas degradadas (erosão e áreas contaminadas por metais potencialmente tóxicos) e na agricultura.

De maneira geral, observou-se que o material de entrada não afeta particularmente a qualidade final do composto, em termos de parâmetros físicos e químicos, no entanto, apesar de utilizar o mesmo processo de compostagem, os valores de concentração de metais potencialmente tóxicos mostram diferenças significativas quando os materiais de entrada são diferentes.

A compostagem no local poderia ser aplicada como uma metodologia de gerenciamento em acampamentos nas estradas do Paraguai, devido à quantidade de resíduos produzidos, reduzindo assim a quantidade de resíduos destinados a aterros sanitários.

Métodos como recipientes fechados, de alambrado ou leiras estáticas podem ser aplicados, requerem equipamentos simples, são adequados para pequenas áreas, requerem um baixo custo inicial de investimento e manutenção, além da simplicidade da operação do procedimento e com que rapidez o produto pode ser obtido.

Palavras-chave: Compostagem; Matéria orgânica; Erosão; Áreas contaminadas

ABSTRACT

Prieto, P. M. **Collection of Organic Solid Waste by Composting Technique for use in Degraded Areas.** 119 p. Monograph (Course Conclusion Paper) - São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2019.

Composting is a method used in several countries in order to reduce the volume of organic solid waste sent to landfills and thus reuse them. It's a viable alternative for the environmentally appropriate destination of the organic material.

The study carried out was of the non-experimental type on organic compounds, of documentary research, with a quantitative approach; the research was developed through the methodology of the analysis, the information was collected, through a selected bibliographic search, in primary and secondary sources of reliability, within the framework of the subject addressed.

The descriptive level of the work consisted in identifying and describing the different composting processes, as well as evaluating the differences in the composition, according to the method and input material, through the evaluation of the results of different studies, in addition, identifying the main parameters that must be considered to guarantee the quality of the final product and its possible uses in degraded areas (erosion and areas contaminated by potentially toxic metals) and in agriculture.

In general, it was observed that the input material does not particularly affect the final quality of the compost, in terms of physical and chemical parameters, however, despite using the same composting process, the concentration values of potentially toxic metals present significant differences when the input materials are different.

On-site composting could be applied as a management methodology in roadworks camps in Paraguay, due to the amount of waste produced, thus reducing the amount of waste that is destined for sanitary landings.

Methods such as closed containers, wired type or static batteries could be applied, require simple equipment, are suitable for small areas, require a low initial investment and maintenance cost, in addition to the simplicity of the operation of the procedure, and the How quickly the product can be obtained.

Keywords: Compost; Organic matter; Erosion; Contaminated areas

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 – Clasificación de los Residuos Sólidos.....	26
Ilustración 2 – Leyes relacionadas a la gestión de RS.....	27
Ilustración 3 – Artículos Relacionados a la gestión de RS.....	28
Ilustración 4 - Flujograma del manejo de RSU	33
Ilustración 5 – Jerarquía Estratégica de Gestión de RS.....	34
Ilustración 6 - Situación de los RS en Asunción	35
Ilustración 7 - Composición de RSU (porcentaje) en Vertedero Cateura.	36
Ilustración 8 – Gancheros del vertedero de Cateura.....	38
Ilustración 9 – Fotografía aérea del vertedero Cateura	39
Ilustración 10 – Vertedero Cateura.....	40
Ilustración 11 – Vertedero El Farol	40
Ilustración 12 – Planta de Compostaje Tamarandy	41
Ilustración 13 – Pilas de Compostaje en Tamarandy	42
Ilustración 14 - Patrón de Temperatura Durante el Compostaje	48
Ilustración 15 - Diagrama General del Proceso del Compostaje Aeróbico.....	48
Ilustración 16 – Fases de Digestión Anaeróbica	50
Ilustración 17 - Factores que afectan la digestión aeróbica.....	51
Ilustración 18 – Factores que afectan la digestión anaeróbica	61
Ilustración 19 – Sistemas de Compostaje.....	63
Ilustración 20 – Flujo de Aire Caliente en una Pila de Aireación Natural	64
Ilustración 21 - Pila con Aireación Natural	65
Ilustración 22 - Esquema de Pila Estática Aireada.....	66
Ilustración 23 - Modelo de Pilas Revueltas Mecánicamente.....	67
Ilustración 24 – Pila con volteo con Aireación Forzada.....	68
Ilustración 25 - Reactor Vertical	69
Ilustración 26 - Reactor Circular	69
Ilustración 27 - Reactor Vertical Discontinuo.....	70
Ilustración 28 - Reactor Horizontal	71
Ilustración 29 – Compostera de alambrado	73
Ilustración 30 – Método de Hilera Estática (A) Vista Interior (B) Vista Superficial.....	74
Ilustración 31 – Recipientes para Compostaje	75
Ilustración 32 – Manta de Compost.....	83

Ilustración 33 – Bermas de Compost	83
Ilustración 34 – Compost Socks	84
Ilustración 35 – Etapas de Investigación.....	96
Ilustración 36 – Alcance de la Investigación	96

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 - Parámetros del Compostaje Aeróbico	60
Tabla 2 - Propiedades generales de un compost para ser comercializado según la OMS	76
Tabla 3 - Criterios de Calidad del Compost como Abono Orgánico	88
Tabla 4 - Fracciones Estándar del Compost.....	89
Tabla 5 – Características del Compost para la agricultura.....	89
Tabla 6 - Concentraciones de metales pesados presentes en compost para la agricultura orgánica	90
Tabla 7 – Comparación de Límites Microbiológicos en Compost Establecidos por las Normas Colombiana, Chilena, Española y Mexicana	97
Tabla 8 – Comparación de Parámetros Físicos Permitidos en el Compost – Normas Chilena, Mexicana y la OMS	98
Tabla 9 – Comparación de parámetros químicos permitidos en el compost, de acuerdo con las normas chilena, mexicana, los rangos establecidos por la OMS, EPA y la AASHTO.....	99
Tabla 10 – Comparación de los Límites de concentración de metales pesados en el compost	100
Tabla 11 – Propiedades Físicas y Químicas Determinadas en 4 Tipos de Compuestos Analizados por Lima (2017)	101
Tabla 12 – Propiedades Físicas y Químicas Determinadas en 4 Tipos de Compuestos Analizados por Guermandi (2015).....	103
Tabla 13 - Parámetros del ensayo Negret (2018).....	104
Tabla 14 – Comparación de Parámetros por el Método de Pilas Revueltas Mecánicamente en Compostas con Diferentes Tipos de Entradas.....	104
Tabla 15 - Comparación de Parámetros por el Método de Pilas Revueltas Manualmente ...	105
Tabla 16 - Comparación de Parámetros por el Método de Recipiente Cerrado.....	106
Tabla 17 – Valores de pH para Distintos Tipos de Compost.....	107
Tabla 18 - Valores de Carbono, Nitrógeno y Relación C/N para Distintos Tipos de Compost	108
Tabla 19 - Concentraciones de Metales para Distintos Tipos de Compost.....	109

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1 - Estructura Institucional de los servicios de RS	31
Cuadro 2 - RS Compostables (ricos en Nitrógeno y ricos en Carbono)	44
Cuadro 3 - Residuos Sólidos No Compostables	45
Cuadro 4 - Parámetros de Temperatura Óptimos	52
Cuadro 5 - Parámetros de Humedad	53
Cuadro 6 - Control del Tamaño de la Partícula	54
Cuadro 7 - Control de Aireación	55
Cuadro 8 - Parámetros de la relación C/N	57
Cuadro 9 – Valores de pH en el Compost	58
Cuadro 10 - Ventajas y Desventajas de los Métodos de Compostaje	72
Cuadro 11 - Comparación entre Sistemas Abiertos y Cerrados	72
Cuadro 12 - Temperatura y Tiempo de exposición para la destrucción de patógenos	80
Cuadro 13 - Efectos de la Materia Orgánica en Suelos Cultivados	87
Cuadro 14 – Alternativas de Compostaje y Recomendaciones	92

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

ABNT	–	Asociación Brasilera de Normas Técnicas
AMA	–	Área Metropolitana de Asunción
CE	–	Conductividad Eléctrica
CIC	–	Capacidad de Intercambio Catiónico
CONAM	–	Consejo Nacional del Ambiente
CRA	–	Capacidad de Retención de Agua
DGEEC	–	Dirección General de Estadística, Encuestas y Censos
EPA	–	Environmental Protection Agency
EPA	–	Autoridad de Protección Ambiental de Australia Occidental
GEI	–	Gases de Efecto Invernadero
FAO	–	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FORSU	–	Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos
GIRSU	–	Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos
IBAMA	–	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
ICES	–	Iniciativa de Ciudades Emergentes y Sostenibles
MADES	–	Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible
MSPyBS	–	Ministerio de Salud Pública y Bienestar Social
MOPC	–	Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones
NBR	–	Normas Brasileras
OMS	–	Organización Mundial de la Salud
PH	–	Potencial de Hidrógeno
PMGIRS	–	Plan Municipal de Gestión Integral de Residuos Sólidos
PNGIRS	–	Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos
PROSAB	–	Programa de Pesquisas en Saneamiento Básico
RS	–	Residuos Sólidos
RSM	–	Residuos Sólidos Municipales
RSO	–	Residuos Sólidos Orgánicos
RSOM	–	Residuos Sólidos Orgánicos Municipales
RSU	–	Residuos Sólidos Urbanos
SEAM	–	Secretaría del Ambiente
STP	–	Secretaría Técnica de Planificación

LISTA DE SÍMBOLOS

C	–	Carbono
CaO	–	Óxido de calcio
Cd	–	Cadmio
CH ₄	–	Metano
CO ₂	–	Dióxido de carbono
Cr	–	Cromo
Cu	–	Cobre
H ₂	–	Di hidrógeno
H ₂ S	–	Hidrógeno de azufre
Hg	–	Mercurio
HgO	–	Óxido de mercurio
K	–	Potasio
K ₂ O	–	Óxido de potasio
Mg	–	Magnesio
N	–	Nitrógeno
N ₂	–	Di Nitrógeno
NH ₃	–	Amoniaco
Ni	–	Níquel
P	–	Fósforo
Pb	–	Plomo
P ₂ O ₅	–	Anhídrido fosfórico
Zn	–	Zinc

SUMARIO

1	INTRODUCCIÓN	21
2	OBJETIVOS	23
2.1	OBJETIVO GENERAL.....	23
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
3	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	24
3.1	RESIDUOS SÓLIDOS	24
3.2	RESIDUOS SÓLIDOS (RS) EN PARAGUAY	26
3.2.1	Marco Legal y Regulatorio	26
3.2.2	Proceso Evolutivo del Sector de RS	28
3.2.3	Estructura Institucional de los Servicios de RS en Paraguay.....	31
3.2.4	Gerenciamiento de los RS en Paraguay	32
3.2.5	Estado General de los RS en Paraguay	34
3.2.6	Generación y Composición de los RSU en Paraguay	35
3.2.7	Plan Nacional de Mitigación ante el Cambio Climático (Paraguay)	37
3.2.8	Impacto de los Servicios de Manejo de RS Sobre la Salud y el Ambiente	37
3.2.9	Disposición Final de los RSU en Paraguay	38
3.2.10	Centro de Reciclaje y Compostaje en la Ciudad de Luque	41
3.3	COMPOSTAJE.....	42
3.3.1	Materia Prima.....	43
3.4	FASES DEL COMPOSTAJE	45
3.5	CLASIFICACIÓN DEL COMPOSTAJE.....	46
3.5.1	Proceso Aeróbico	46
3.5.2	Proceso Anaeróbico	49
3.5.3	Proceso Mixto	51
3.6	FACTORES QUE AFECTAN EL COMPOSTAJE AERÓBICO	51

3.6.1	Físicos.....	52
3.6.2	Químicos.....	56
3.6.3	Biológicos.....	59
3.7	FACTORES QUE AFECTAN EL COMPOSTAJE ANAERÓBICO	60
3.7.1	Biológicos.....	61
3.7.2	Físicos.....	62
3.7.3	Químicos.....	62
3.7.4	Operacionales	63
3.8	SISTEMAS DE COMPOSTAJE.....	63
3.8.1	Abiertos	64
3.8.2	Cerrados.....	68
3.8.3	Comparación entre los Distintos Métodos de Compostaje.....	71
3.8.4	Compostaje Comunitario y Doméstico.....	73
3.9	CARACTERIZACIÓN DEL COMPOST	75
3.9.1	Madurez del Compost.....	76
3.9.2	Métodos para determinar el Grado de Madurez del Compost.....	76
3.9.3	Factores Limitantes para el Uso del Compost.....	80
3.10	APLICACIONES DEL COMPOST EN ÁREAS DEGRADADAS.....	81
3.10.1	El Compost en la Erosión del Suelo	82
3.10.2	Usos del Compost en Suelos Contaminados por Metales Pesados	85
3.10.3	Usos del Compost para la Mejora de Nutrientes (Agricultura)	86
3.11	CONSIDERACIONES ECONÓMICAS	90
3.11.1	Estudio de Factibilidad para una Planta de Compostaje.....	90
3.11.2	Factores Intervinientes en un Estudio de Costos	91
3.12	CONSIDERACIONES GENERALES	92
3.12.1	Alternativas de Compostaje.....	92
3.12.2	Aplicación del Compostaje en Paraguay	93

4	METODOLOGÍA	95
4.1	TIPO DE INVESTIGACIÓN	95
4.1.1	Etapas	95
4.1.2	Alcance.....	96
5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	97
5.1	NORMATIVAS RELACIONADAS AL USO Y CALIDAD DEL COMPOST	97
5.2	EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL COMPOST	101
5.2.1	Comparación de Distintos Métodos de Compostaje con el Mismo Material de Entrada	101
5.2.2	Comparación de Procesos Similares de Compostaje con Distintos Materiales de Entrada	104
5.2.3	Comparación de Parámetros para Distintos Tipos de Compuestos	107
6	CONCLUSIONES	110
7	RECOMENDACIONES.....	112
	REFERENCIAS.....	113

1 INTRODUCCIÓN

El manejo de los residuos sólidos en Paraguay es precario, la escasa planificación, la distribución poco uniforme de la población, la desordenada ocupación de los territorios, el empobrecimiento de los últimos años, el crecimiento acelerado de las poblaciones urbanas, principalmente en las áreas marginales, son algunos los problemas que afectan directamente al sector, conforme el informe presentado por la Evaluación Regional de los servicios de Manejo de Residuos Sólidos Municipales (STP, 2002).

De acuerdo a la proyección geométrica del Inventario de Gases de Efecto Invernadero (GEI) del 2012 se establece el promedio de generación de residuos sólidos urbanos 1,18 kg/persona/día en los municipios del Paraguay. Se estima que actualmente se genera aproximadamente 7.200 ton/día en las poblaciones urbanas de los municipios del Paraguay (ATET, 2019). El 61,1% de los residuos del país corresponden a residuos de origen orgánico, según la Secretaría del Medio Ambiente (SEAM) (2016).

De los residuos urbanos del Paraguay, es recolectado el 69% del total (ATET, 2019), se estima que un total de 3573 ton al día son recolectados en el ámbito urbano, con una frecuencia variable de recolección.

Atendiendo a la disposición final de los residuos sólidos urbanos en Paraguay, las estadísticas indican que la situación es preocupante, el 92% de los residuos sólidos son dispuestos en vertederos a cielo abierto, el 6% en vertederos controlados y el 2% en rellenos sanitarios, de acuerdo a los datos del Inventario Nacional de GEI (SEAM, 2012).

Los bajos valores de los indicadores de cobertura de recolección y de disposición final indican la falencia y falta de progreso inherentes al tema, situación relacionada a la estructura institucional y legal, de responsabilidad en el manejo de los residuos sólidos en el Paraguay.

El manejo deficiente de los residuos sólidos en sus diferentes fases, constituye un factor de riesgo ambiental, especialmente en sitios de almacenamiento y disposición final, que generan un hábitat propicio para la proliferación de vectores y otros agentes de enfermedades, además de causar la degradación ambiental de las aguas superficiales y subterráneas, del suelo y de la atmósfera, cuyo impacto va más allá de las áreas contaminadas, afectando también a la población en general (MOGUEL, 2019).

Consecuentemente en el marco de la sustentabilidad ambiental, la gestión integral de los residuos sólidos constituye una preocupación importante por sus impactos directos e indirectos, algunos de ellos incluso permanentes, tanto sobre el medio ambiente como sobre la salud de la población.

Es preciso buscar alternativas que permitan mejorar el sistema de gerenciamiento de los mismos, desenvolver nuevas tecnologías de tratamiento y reaprovechamiento, evitando de esta manera los impactos ambientales negativos que causan su disposición inadecuada.

En la ley 3956/09 de la Gestión Integral de Residuos Sólidos en Paraguay, se establece, que “los residuos sólidos, cuyas características lo permitan, deberán ser aprovechados mediante su utilización o reincorporación al proceso productivo como materia secundaria, sin que represente riesgos a la salud y al ambiente”, dicha ley, además, considera el proceso de compostaje como un sistema de aprovechamiento.

El compostaje, es un proceso natural, económico, social y que permite minimizar el impacto ambiental generado por los residuos y desviarlos de los vertederos, reduciendo de esta manera los volúmenes incorporados a los mismos.

Es un tratamiento alternativo, ambientalmente recomendable, que busca evitar los riesgos de contaminación que pueden provocar otras alternativas como la incineración y los vertederos.

El compostaje consiste en un proceso biológico de oxidación que degrada la materia orgánica, convirtiéndola a través de la liberación de sustancias minerales, en un material orgánico estable, llamado compost. El compost puede actuar en el suelo mejorando sus características físicas, como la aireación, la infiltración y la retención de agua, la estructuración y la porosidad (NOVAIS et al., 2007).

Debido a lo expuesto, es cada vez más evidente la necesidad de avanzar en dirección a instrumentos que impulsen conductas ambientalmente sustentables y transfieran capacidades preventivas de acuerdo con Atet (2019). El proceso de compostaje por lo tanto pasa a ser una alternativa viable para el aprovechamiento de los residuos orgánicos y sus posteriores aplicaciones en áreas degradadas.

Las aplicaciones del compost en ingeniería y en la agricultura son variadas, como ser, remediación de suelos contaminados con materiales pesados, recuperación de suelos ya erosionados (cárcavas), mejora de cobertura vegetal de terraplenes, control de la erosión en obras lineales de infraestructura (talud, contra talud), debido a que mejora la estructura del suelo proporcionando mayor aporte de nutrientes, mejorando el mismo, además de las aplicaciones en horticultura.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar las diferencias en la composición del compost conforme al método y al material de entrada, así como proponer parámetros a ser seguidos como normativas en el Paraguay, relacionados a las propiedades principales que deberán ser obtenidas en compost a ser empleados en áreas degradadas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Clasificar y caracterizar los residuos sólidos orgánicos.
- Describir técnicas biológicas de compostaje con énfasis en el proceso de obtención del compost.
- Evaluar los parámetros de calidad del compost mediante los procesos de compostaje.
- Evaluar los parámetros necesarios en las compostas que serán empleados en áreas degradadas por contaminación.
- Evaluar los parámetros necesarios en las compostas que serán empleadas en áreas degradadas por erosión.
- Proponer parámetros que deberán constar de normativas para el empleo de compostas en áreas degradadas del Paraguay.

3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 RESIDUOS SÓLIDOS

El decreto 7391 del 2017 del Paraguay, define a los residuos sólidos como “el material, producto o subproducto que sin ser considerado como peligroso, se descarte o deseche y que sea susceptible de ser aprovechado o requiera sujetarse a métodos de tratamiento o disposición final”.

La Asociación Brasilera de Normas Técnicas (ABNT), conforme a la NBR/10004, define residuos sólidos como: “Residuos en estado sólido o semisólido que resultan de actividades de origen industrial, doméstico, hospitalar, comercial, agrícola, de servicios y de barridos. Quedan incluidos en esta definición los lodos provenientes de sistemas de tratamiento de agua, aquellos generados en equipamientos e instalaciones de control de polución, bien como determinados líquidos cuyas particularidades tornen inviable o su lanzamiento en la red pública de efluentes o cuerpos de agua, o exijan para esto soluciones técnicas y económicamente inviables frente a la mejor tecnología disponible” (ABNT, 2004).

La Política Nacional de Residuos Sólidos (PNRS), según la Ley N° 12.305/10, define en su Art. 3, a los residuos sólidos como: “Material, sustancia, objeto o bien descartado resultante de actividades humanas en sociedad, a cuya destinación final se procede, se propone proceder o se está obligado a proceder, en el estado sólido o semisólido, bien como gases contenidos en recipientes y líquidos cuyas particularidades tornen inviable su lanzamiento en la red de alcantarillado o cuerpos de agua, o exijan para esto soluciones técnicas y económicamente inviables en tecnología disponible” (PNRS, 2010).

Conforme al Art. 13 de la PNRS (BRASIL, 2010), los residuos sólidos pueden ser clasificados en cuanto a su origen o en cuanto a su peligrosidad:

En cuanto a su origen:

- a) Residuos Domiciliares: los originarios de actividades domésticas en residencias urbanas;
- b) Residuos de Limpieza Urbana: originarios del barrido, limpieza de áreas públicas y vías públicas y otros servicios de limpieza urbana;
- c) Residuos Sólidos Urbanos: incluyen los ítems “a” y “b” anteriormente mencionados;
- d) Residuos de Establecimientos Comerciales y prestadores de servicio: los generados en esas actividades, exceptuando los referidos en los ítems “b”, “e”, “g”, “h” y “j”;

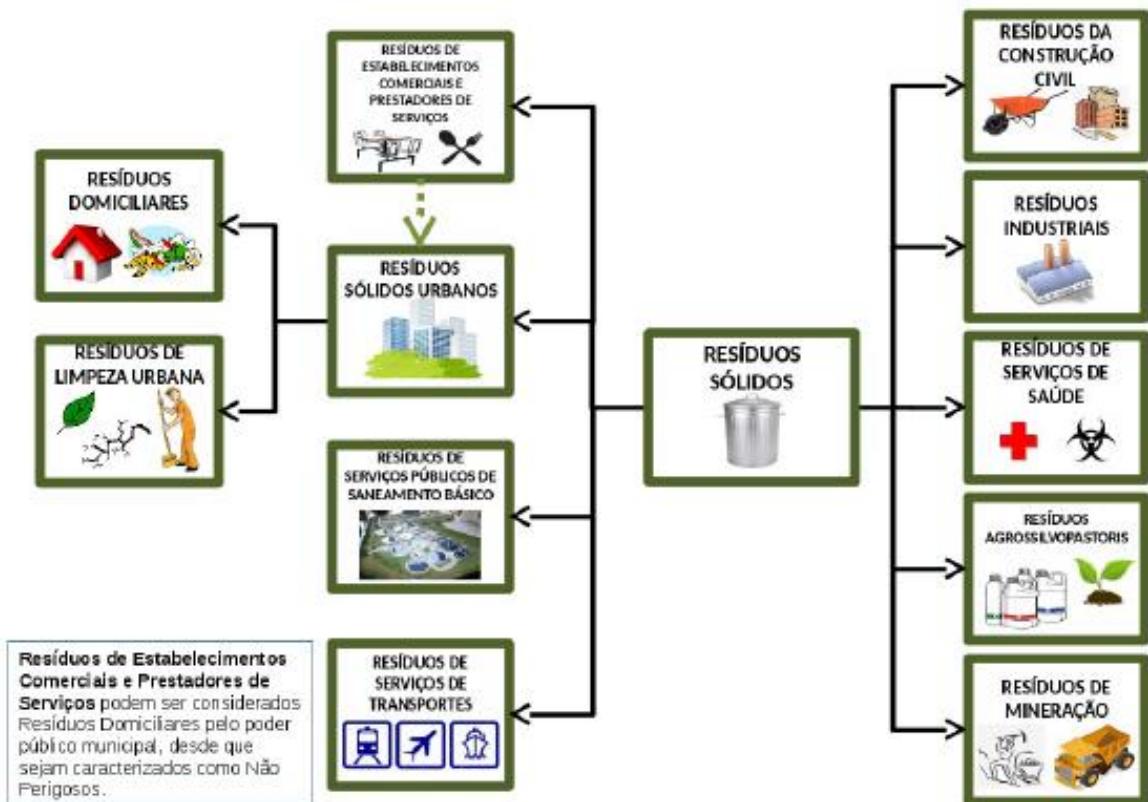
- e) Residuos de Servicios Públicos de Saneamiento Básico: los generados en esas actividades, exceptuando los referidos en el ítem “c”;
- f) Residuos Industriales: los generados en los procesos productivos e instalaciones industriales;
- g) Residuos de Servicio de Salud: los generados en los servicios de salud;
- h) Residuos de la Construcción Civil: los generados en las construcciones, reformas, reparaciones y demoliciones de obra de construcción civil, incluidos los resultantes de la preparación y excavación de terrenos para obras civiles;
- i) Residuos Agrosilvopastoriles: los generados en las actividades agropecuarias y silvícolas, incluidos los insumos utilizados en esas actividades;
- j) Residuos de Servicios de Transporte: los originarios en puertos, aeropuertos, terminales aduaneras, terminales de autobuses, estación de trenes y pasajes de frontera;
- k) Residuos de Mineración: los generados en la actividad de búsqueda, extracción o beneficio de mineros.

En cuanto a su peligrosidad:

- a) Residuos Peligrosos: aquellos que, en razón de sus características de inflamabilidad, corrosividad, reactividad, toxicidad, patogenicidad, carcinogenicidad, teratogenicidad y mutagenicidad, presentan riesgo significativo a la salud pública o a la calidad ambiental, de acuerdo con la ley, reglamento o norma técnica;
- b) Residuos No Peligrosos: aquellos que no encuadran en el ítem “a”.

Se puede observar en la Ilustración 1, la clasificación de los RS en cuanto a su origen y en cuanto a su peligrosidad.

Ilustración 1 – Clasificación de los Residuos Sólidos



Fuente: Clases de Gerenciamiento de Residuos (EESC – USP) Schalch (2019).

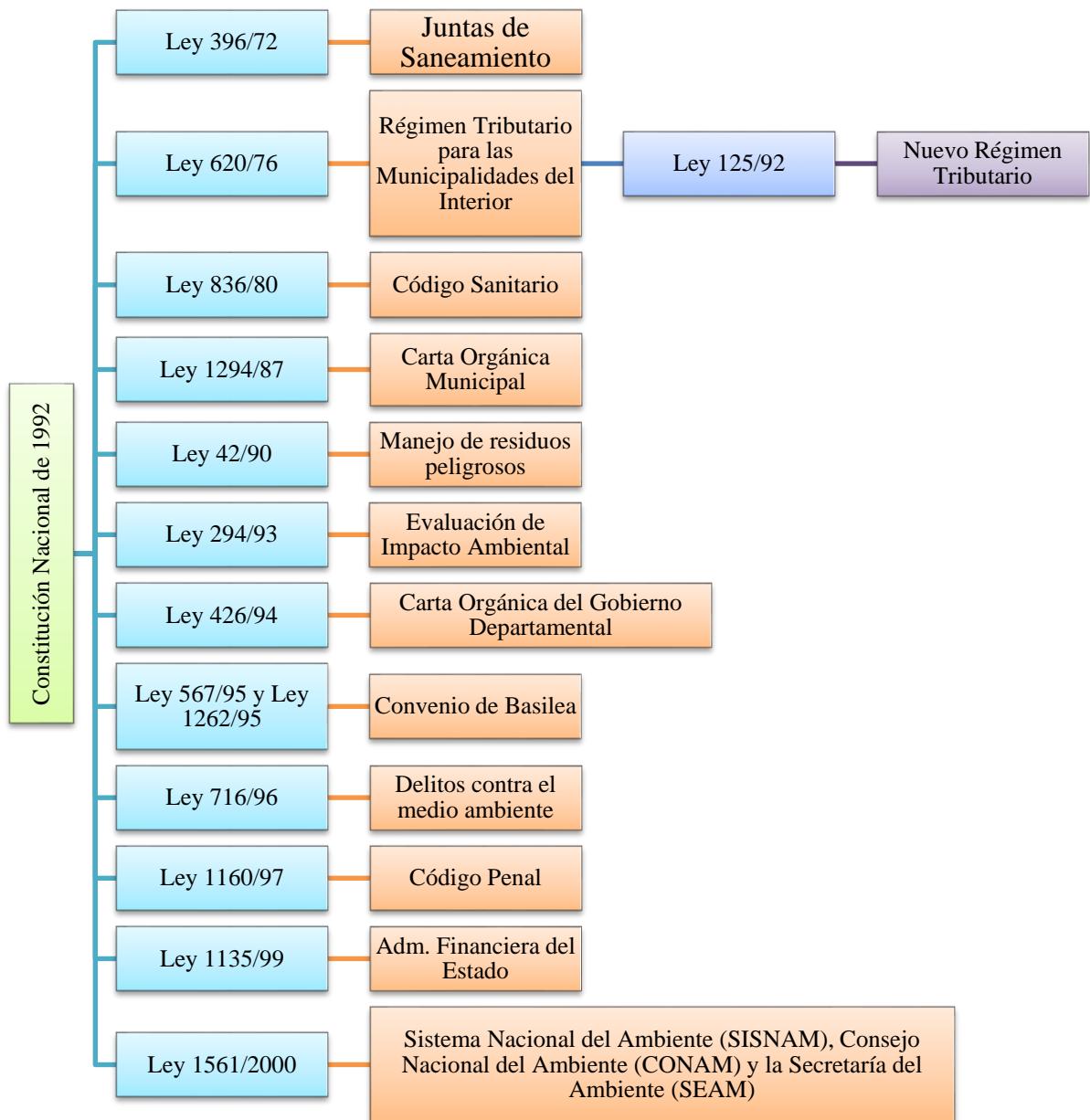
3.2 RESIDUOS SÓLIDOS (RS) EN PARAGUAY

3.2.1 Marco Legal y Regulatorio

Se citan los instrumentos legales y las reglamentaciones, relacionadas a las atribuciones y responsabilidades de las instituciones vinculadas a la gestión de los RS en Paraguay.

En la Ilustración 2 se destacan las leyes de la Constitución Nacional concernientes a la temática del ambiente, la salud y los RS.

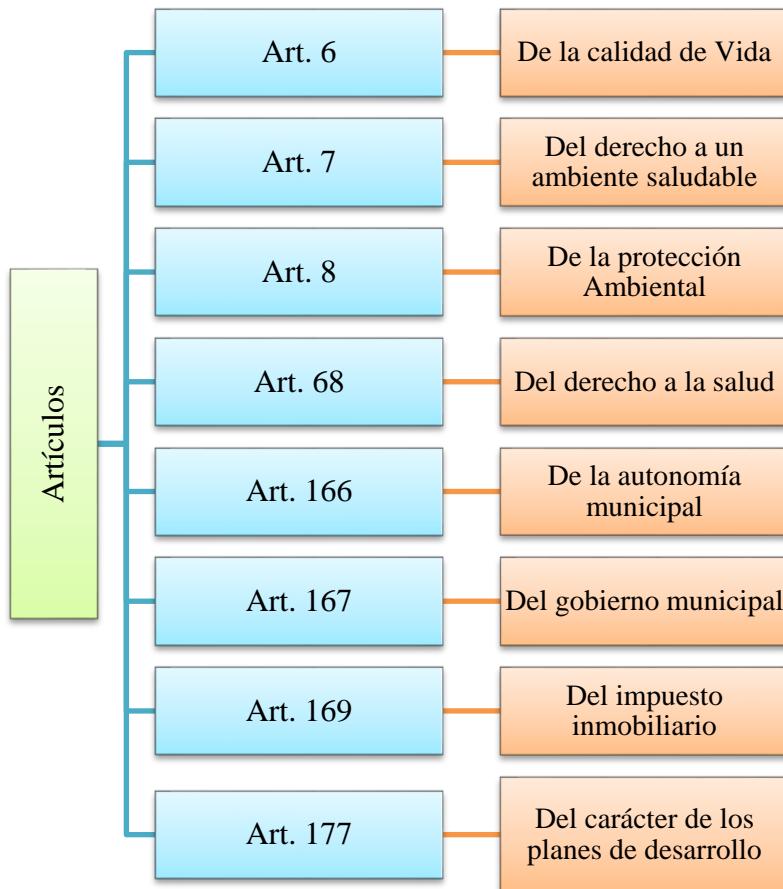
Ilustración 2 – Leyes relacionadas a la gestión de RS



Fuente: Elaborado por la autora

En la Ilustración 3 se exhiben los artículos de interés referentes a la temática del ambiente, de la salud y de los RS, de la Constitución Nacional de 1992.

Ilustración 3 – Artículos Relacionados a la gestión de RS



Fuente: Elaborado por la autora

3.2.2 Proceso Evolutivo del Sector de RS

El proceso evolutivo del sector en el Paraguay de acuerdo a la evaluación regional de los servicios de manejo de residuos sólidos municipales (2004), se encuentra listada a continuación:

1993:

- Creación del Departamento de Residuos Sólidos en el Servicio Nacional de Saneamiento Ambiental;
- Estudio de Residuos de Establecimientos de la Salud.

1993/94:

- Plan de Manejo de los Residuos Sólidos – Área Metropolitana de Asunción (AMA).

1994/96:

- Servicio Nacional de Saneamiento Ambiental: Planes de manejo de RS en Varias Ciudades.

1995:

- Cobertura de los Servicios de Residuos Sólidos Urbanos (RSU):
 - Total de la población urbana del país con recolección: inferior al 25%;
 - Rellenos sanitarios: Ciudad del Este (mecanizado) y Carapeguá (manual), demás municipios vertederos a cielo abierto.
- Aprobación Convenio de Basilea (movimientos transfronterizos de RP), por ley N° 567/95;
- Desarrollo de reglamentaciones nacionales (no aplicadas).

1996:

- Reglamentación S. G. N° 548/96: Normas Técnicas que Reglamentan el Manejo de Desechos Sólidos (sin impacto hasta el año 2000);
- Actividades de la Agencia Internacional de Desarrollo de los Estados Unidos de Norte América (USAID), de la Agencia Española para la Cooperación Internacional (AECT), del Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento – Banco Mundial (BIRF), del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), del World Wildlife Fund (WWF), de la Fundación Friedrich Ebert y otros.

1998:

- Cobertura de los Servicios de RSU:
 - Total de la Población Urbana del País con Recolección: 40%; Asunción: 90%;
 - La Administración del Servicio de Recolección en el País: 44% Sector Privado;
 - Cobertura de la Disposición final de las Basuras: el 68% son vertederos a cielo abierto sin ningún tipo de control y el restante en un nivel muy bajo de lo que se podría llamar vertederos controlados;
 - Generación en el país: 1.1 kg/ha/día.

1999:

- Donación de Japón a la Asociación de Municipalidades del Área Metropolitana (AMAM);
- Servicio Nacional de Saneamiento Ambiental: Plan para los residuos hospitalarios del área metropolitana de Ciudad del Este; Plan para los residuos hospitalarios del departamento de Itapúa.

2000:

- Varias Municipalidades Elaboran Planes Decenales de Manejo de RS.

2001:

- Secretaría Técnica de Planificación (STP), Organización Panamericana de la Salud: Análisis Sectorial de RS del Paraguay;
- Cobertura de los Servicios de RSU:
 - Total de la población urbana del país con recolección: 46%, interior 35% y Asunción 92%;
 - La administración del servicio de recolección en el país: 37% sector privado;
 - Cobertura de la disposición final de RSU: 80% en vertederos a cielo abierto sin ningún tipo de control y el restante en vertederos controlados;
 - Generación promedio de RSU: 1.038 kg/ha/día.

2001/03:

- USAID ha financiado algunos estudios y la implementación de proyectos de pequeños rellenos sanitarios manuales, en varias ciudades del país, además de algunos proyectos de rellenos mecanizados;
- Basado en un acuerdo y con la cooperación financiera de la Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) de Alemania se desarrolló el Plan Maestro para la Gestión de Residuos Sólidos Urbanos en la Región Oriental del Paraguay, a través del Consorcio FICHTNER-CONTECSA, realizándose conjuntamente un Estudio de Factibilidad para la Gestión Regional de Residuos Sólidos en las ciudades de Coronel Oviedo, Caaguazú y Villarrica.

2003:

- Cobertura de los Servicios de RSU:
 - Total de la población urbana del país con recolección: 56,7%, interior 48% y Asunción 98,5%;
 - La administración del servicio de recolección en el país: 30% sector privado.
 - Cobertura de la disposición final de RSU: 70,9% en vertederos a cielo abierto, vertederos controlados 24,2% y rellenos sanitarios manuales 4,9%;
 - Generación promedio de RSU: 1.088 kg/ha/día.

3.2.3 Estructura Institucional de los Servicios de RS en Paraguay

En el informe presentado por Atet (2019), se deja en evidencia la falta de una estructura organizacional formal; la responsabilidad de todo el sistema de gestión recae en la actualidad en el ámbito municipal, que generalmente, sólo se preocupan por elaborar los correspondientes presupuestos anuales de costos de la prestación del servicio a su cargo. Si bien, a nivel nacional se cuenta con el departamento de RS, dependiente de la Dirección de Calidad Ambiental y Conservación de los Recursos Naturales del MADES, ésta aún se encuentra en proceso de consolidación y organización.

En el Cuadro 1 se observa la estructura institucional de los servicios de RS en el Paraguay.

Cuadro 1 - Estructura Institucional de los servicios de RS

AUTORIDAD	DESCRIPCIÓN
Ministerio del Ambiente (MADES)	Formula, coordina y fiscaliza la política ambiental nacional, definida por el Consejo Nacional del Ambiente (CONAM).
Ministerio de Salud Pública y Bienestar Social (MSPyBS)	Realiza algunos servicios de recolección y eliminación de residuos hospitalarios. Se constituye también en autoridad de aplicación en los casos en que la salud humana puede verse afectada por el manejo inadecuado de los residuos sólidos.
Secretaría Técnica de Planificación (STP)	Formula políticas públicas y estrategias nacionales, como el apoyo al proceso de descentralización y otras, con vista a un desarrollo sostenible del país.
Gobernaciones	Coordina las actividades cuando existen intenciones de algunas municipalidades de realizar trabajos en conjunto en el área de residuos sólidos a nivel departamental. Las unidades ambientales correspondientes poseen carácter más bien de asesores y de coordinación intermunicipal.
Municipalidades	Son las responsables de la gestión de RS por tratarse de un servicio público local y por mandato de la Carta Orgánica Municipal y del Código Sanitario.

Fuente: Adaptado evaluación regional servicios de manejo de RSM (2004).

3.2.4 Gerenciamiento de los RS en Paraguay

Se identifica un alto potencial de aprovechamiento de RS. Por tal motivo, es necesaria la implementación de mecanismos de separación en origen, en función al tipo de residuo, la recolección diferenciada, aprovechamiento y tratamiento de los mismos (ATET, 2019).

La recolección selectiva consiste en la separación o segregación en origen, constituye la base fundamental para una recolección diferenciada efectiva. Trae consigo diversos beneficios, como ser la mejora sustancial de la labor del reciclador, permite a los residuos alcanzar un mayor valor comercial, además de posibilitar una responsabilidad compartida entre el consumidor, productor y gestor (GNEITING et al., 2017).

En la ley 3956/09, en su artículo 4, se cita “Los RS se clasificarán según su origen y composición, de acuerdo con los criterios técnicos establecidos en la presente ley y su reglamentación”. Se indica a la SEAM como la institución con la autoridad pertinente de aplicación de la ley, la cual en la actualidad fue reemplazada por el Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADES).

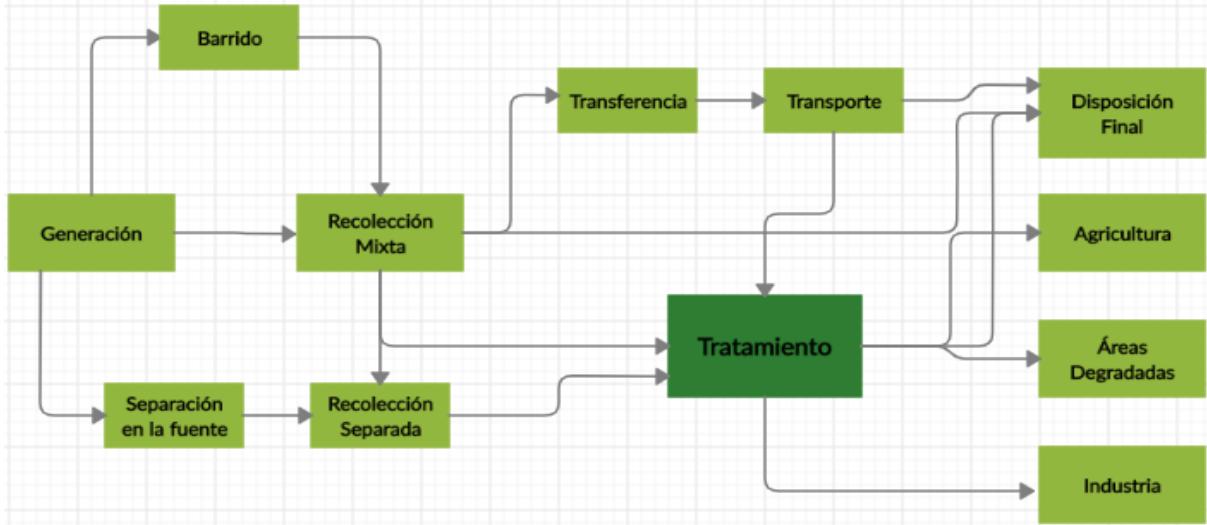
Según la ordenanza 408/14 en su capítulo VII, es responsabilidad del generador de RSU la separación de los mismos en materiales orgánicos e inorgánicos para su posterior recolección diferenciada.

Además, cabe resaltar, la resolución 304/19 por la cual se establece la metodología para la realización de estudios de caracterización de los RSU, considerando que el MADES en el marco del proyecto “Asunción, Ciudad Verde de las Américas – Vías a la Sustentabilidad” busca promover la correcta gestión de los residuos y la conciencia acerca de éstos, y es el ministerio encargado de elaborar el Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PNGIRS), y que en el Plan Municipal de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PMGIRS) se contempla el compromiso de realizar la caracterización de los RS.

Por lo tanto, se podría decir que, con una buena gestión y aplicación rigurosa de los reglamentos, además de la conciencia y responsabilidad ciudadana, se llegaría al gerenciamiento absolutamente necesario de los RS.

La Ilustración 4 presenta cómo sería el manejo ideal de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU).

Ilustración 4 - Flujoograma del manejo de RSU

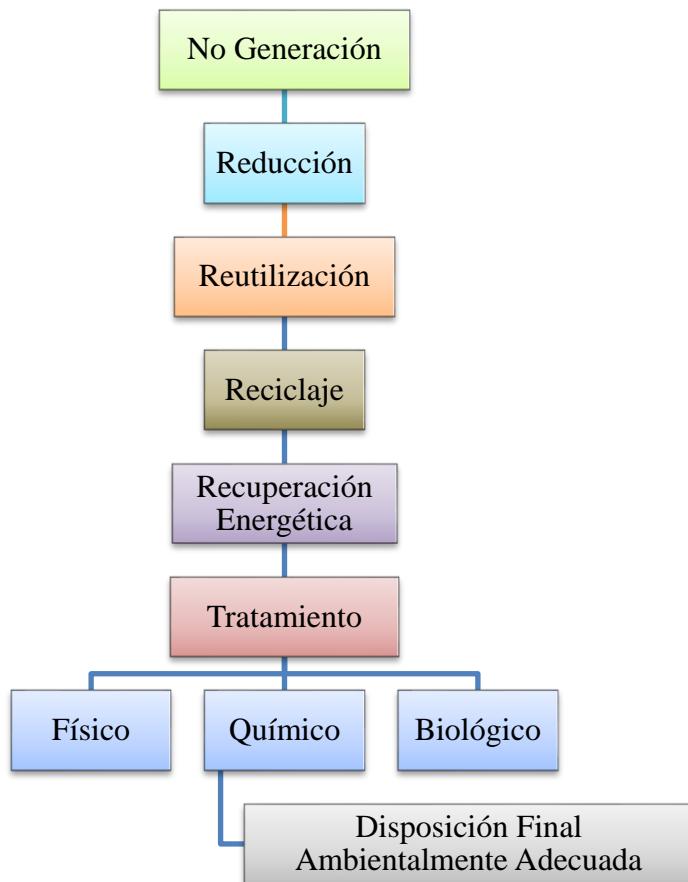


Fuente: Adaptado Salinas, Córdova, Vázquez (2006).

Con el fin de realizar una gestión inteligente de los residuos existen los criterios de jerarquía que rigen la gestión de los mismos, para promover la reducción, reutilización, reciclado, valorización y finalmente la eliminación de los residuos.

En caso de no poder evitar la generación de los residuos, se plantea la reducción de la cantidad de residuos generados, o bien, la reducción de los contaminantes presentes en ellos. La reutilización consiste en el empleo de un producto usado para el mismo fin para el cual fue diseñado originalmente y posteriormente el reciclado implica la transformación de los residuos, dentro de un proceso de producción, para su fin inicial u otros fines, lo que permite recuperar el material mediante distintos posibles tipos de tratamiento, como ser entre ellos el proceso del compostaje. Y finalmente la disposición ambientalmente adecuada de aquellos residuos que no pudieron ser reciclados. En la Ilustración 5 se puede observar el esquema de gestión propuesto por Schalch (2019).

Ilustración 5 – Jerarquía Estratégica de Gestión de RS



Fuente: Adaptado Schalch (2019).

3.2.5 Estado General de los RS en Paraguay

Conforme a la evaluación regional de los servicios de manejo de residuos sólidos municipales (RSM) (2002) el manejo de los RS en Paraguay es precario. La insuficiente planificación, la des uniforme distribución de la población, la desordenada ocupación de los territorios, el acelerado crecimiento de las poblaciones urbanas, especialmente en zonas marginales, son problemas que afectan al sector.

Lo anteriormente mencionado ha ocasionado que las condiciones urbanas en el país se deterioren, con problemas tanto de recolección como disposición final de los RS.

La ausencia de una coordinación efectiva en la formulación de planes, programas y proyectos de nivel nacional, departamental y municipal, con la debida armonización y compatibilización entre ellos, es una de las causas de la persistencia de problemas organizacionales, técnicos y operativos para resolver sanitaria y ambientalmente la problemática de los residuos (ATET, 2019). La Ilustración 6 exhibe la situación de los RS en Asunción.

Ilustración 6 - Situación de los RS en Asunción



Fuente: Diario ABC Color (2018).

3.2.6 Generación y Composición de los RSU en Paraguay

Las particularidades del país, así como sus circunstancias socioeconómicas, se reflejan en la cantidad y composición de los residuos producidos, se observa que a medida que se reduce el tamaño de la población y predominan las actividades propias de áreas rurales, aumenta la fracción orgánica de los residuos. Se establece la tasa promedio de generación de RSU en 1,18 kg/persona/día, de acuerdo a la proyección geométrica del año 2012 del Inventario de GEI.

Se estima que actualmente se genera alrededor de 7200 ton/día en las poblaciones urbanas de los municipios del Paraguay (ATET, 2019). Para el año 2035, se espera una producción de RS de 1.300.000 ton/año (AMA SOSTENIBLE, 2014).

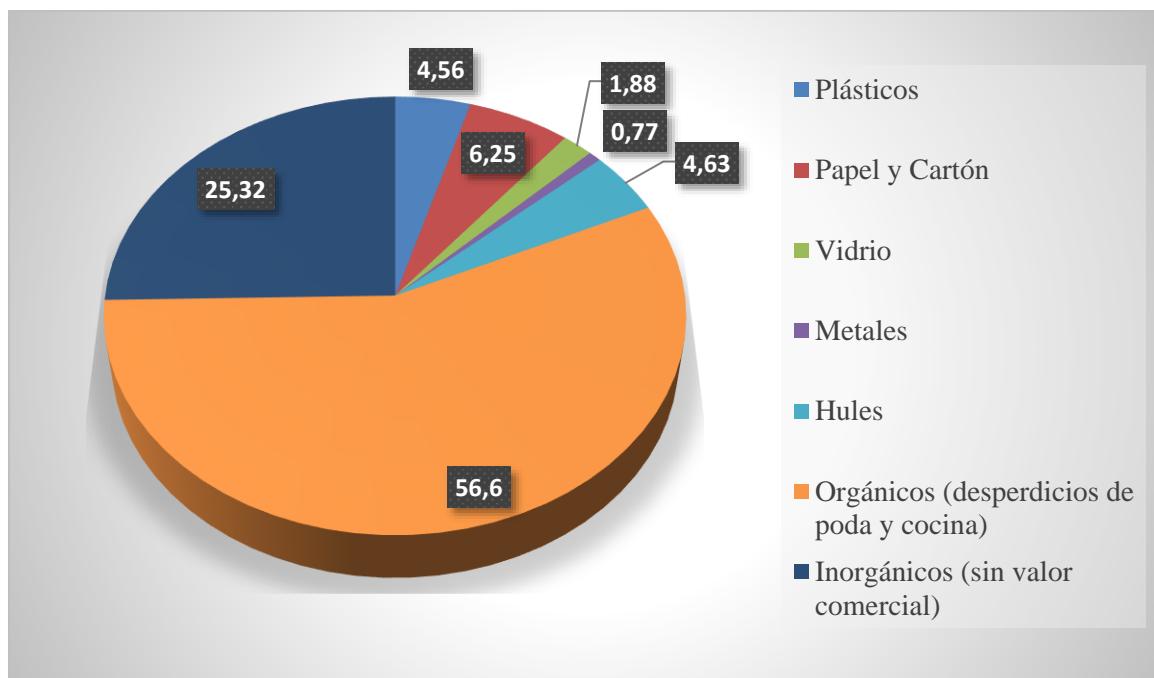
En la caracterización de los residuos la composición de los mismos corresponde a 37,4% de desperdicios de cocina, 26,8% otros y 19% desperdicios de jardín conforme al estudio de gestión de RS del Área Metropolitana de Asunción (AMA) (ATET, 2019).

El 61,1% de los residuos del Paraguay corresponden a residuos de origen orgánico, según la SEAM (2016).

En el Diagnóstico del Plan Maestro de Gestión Integral de RSU para el Área Metropolitana de Asunción (2013) se pueden observar las variaciones en la distribución porcentual de constituyentes que llegan al relleno sanitario de Cateura, siendo los de mayor composición los residuos orgánicos.

Se puede observar en la Ilustración 7 la composición de los RSU en valores porcentuales en el vertedero Cateura.

Ilustración 7 - Composición de RSU (porcentaje) en Vertedero Cateura.



Fuente: Plan maestro de gestión integral de residuos sólidos urbanos para el Área Metropolitana de Asunción (2013).

De los RSU generados en los municipios, sólo el 69% del total es recolectado. Se estima que un total de 3573 ton al día son recolectados en el ámbito urbano, con una frecuencia variable de recolección; el servicio diario atiende al 15% de las ciudades, particularmente en los mercados, ferias y el microcentro. Cabe resaltar que ningún municipio cuenta con un sistema de recolección selectiva, a pesar de que existan programas de reciclaje en ciertas ciudades (ATET, 2019).

Las personas que no cuentan con recolección regular recurren a la quema como la principal forma de deshacerse de los residuos, además es común el vertido de los mismos en cursos de agua, baldíos, etc., lo que ocasiona la obstrucción de canales y drenajes pluviales, agravando las inundaciones y contribuyendo a la contaminación hídrica (AMA SOSTENIBLE, 2014).

3.2.7 Plan Nacional de Mitigación ante el Cambio Climático (Paraguay)

El manejo de residuos es un tópico de la línea estratégica operativa del Plan Nacional de Mitigación ante el Cambio Climático y los Programas de Acción (2017) donde una de las estrategias propone como medida disminuir el volumen de residuos sólidos enviados a rellenos sanitarios, mediante la fomentación de la prevención en la generación de residuos, el reciclado y la minimización de desechos, el compostado de desechos orgánicos, campañas de educación y concienciación, además de aplicar incentivos que motiven el reciclado a nivel de municipios.

El programa referente a la gestión de residuos propone como ejes la aplicación de la logística reversa y la entrega y gestión de los residuos, apunta a la reducción en origen, así como a la reutilización de productos considerados desechos.

3.2.8 Impacto de los Servicios de Manejo de RS Sobre la Salud y el Ambiente

Los RS en sus diferentes fases de manejo (generación y almacenamiento, disposición, recolección y transporte, segregación, tratamiento y disposición final) conllevan a numerosos riesgos ambientales a la salud, como ser la contaminación del aire y del agua, enfermedades infecto contagiosas, parasitarias, alérgicas, entre otras.

De acuerdo a la evaluación regional de los servicios de manejo de residuos sólidos municipales (STP, 2004) en el Paraguay, la selección y clasificación de los RS no constituyen un hábito frecuente. La reutilización y reaprovechamiento de los residuos es mínimo. Los residuos orgánicos son en general los más reutilizados en jardines o como alimento de animales domésticos.

Dicha evaluación deja en evidencia que la mala calidad ambiental está ligada con la sustentabilidad y la justicia social, y el sector de la población más afectado es el rural y los más pobres que viven en las zonas periféricas, donde los servicios sanitarios son inadecuados y la exposición a la contaminación es mayor.

Las poblaciones menos favorecidas se ven expuestas a las afecciones propias de la modernización, con la contaminación de los ambientes comunitarios y laborales, a causa de un modelo de desarrollo que no considera la salud y el ambiente, con un patrón de consumo insostenible de los recursos naturales (STP, 2004).

Los llamados gancheros, son los trabajadores informales, encargados principalmente de la segregación de residuos, en general éstos trabajadores no forman parte de las empresas encargadas del aseo urbano, y son producto de las condiciones socioeconómicas del país. Éstos trabajadores viven y trabajan en condiciones degradantes, deben hacer frente al rechazo de la

sociedad, la cual no les ofrece otra alternativa para sobrevivir, de acuerdo a la evaluación regional (STP, 2004).

Conforme a la misma, la información que los trabajadores poseen sobre los riesgos inherentes a sus actividades laborales es insuficiente. Las afecciones comúnmente más observadas son infecciones respiratorias altas, así como parasitos y anemias en los niños y acompañantes. La Ilustración 8 muestra a los catadores de residuos en Cateura.

Ilustración 8 – Gancheros del vertedero de Cateura



Fuente: Diario La Nación (2019).

3.2.9 Disposición Final de los RSU en Paraguay

Los indicadores de cobertura de recolección y disposición final presentan valores bajos, históricos, lo que es un indicador del bajo nivel de atención al tema a lo largo de los años, situación que se encuentra relacionada a la estructura institucional y legal de responsabilidad en el manejo de los RS en Paraguay, según el plan de acción ICES Asunción (2014).

El escenario es crítico respecto a la disposición final adecuada de los RSU, ya que el 92% de los RS son dispuestos en vertederos a cielo abierto, el 6% en vertederos a cielo abierto con lixiviados teóricamente controlados y el 2% en rellenos sanitarios, de acuerdo a los datos del Inventario Nacional de GEI (2012).

Se observa que el porcentaje que es vertido en rellenos sanitarios es nulo, ya que no se cuenta con este tipo de infraestructura. Los dos principales vertederos metropolitanos donde se dispone aproximadamente el 50% de los RS generados en el Área Metropolitana de Asunción

(AMA) no cumplen con las especificaciones mínimas de un relleno sanitario (no se cuenta con sistema de tratamiento y recolección de lixiviado y gas residual).

El vertedero municipal Cateura, encargado de recibir principalmente residuos de Asunción, tiene una vida útil estimada hasta el 2020 de acuerdo al Plan Maestro de RSU del AMA (2014). El vertedero de la empresa El Farol, que recibe los residuos de las demás ciudades del AMA, tiene otros 15 años de vida útil. Existen en el AMA al menos 20 vertederos clandestinos a cielo abierto. El área total aproximada de contaminación de suelos y agua de estos vertederos es de más de 10 ha (PLAN DE ACCIÓN ICES – ASUNCIÓN, 2014).

Los procesos de separación de materiales comercializables para reciclado que realizan los trabajadores informales en los vertederos son precarios. El AMA no tiene implementados aún programas de reducción o separación en origen de los RSU, a excepción de algunos del tipo experimental, con escaso impacto frente a los volúmenes de generación.

Los residuos ingresan a la corriente de transporte y disposición mezclados y contaminados, debido a la falta de programas de recolección selectiva, lo que limita un efectivo proceso de separación posterior (Diagnóstico para el Plan Maestro de Gestión Integral de RSU).

Las Ilustraciones 9 y 10 exhiben los residuos de Cateura, y la Ilustración 11 muestra el Vertedero El Farol.

Ilustración 9 – Fotografía aérea del vertedero Cateura



Fuente: Diario Última Hora (2018).

Ilustración 10 – Vertedero Cateura



Fuente: Diario Última Hora (2018).

Ilustración 11 – Vertedero El Farol



Fuente: Diario Digital Camisa 12 (2019) .

3.2.10 Centro de Reciclaje y Compostaje en la Ciudad de Luque

En el año 2015 la Municipalidad de Luque y la Unión Europea en Paraguay inauguraron un Centro de Compostaje y un Centro de Reciclaje en la Municipalidad de Luque (AMA). Los centros formaron parte del proyecto "Sistema de Reciclaje de Residuos Sólidos Urbanos para una ciudad de Luque más saludable".

De acuerdo a los datos obtenidos en la página web de la unión europea en Paraguay, el Centro de Reciclado de Maka'i funciona con una cooperativa de 50 recicladores, que cuenta con carritos diseñados para recoger y separar los residuos sólidos urbanos en la Ciudad de Luque. El Centro de Compostaje en Taramandy, instalado en cooperación con el Colegio Técnico Agrícola "Don Fabián Cáceres", permite la integración del compostaje en la educación de los alumnos y contribuye a la auto-sostenibilidad del centro.

También se menciona que al inicio de ambos proyectos la expectativa era de reciclar 100 toneladas de papel al mes, evitando la tala de 1400 árboles, y recuperar materiales sólidos por un valor de 100 millones de guaraníes mensualmente. De ese modo, los ciudadanos de Luque se benefician de un ambiente más limpio y saludable.

El compost es obtenido a partir de los restos de poda y residuos orgánicos provenientes de la basura orgánica del Mercado Municipal de la ciudad de Luque. La Ilustración 12 exhibe la planta de compostaje de Tamarandy. La Ilustración 13 muestra las pilas de compostaje en Tamarandy.

Ilustración 12 – Planta de Compostaje Tamarandy



Fuente: Municipalidad de Luque (2017).

Ilustración 13 – Pilas de Compostaje en Tamarandy



Fuente: Municipalidad de Luque (2017).

3.3 COMPOSTAJE

En 1920, se dio origen al proceso del compostaje como un proceso científico, cuando el inglés, Albert Howvard, en un estudio realizado en la India, comenzó a definir procedimientos en el estudio de la fermentación de los RS (FONSECA, 2001).

En la antigüedad el proceso del compostaje fue muy utilizado por los orientales, que hacían uso intensivo de los compuestos orgánicos para la producción de cereales. Las metodologías utilizadas eran artesanales y se basaban en la utilización de hileras o montañas de residuos ocasionalmente revueltos. Posterior al proceso de fermentación el compost obtenido era incorporado al suelo, lo que favorecía el crecimiento de los vegetales (LIMA, 2004).

De acuerdo con Fernandes y Silva (2000) el compostaje puede definirse como una biooxidación aeróbica exotérmica de un sustrato orgánico heterogéneo, en el estado sólido, caracterizado por la producción de CO₂, agua, liberación de sustancias minerales y formación de materia orgánica estable.

El compostaje es un proceso aeróbico controlado, desenvuelto por una colonia mixta de microrganismos, realizado en dos fases diferentes. En la primera ocurren las reacciones bioquímicas de oxidación más intensas predominantemente termofílicas; en la segunda, la fase de maduración, cuando ocurre el proceso de humificación (PEREIRA NETO, 1990).

Según Lima (2004) el compostaje es definido como el acto o la acción de convertir los residuos orgánicos, a través de procesos químicos, biológicos y físicos, en una materia biogénica más estable, resistente a la acción de especies consumidoras.

Haug (1993) define al compostaje como la descomposición biológica y la estabilización de sustratos orgánicos, en condiciones que permitan el desarrollo de temperaturas termofílicas como resultado del calor producido biológicamente, para producir un producto final estable, libre de patógenos y semillas, y que pueda aplicarse de manera beneficiosa a la tierra.

Menciona además que los objetivos del compostaje han sido tradicionalmente convertir biológicamente compuestos orgánicos putrescibles en una forma estabilizada y destruir organismos patógenos para los seres humanos.

Conforme a Fonseca (2001), el compostaje es también reciclar, debido a que la materia orgánica es reciclada en humus, para posteriores usos, con el fin de atenuar problemas sanitarios, evitar la polución y contaminación ambiental, permitir el reaprovechamiento de productos existentes en los residuos, además de contribuir para la protección y preservación de los recursos naturales.

El vocablo inglés “compost” dio origen a la palabra compuesto, que es el resultado del proceso controlado de composición bioquímica de materiales orgánicos transformado en un producto más estable, y los términos compostaje y compostar, para indicar la acción o el acto de preparar el mismo. Personas que trabajan o comercializan el compuesto emplean la denominación “compuesto orgánico”, la expresión, aunque redundante, ya fue popularizada (KIEHL, 1985).

El mismo autor indica por lo tanto que, el compostaje es una técnica idealizada para obtener prontamente y en mejores condiciones la estabilización de la materia orgánica

El compostaje es una alternativa viable para la destinación ambientalmente adecuada del material orgánico, ya que éstos son degradados por los microrganismos presentes en el mismo residuo y en el ambiente (BIANCO; GUERMANDI; SIMÕES, 2019).

3.3.1 Materia Prima

Desechos de animales, vegetales y restos de alimentos, pueden ser utilizados como materia prima para la elaboración del compostaje. La recolección separada de los residuos orgánicos permite obtener un compost que cumple con los requisitos de calidad y exigencias ambientales (FERNÁNDEZ, 2010).

La granulometría o dimensión de las partículas de residuos es una de las características más importantes a ser consideradas, se debe preparar la materia prima de manera a que su granulometría quede distribuida dentro de las dimensiones recomendables (1 a 5 cm). La granulometría puede ser corregida, ya sea picando las partículas más groseras de forma a reducir su dimensión, o inversamente, mezclar las partículas finas con bambú picado u otros materiales similares que torne la pila voluminosa y porosa (KIEHL, 1985).

El autor indica además que es necesario tener en cuenta, la correcta separación de los materiales inertes (plásticos, vidrios, papeles y metales) de la materia orgánica, dicha separación puede realizarse a través de la densidad de los materiales.

Se debe controlar la humedad de los residuos (exceso de agua), para lograr una relación balanceada Carbono – Nitrógeno (C/N) y tener una textura y tamaño adecuados). La humedad puede ser controlada mediante la adición de aserrín o virutas de madera, en proporciones variables, 2 o 3 partes en volumen de alimentos por 1 parte de aserrín o viruta. La relación C/N recomendada del material de entrada oscila entre 25 y 30 de C, por 1 de N, la misma puede ser ajustada con residuos ricos en N, como son la esquinaza o gallinaza. (SEPÚLVEDA; ALVARADO; 2013).

Los Cuadros 2 y 3 exhiben respectivamente los RS compostables y no compostables.

Cuadro 2 - RS Compostables (ricos en Nitrógeno y ricos en Carbono)

RICOS EN NITRÓGENO	RICOS EN CARBONO
Restos en jardín todavía verdes (hojas, flores)	Hojas secas
Restos de vegetales (frutas, verduras, legumbres)	Hierba seca y recortes de hierba
Estiércol de bovinos, cerdos, cabras	Plantas muertas secas
Orina	Paja
Suelo	Hierbas secas
Café molido	Heno
Saquitos de té	Madera
Cáscaras e huevo	Astillas de madera
Pan	Papel
Pastas y arroz cocido	Cenizas de quema de madera
Cereales	Servilletas

Fuente: Adaptado de Expedição Vida (2014).

Cuadro 3 - Residuos Sólidos No Compostables

NO COMPOSTABLES
Carne, pescados, mariscos, frutos de mar
Lácteos, aceite y grasas
Excremento de animales domésticos
Residuos de jardín tratados con pesticidas
Maderas tratadas con pesticidas o venenos
Productos que contengan cualquier tipo de plastificación
Cenizas de carbón
Tejidos
Tintas
Vidrio, plástico, metal
Medicamentos, productos químicos
Pilas y baterías

Fuente: Adaptado de Expedição Vida (2014).

3.4 FASES DEL COMPOSTAJE

El proceso del compostaje es constituido por dos fases: tratamiento físico y biológico.

En el tratamiento físico se preparan los residuos, favoreciendo la acción biológica, el residuo sufre un proceso de clasificación manual y/o mecánica donde los componentes no biodegradables son separados de la masa (LIMA, 2004). Dicho autor menciona, que el tratamiento biológico consiste en la fermentación de los residuos por la acción de los microrganismos presentes o inoculados por la adición de lodo de efluentes.

Luego de la fase activa es preciso un periodo de al menos 30 días para que el proceso finalice y el compost desarrolle las características deseadas para sus posteriores aplicaciones. Generalmente, este periodo de maduración se lleva a cabo en una zona diferente al sitio donde se ha realizado la fase activa del compostaje, sin embargo, la maduración se puede realizar en el mismo sitio y en la misma pila donde ha tenido lugar la fase activa (NEGRO et al., 2000).

El proceso del compostaje es considerado finalizado cuando el producto final puede ser almacenado sin dar origen a inconvenientes tales como malos olores y atracción de vectores, y cuando ocurre la reducción de los organismos patogénicos a un nivel tal que el compost pueda ser manipulado con riesgo mínimo (SHAMMAS; WANG, 2007).

3.5 CLASIFICACIÓN DEL COMPOSTAJE

Todo proceso biológico se clasifica por la presencia o ausencia de oxígeno. El compostaje puede ser clasificado en un proceso aeróbico, anaeróbico o mixto.

3.5.1 Proceso Aeróbico

En el proceso aeróbico la materia orgánica es oxidada con la presencia de oxígeno molecular. El proceso es químico y proporciona energía vital para gran parte de los microrganismos que participan de la descomposición (FONSECA, 2001).

Puede ser dividido en dos fases, tal cual lo establece Monteiro et al. (2001), la primera denominada bioestabilización, donde la temperatura de la masa orgánica es reducida, que luego de alcanzar temperaturas de hasta 65°C, a la temperatura ambiente se estabiliza, la duración de esta fase es de 45 días en sistemas acelerados y 60 días en sistemas de compostaje natural. La fase de maduración, donde acontece la humificación y la mineralización de la materia orgánica, tiene una duración mayor a 30 días. El autor mencionado además establece que en este tipo de proceso se tiene como producto final un compost, rico en humus y nutrientes minerales.

3.5.1.1 Fases de Digestión Aeróbica

3.5.1.1.1 Proceso Mesofílico

Al inicio del proceso, los residuos preparados, están a temperatura ambiente (menor a 40°C), por lo cual los microrganismos llamados mesófilos se multiplican rápidamente, generando una gran actividad metabólica, la temperatura va elevándose y se producen ácidos orgánicos que disminuyen el pH (SEPÚLVEDA; ALVARADO, 2013).

Se caracteriza por la presencia de bacterias y hongos, quienes son las responsables por iniciar el proceso, debido a que se multiplican y consumen los carbohidratos más fácilmente degradables, aumentando la temperatura a valores entre 40°C a 55°C. En función a la población de microrganismos, la temperatura va variando; mientras mayor sea el número poblacional, la temperatura será más elevada. En este proceso ocurre la transformación de la materia orgánica en ácidos orgánicos y una reducción del pH del medio. Tiene una duración aproximada de 15 días con el aumento significativo de los microrganismos mesófilos (FONSECA, 2001; LIMA, 2004).

3.5.1.1.2 Proceso Termofílico

En la primera fase la temperatura aumenta entre 45°C a 60°C, y el pH entre 4,5 a 6,5, desaparecen los organismos mesófilos e inician la degradación los organismos termófilos, esta etapa tiene una duración de 3 a 6 días (ROMÁN, MARTÍNEZ; PANTOJA, 2013; CAMACHO, 2013). Los mismos autores establecen que en la segunda etapa la temperatura aumenta, alcanzando valores entre 65°C a 75°C, reduciendo las condiciones de sobrevivencia de formas vegetativas patogénicas, se destruyen algunas especies de hongos, se degradan ceras, proteínas y hemicelulosas, además se desarrollan numerosas bacterias formadoras de esporas y actinomicetos.

Es importante destacar que, a pesar de las elevadas temperaturas, algunas especies de microrganismos patogénicos no son eliminados, por lo tanto, no necesariamente se reduce la posibilidad de contaminación por bacterias patogénicas. (FONSECA, 2001; LIMA, 2004). Así, es necesario evaluar la presencia de los patógenos en las compostas que serán aplicadas al suelo.

Kiehl (2004)¹ advierte sobre las temperaturas superiores a 70°C por un largo período de tiempo “son desaconsejables porque restringen la acción de los microrganismos más sensibles, insolubilizar proteínas hidrosolubles, provocar alteraciones químicas indeseables y desprendimiento de amoniaco, si el material posee baja relación carbono/nitrógeno (C/N)” (apud MASSUKADO, 2008, p. 9).

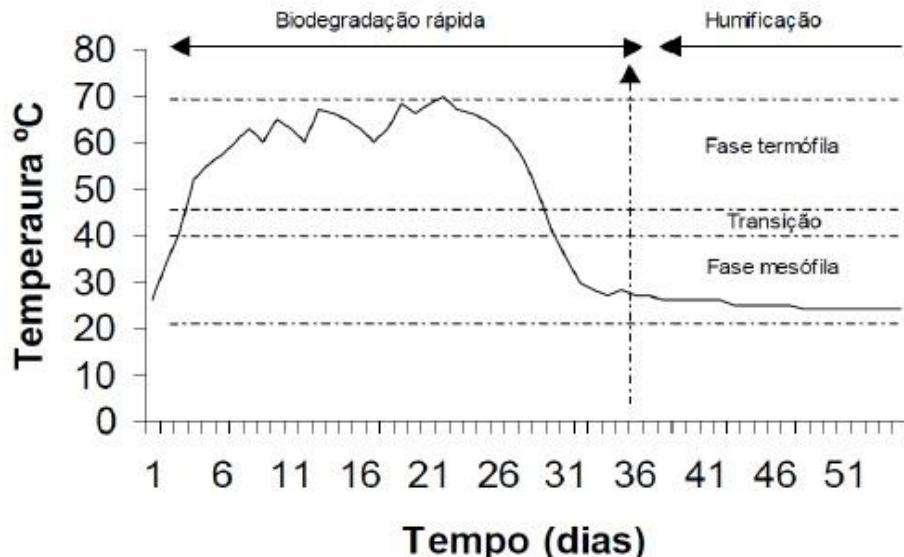
3.5.1.1.3 Maduración

La fase de cura del compost, donde hay continuidad de la degradación de la materia orgánica, se produce con la formación de ácidos húmicos, ocurre a temperatura ambiente y se desenvuelve de 30 a 60 días (BIDONE; POVINELLI, 1999).

La Ilustración 14 exhibe el patrón de temperatura durante el proceso del compostaje, o fases del mismo, de acuerdo con Fernandes; Silva (2000).

¹ KIEHL, E. J. Manual de compostagem: maturação e qualidade do composto. 4 ed. Piracicaba, 2004.

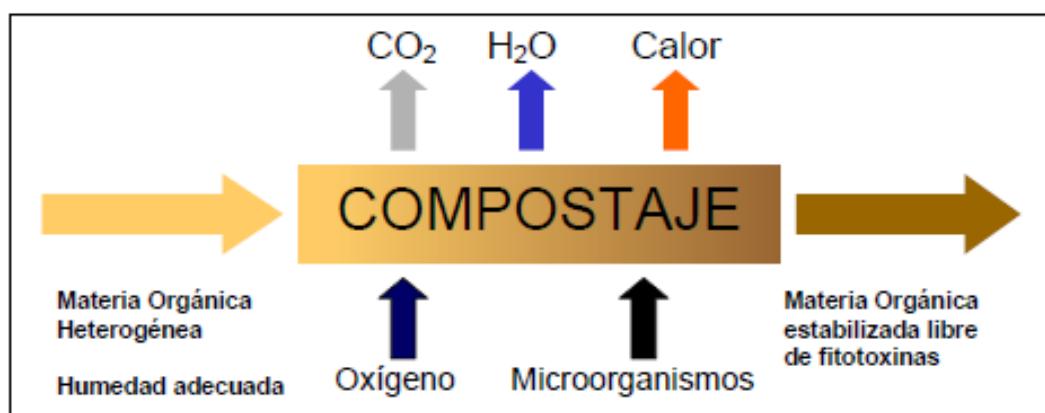
Ilustración 14 - Patrón de Temperatura Durante el Compostaje



Fuente: Fernandes y Silva (2000).

Conforme a Kiehl (1985), el patrón de temperatura muestra al compost partiendo de una temperatura ambiente, pasa rápidamente por la fase de temperatura mesófila, subiendo por la termófila, donde se mantiene por un periodo de tiempo formando un plato; prosiguiendo a la descomposición, teniendo en cuenta que no deben faltar ni oxígeno ni humedad a la masa, la fase mesófila tiene una duración mayor; finalmente luego de 100 a 120 días, con la cura del compost, la temperatura se reducirá, manteniéndose próxima a la temperatura ambiente, en ese punto se obtiene la cura completa del material, estando la materia orgánica humificada. La ilustración 15 exhibe el diagrama general del proceso de compostaje aeróbico.

Ilustración 15 - Diagrama General del Proceso del Compostaje Aeróbico



Fuente: Gatón (2002)

3.5.2 Proceso Anaeróbico

De acuerdo a Fonseca (2001) el proceso anaeróbico es realizado con la participación de microrganismos que no requieren de la presencia de oxígeno libre y que no sobreviven en la presencia del mismo.

Como la fermentación es procesada en ausencia del aire, la temperatura de la masa en descomposición permanece baja, y ocurren desprendimientos de gases H_2S , CH_4 , entre otros. (LIMA, 2004).

Conforme a Cuadros (2008) la biometanización es en un proceso biológico. La materia orgánica, sirve de nutrientes para los microrganismos anaerobios, que la descomponen y dan como resultado una mezcla de gases, denominada biogás, constituida básicamente por metano y anhídrido carbónico. Los tratamientos biológicos anaerobios son utilizados en diversos procesos en industrias que tratan productos orgánicos biodegradables, en general son muy eficaces y presentan un interesante balance energético.

La biometanización, también conocida como digestión anaerobia, consiste en la degradación de la materia orgánica sin la presencia de oxígeno para la obtención del biogás como producto principal y bioabono como subproducto. Empleando esta tecnología se consigue disminuir el volumen de residuos enviados a los vertederos, con la consecuente emisión de metano a la atmósfera y el aprovechamiento del biogás como fuente de energía sostenible (LÓPEZ, 2015).

3.5.2.1 Fases de Digestión Anaeróbica

3.5.2.1.1 Hidrólisis

Consiste en la hidrólisis de materiales particulados complejos en materiales disueltos más simples, como las bacterias son incapaces de asimilar la materia orgánica particulada, esa conversión es lograda mediante la acción de enzimas excretadas por bacterias hidrolíticas fermentativas (SILVA; CONTRERA, 2019).

3.5.2.1.2 Acidogénesis

Los compuestos disueltos, subproductos de la etapa anterior, son metabolizados por las bacterias fermentativas y excretados como ácidos grasos volátiles, sustancias orgánicas

simples, alcoholes, ácido láctico y compuestos minerales (CO_2 , H_2 , NH_3 , H_2S). el proceso es realizado por bacterias anaeróbicas y facultativas (PIRES, 2013).

3.5.2.1.3 Acetogénesis

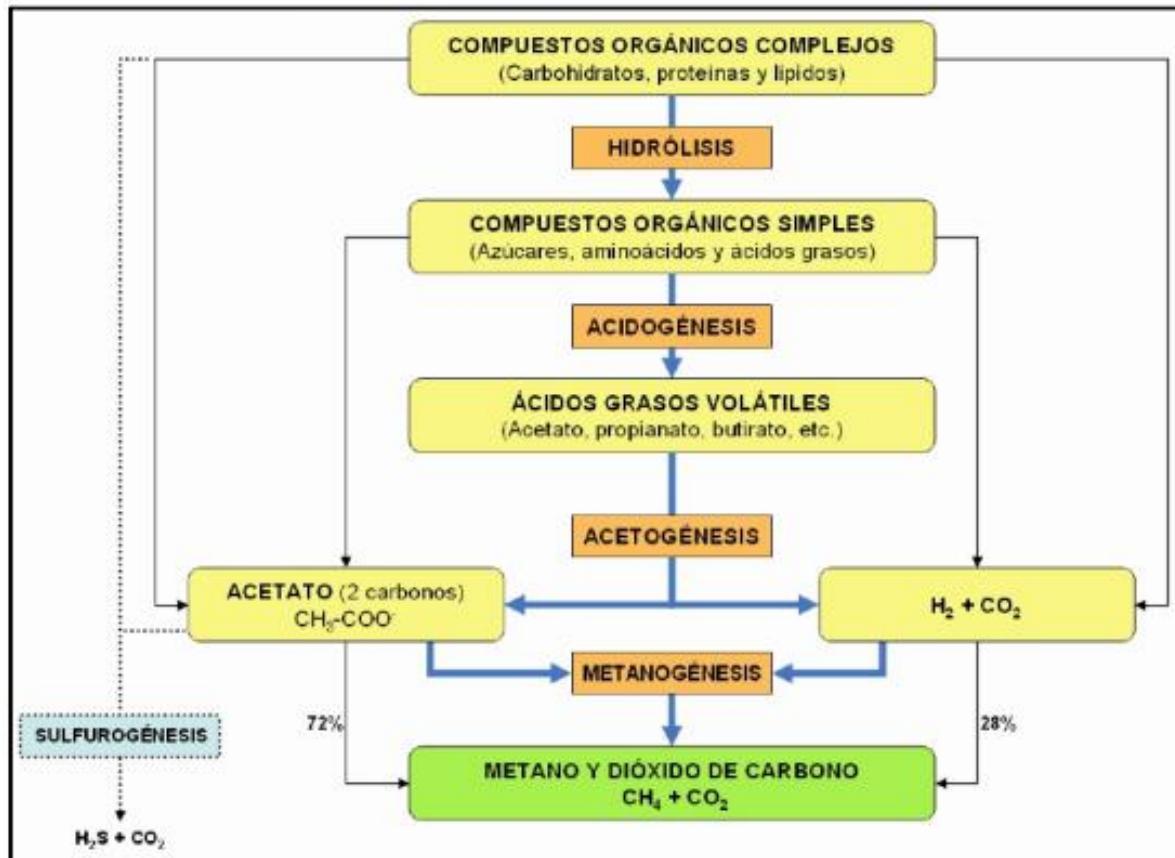
El mismo autor, la define como la transformación de los productos obtenidos anteriormente en compuestos que servirán como substratos para la formación de metano, dichos compuesto son el acetato, hidrógeno y dióxido de carbono.

3.5.2.1.4 Metanogénesis

La producción de metano puede ocurrir por dos medios, por la reducción de ácido acético o reducción de dióxido de carbono (PIRES, 2013).

Se puede observar en la Ilustración 16 las fases de la digestión anaeróbica.

Ilustración 16 – Fases de Digestión Anaeróbica



Fuente: Miembros de la mesa de Biogás (2010).

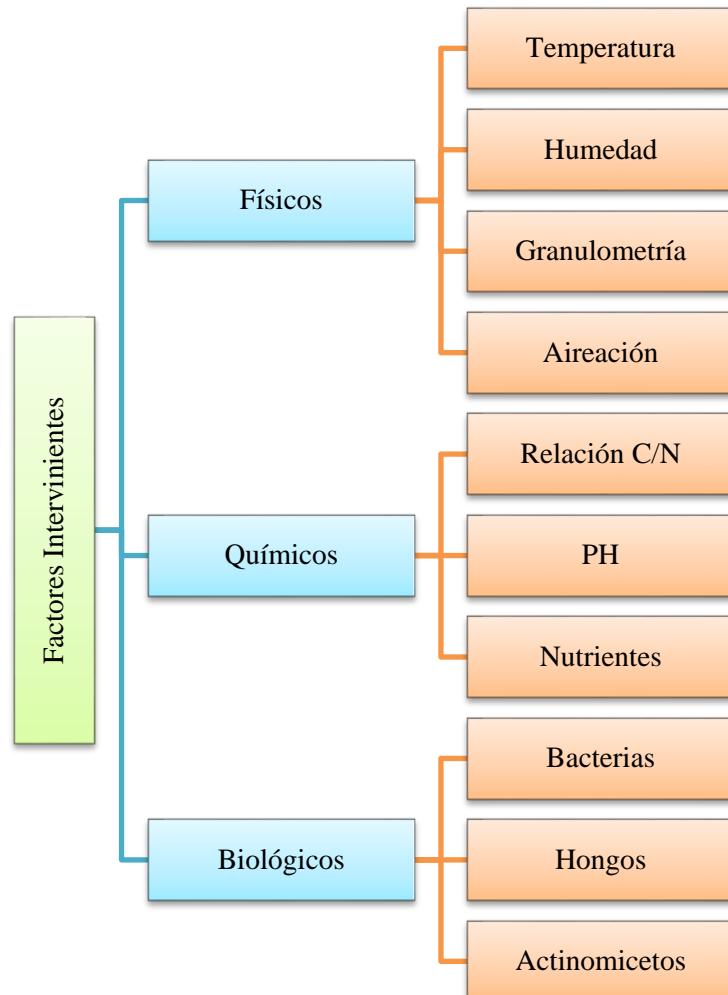
3.5.3 Proceso Mixto

Lima (2004) señala que el proceso mixto es el resultante de la combinación de los procesos aeróbico y anaeróbico. En un inicio la materia orgánica es sometida al proceso aeróbico ya que el oxígeno se encuentra en el medio, con la reducción de dicho elemento el proceso va desenvolviéndose en anaeróbico. Generalmente son los chinos quienes utilizan este tipo de proceso.

3.6 FACTORES QUE AFECTAN EL COMPOSTAJE AERÓBICO

En la Ilustración 17 se presenta un esquema de los factores físicos, químicos y biológicos que afectan el proceso anaeróbico.

Ilustración 17 - Factores que afectan la digestión aeróbica



Fuente: Elaborado por la autora

3.6.1 Físicos

3.6.1.1 Temperatura

La temperatura es un factor indicativo del equilibrio biológico, de fácil monitoreo y que se refleja en la eficiencia del proceso (NEGRET, 2018).

La temperatura tiene un amplio rango de variación, dependiendo de la fase del proceso, ya que los microrganismos se desenvuelven en intervalos diferenciados (ROMÁN; MARTÍNEZ; PANTOJA; 2013).

El proceso de compostaje involucra dos rangos de temperatura: mesofílico y termofílico. A pesar de que la temperatura ideal para la etapa inicial de compostaje es de 20 – 45 °C, en las etapas siguientes con la toma de los organismos termofílicos, un rango de temperatura de 50 – 70 °C puede ser ideal. Las altas temperaturas caracterizan el proceso de compostaje aeróbico y sirven como signos de actividades microbianas vigorosas. Los patógenos habitualmente se destruyen a 55 °C o más. Los giros y la aireación pueden utilizarse para regular la temperatura (FAO, 2003). El Cuadro 4 presenta los parámetros de temperatura óptima durante el compostaje.

Cuadro 4 - Parámetros de Temperatura Óptimos

TEMPERATURA °C	CAUSAS ASOCIADAS		SOLUCIONES
Bajas temperaturas (Temperatura Ambiente < 35°C)	Humedad insuficiente	Las bajas temperaturas pueden darse por varios factores, como la falta de humedad, por lo que los microrganismos disminuyen la actividad metabólica, y por tanto, la temperatura baja.	Humedecer el material o añadir material fresco con mayor porcentaje de humedad (restos de frutas, verduras u otros).
	Material insuficiente	Insuficiente material o forma de la pila inadecuada para que alcance una temperatura adecuada.	Añadir más material a la pila de compostaje.
	Déficit de nitrógeno o baja C/N	El material tiene una alta relación C/N y por lo tanto, los microrganismos no tienen el N suficiente para generar enzimas y proteínas y disminuyen o ralentizan su actividad.	Añadir material con alto contenido en nitrógeno.
Altas temperaturas (Temperatura Ambiente > 70°C)	Ventilación y humedad insuficiente	La temperatura es demasiado alta y se inhibe el proceso de descomposición. Se mantiene la actividad microbiana, pero no la suficiente para activar a los microrganismos mesofílicos y facilitar la terminación del proceso.	Volteo y verificación de la humedad (55-60%). Adición de material con alto contenido de carbono.

Fuente: Adaptado Román, Martínez y Pantoja (2013).

3.6.1.2 Humedad

El contenido de humedad en el proceso del compostaje debe variar entre 40 a 60% en peso seco de la materia orgánica disponible. Contenidos de humedad inferiores al 40% retardan el proceso por inhibir la actividad biológica (LIMA, 1985).

De acuerdo con Fonseca (2001) la humedad no puede ser excesiva, es decir superior al 60%, debido a que el exceso de humedad, hace que el agua ocupe los espacios vacíos presentes en el residuo, imposibilitando la circulación de oxígeno, pudiendo transformar el proceso de digestión aeróbica en anaeróbica con producción de gases y malos olores. Es conveniente no dejar que la humedad baje a valores inferiores a 40% y no suba a valores superiores a 60%, lo ideal sería mantenerlo en 55%. El cuadro 5 presenta los patrones de humedad en el compostaje.

Cuadro 5 - Parámetros de Humedad

PORCENTAJE DE HUMEDAD	PROBLEMA		SOLUCIONES
< 45%	Humedad insuficiente	Puede detener el proceso de compostaje por falta de agua para los microrganismos.	Se debe regular la humedad, ya sea proporcionando agua al material o añadiendo material fresco con mayor contenido de agua.
> 60%	Oxígeno insuficiente	Material muy húmedo, el oxígeno queda desplazado. Puede dar lugar a zonas de anaerobiosis.	Volteo de la mezcla y/o adición de material con bajo contenido de humedad y con alto valor en carbono, como pajas u hojas secas.

Fuente: Adaptado Román, Martínez y Pantoja (2013).

3.6.1.3 Granulometría

El tamaño de partículas debe ser el adecuado, si es muy fina, se impide la entrada de aire al interior de la masa y no se llevará a cabo una fermentación aerobia completa, además puede ocurrir la compactación excesiva del material. Si las partículas son muy grandes, la fermentación aeróbica tendrá lugar solamente en la superficie de la masa triturada (MÁRQUEZ, 2008).

De acuerdo con Lima (1985) el uso de sistemas mecánicos para reducir los residuos a partículas menores ejerce gran influencia en el proceso del compostaje, por aumentar la

superficie disponible para el ataque microbológico, reduciendo el tiempo de fermentación, además de volver el compost más homogéneo.

Las dimensiones ideales para el compostaje de residuos sólidos orgánicos deben estar comprendidos entre 1 cm y 5 cm (BIDONE; POVINELLI, 1999). El cuadro 6 presenta el control del tamaño de las partículas en el compostaje.

Cuadro 6 - Control del Tamaño de la Partícula

TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS (cm)	PROBLEMA		SOLUCIONES
> 30 cm	Exceso de aireación	Los materiales de gran tamaño crean canales de aireación que hacen bajar la temperatura y desaceleran el proceso.	Picar el material hasta conseguir un tamaño medio de 10-20 cm.
< 5 cm	Compactación	Las partículas demasiado finas crean poros pequeños que se llenan de agua, facilitando la compactación del material y un flujo restringido del aire, produciéndose anaerobiosis.	Añadir material de tamaño mayor y volteos para homogeneizar.

Fuente: Adaptado Román, Martínez y Pantoja (2013).

3.6.1.4 Aireación

La finalidad del compostaje aeróbico es la estabilización del producto final, que sólo se obtiene por la oxigenación más completa posible de la materia orgánica. La oxigenación tiene la doble función de alimentar la cantidad solicitada por la población microbiana y resfriar la masa por intermedio de la liberación del vapor de agua. La aireación es necesaria para procesar la digestión aeróbica de la masa orgánica durante el compostaje, debido a que, la reacción aumenta la velocidad de la digestión aeróbica y disminuye la emanación de olor durante el proceso (FONSECA, 2001).

El control de la reacción debe ser riguroso, pues, si el grado de oxígeno disminuye demasiado en el interior de la hilera, los microorganismos aeróbicos serán sustituidos por los anaeróbicos retardando el proceso de compostaje y produciendo olores fétidos (FONSECA, 2001).

Según Kiehl (2004, p. 143) “Las partes de la pila que deben merecer mayor atención durante el mezclado son las más externas, expuestas al sol y al viento, más frías, resecadas, y

las de base y centro de la pila, más húmedas, frías, pobres en oxígeno, y de actividad microbiana menos intensa”.

Para mantener la integridad biológica el proceso de compostaje vía aeróbica exige un flujo permanente de aire dirigido para el interior de la masa. Es sistemas abiertos, la aireación es mantenida por las condiciones naturales de contorno, visto que la actividad aerobia se procesa regularmente en sistemas isotérmicos o en aquellos donde el cambio de calor es facilitado (LIMA, 1985).

En el proceso aeróbico la aireación puede realizarse mediante mezclado manual o por medios mecánicos, con insuflación de aire. Externamente la pila contiene 18% a 20% de O₂; el cual va disminuyendo en el interior de la pila, hasta que, en profundidades mayores a 0,60 m, se reduce de 0,5% a 2% en la base y en el centro de la pila. Es conveniente que en la fase termófila la concentración de O₂ sea de 5%, mientras que 0,5% sin síntomas de anaerobiosis. Para el dimensionamiento de equipamientos electromecánicos de insuflación de aire es aconsejable 0,3 m³ a 0,6 m³ de aire por kg de sólidos volátiles por día (BIDONE; POVINELLI, 1999). El Cuadro 7 muestra el control de aireación durante el compostaje.

Cuadro 7 - Control de Aireación

PORCENTAJE DE AIREACIÓN	PROBLEMA		SOLUCIONES
< 5%	Baja aireación	Insuficiente evaporación de agua, generando exceso de humedad y un ambiente de anaerobiosis.	Volteo de la mezcla y/o adición del material estructurante que permita la aireación.
> 15%	Exceso de aireación	Descenso de temperatura y evaporación del agua, haciendo que el proceso de descomposición se detenga por falta de agua.	Picado del material a fin de reducir el tamaño de poro y así reducir la aireación. Se debe regular la humedad, bien proporcionando agua al material o añadiendo material fresco con mayor contenido de agua (restos de frutas y verduras, césped, etc.)

Fuente: Adaptado Román, Martínez y Pantoja (2013).

3.6.2 Químicos

3.6.2.1 Relación Carbono/Nitrógeno (C/N)

El carbono constituye la fuente de energía para el desenvolvimiento y activación del proceso de síntesis celular, es necesario para el funcionamiento de las actividades microbianas, su presencia es indispensable para el compostaje (FONSECA, 2001).

El nitrógeno, por su parte, es el principal constituyente del protoplasma de los microrganismos existentes en la fracción orgánica de los residuos sólidos y es la fuente básica para la reproducción de esos microrganismos, por lo tanto, es indispensable en el proceso del compostaje. Para que el proceso de compostaje consiga alta eficiencia es necesario que la relación C/N esté rigurosamente balanceada según Fonseca (2001).

Kiehl (1979)² menciona que, si la relación C/N es muy grande, los microrganismos no tienen el material plástico necesario para construir su propia materia celular, además necesitarán realizar muchos ciclos vitales para eliminar el exceso de carbono en forma de gas carbónico (apud LIMA, 1985).

Un material orgánico que presenta la relación C/N en la proporción 60:1, lleva 30 a 60 días para bioestabilizar; en las proporciones entre 60:1 y 33:1, el nitrógeno soluble es transformado en orgánico, no soluble, quedando inmovilizado. Si la proporción es 33:1, la materia orgánica cruda alcanzará la bioestabilización entre 15 a 30 días; entre las proporciones 33:1 y 17:1, cuando se está procesando la bioestabilización, no habrá inmovilización de nitrógeno mineral del suelo, sin embargo, no acontecerá el proceso de mineralización, ese proceso se dará efectivamente a partir de 17:1. Así al aplicar al suelo materia orgánica con elevada relación C/N, se puede producir deficiencias que llegan a matar a las plantas (BIDONE; POVINELLI, 1999).

Por otro lado, si la relación C/N es baja, acontecerá liberación de nitrógeno a través de la volatilización de amoníaco (NH_3) hasta que acontezca el equilibrio de la relación C/N, en esa situación se presentarán olores insoportables (FONSECA, 2001). Por lo tanto, dicho autor menciona además que es necesario que la materia a ser compostada esté con relación C/N en torno a 30:1. Eso debido a que los microrganismos encargados de la digestión de la materia orgánica, necesitan de ambos elementos, en esa misma proporción.

²KIEHL, E. J. Manual de edafología. São Paulo, Agronômica Ceres, 1979. 262 p.

Se recomienda que, al inicio del compostaje, la relación esté entre 30 a 40:1 y en el final del proceso, adopte valores entre 14:1 a 10:1, ya que, son esas proporciones que establecen la humificación, la maduración o bioestabilización del residuo orgánico. El Cuadro 8 indica los parámetros de la relación C/N durante el proceso del compostaje.

Cuadro 8 - Parámetros de la relación C/N

C/N	CAUSAS ASOCIADAS		SOLUCIONES
> 35:1	Exceso de carbono	Existe en la mezcla una gran cantidad de materiales ricos en carbono. El proceso tiende a enfriarse y a ralentizarse	Adición de material rico en nitrógeno hasta conseguir una adecuada relación C/N.
< 15:1	Exceso de nitrógeno	En la mezcla hay una mayor cantidad de material rico en nitrógeno, el proceso tiende a calentarse en exceso y se generan malos olores por el amoniaco liberado.	Adición de material con mayor contenido en carbono (restos de poda, hojas secas, aserrín)

Fuente: Adaptado Román, Martínez y Pantoja (2013).

3.6.2.2 pH

El pH es un parámetro que ejerce gran influencia en los procesos de compostaje.

Según Kiehl (2004) la reacción de la materia orgánica, tanto de origen animal como vegetal, comúnmente presenta naturaleza ácida, de ésta manera el carácter inicial del proceso es ácido, con la formación de ácidos orgánicos que tornan el medio más ácido aún, consecuentemente estos ácidos orgánicos y trazas de ácidos minerales reaccionan con bases liberadas de la materia orgánica, produciendo compuestos de reacción alcalina. También se forman ácidos húmicos que reaccionan con los elementos químicos básicos, produciendo humus alcalino, y de esta manera ocurre la elevación del pH, atendiendo valores superiores a 8.

El compostaje aeróbico induce a una elevación gradual del pH en los 10 primeros días, donde los valores pasan de un pH inicial de 5,0 a 8,0, llegando a 9,0 en el fin de la fase activa, a causa de la formación de ácidos minerales, posteriormente éstos desaparecen dando lugar a ácidos orgánicos, que reaccionan con las bases liberadas de la materia orgánica, neutralizando y transformando el medio en alcalino, con pequeñas variaciones del pH hasta el día 60, llegando al final del proceso (maduración) con PH alrededor de 8,0 (BIDONE; POVINELLI, 1999; FONSECA, 2001).

Lelis y Pereira Neto (1999)³ observaron en sus ensayos valores de pH inicialmente ácidos, en la faja de 4,6 a 5,8, que mantuvieron una continua y gradual elevación durante la primera fase, siendo detectados a partir de allí, valores del orden de 8,8 a 9,5. Fue constatado además un tiempo medio de 7 a 8 días para que el pH alcanzara valores alcalinos (apud LIMA, 2017).

Valente et al. (2009), afirma que no existen inconvenientes en emplear substratos caracterizados por bajos valores de pH (ácidos), debido a que a lo largo del proceso de compostaje habrá varias reacciones químicas, del tipo ácido-base y de óxido reducción, con potencial para regular esta condición ácida, generando un producto final con pH en la faja de 7,0 a 8,5. En el Cuadro 9 se indica los parámetros de pH.

Cuadro 9 – Valores de pH en el Compost

PH	CAUSAS ASOCIADAS	
< 4,5	Exceso de ácidos orgánicos	Los materiales vegetales como restos de cocina, frutas, liberan muchos ácidos orgánicos y tienden a acidificar el medio.
>8,5	Exceso de nitrógeno	Cuando hay un exceso de nitrógeno en el material de origen, con una deficiente relación C:N, asociado a humedad y altas temperaturas, se produce amoníaco alcalinizando el medio.

Fuente: Adaptado Román, Martínez y Pantoja (2013).

3.6.2.3 Nutrientes

El grado de intensidad microbiológica de los microorganismos se encuentra relacionada a la diversificación y concentración de los nutrientes, de modo a que, a mayor diversificación de los residuos orgánicos, también más diversificados serán los nutrientes y por lo tanto la población microbiológica, resultando el proceso más eficiente (PEREIRA NETO, 2007).

El autor destaca también que los nutrientes más importantes son el carbono, ya que es la fuente básica de energía para las actividades de los organismos y el nitrógeno, vital para la reproducción protoplasmática de los individuos.

³ LELIS, M. P. N.; PEREIRA NETO, J. T. Estudo e Avaliação do Balanço de umidade na compostagem. In: 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro, p. 1699-1708, 1999.

3.6.3 Biológicos

La transformación de la materia orgánica cruda biodegradable a materia orgánica humificada, se logra mediante la acción de microrganismos, los cuales son descritos por Bidone; Povinelli (1999) de la siguiente manera:

3.6.3.1 Bacterias

Las bacterias se desempeñan principalmente en la fase termófila, descomponiendo azúcares, proteínas y otros compuestos orgánicos de fácil digestión.

Las bacterias son las responsables de descomponer la materia orgánica, sea ella animal o vegetal, aumentar la disponibilidad de nutrientes, agregar partículas en el suelo y fijar el nitrógeno.

3.6.3.2 Hongos

Son organismos filamentosos, heterotróficos, que se desenvuelven en fajas altas y bajas de pH. No predominan en la acidez por competición, más por la falta de concurrencia (ausencia de bacterias y actinomicetos).

Éstos organismos descomponen los residuos resistentes de animales o vegetales, además son responsables por la formación de humus, descomposición en alta temperatura de abono verde, heno, entre otros, y la fijación del nitrógeno.

3.6.3.3 Actinomicetos

Organismos intermediarios entre las bacterias y los hongos (unicelulares), apenas menores que las bacterias. Se ve afectado por valores de pH bajo. Su principal función es descomponer la materia orgánica.

La Tabla 1 muestra los parámetros del proceso del compostaje del tipo aeróbico.

Tabla 1 - Parámetros del Compostaje Aeróbico

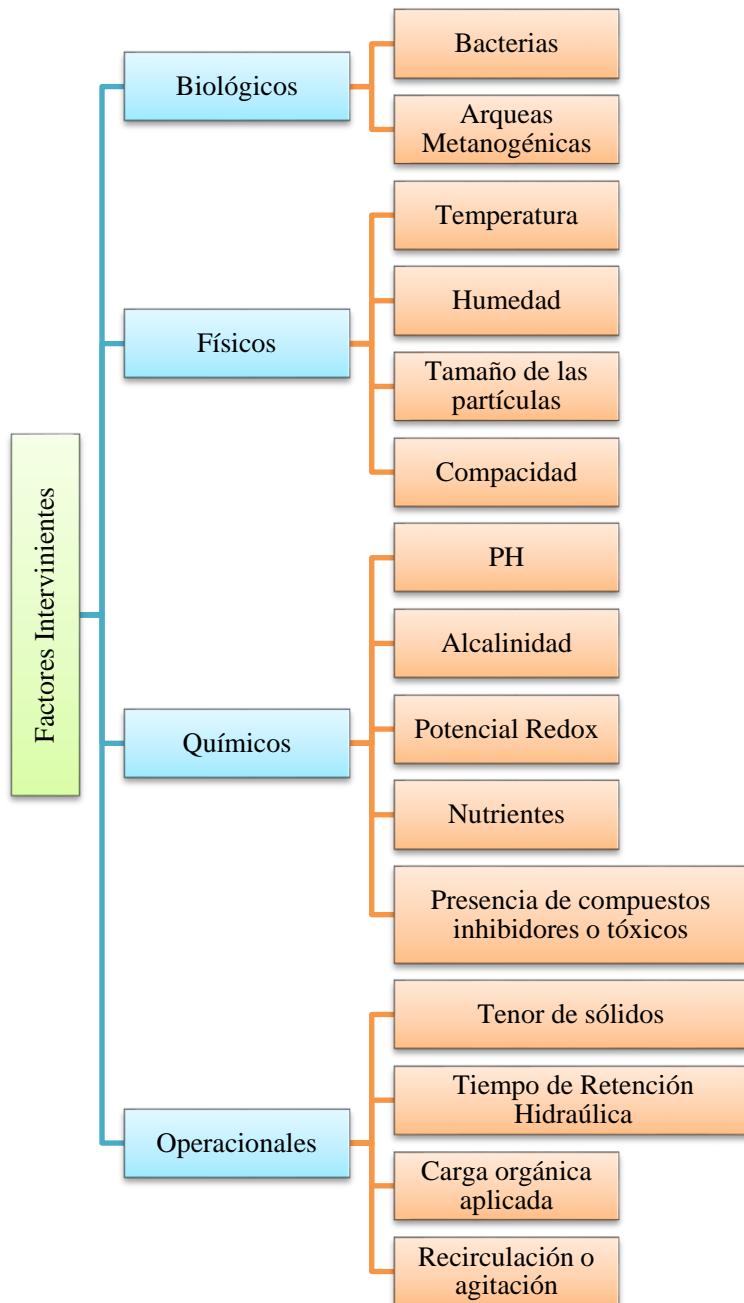
PARÁMETRO	RANGO IDEAL AL INICIO (2-5 días)	RANGO IDEAL (2 - 5 semanas)	RANGO IDEAL DE COMPOST MADURO (3-6 meses)
C/N	25:1 - 35:1	15:20	10:1 - 15:1
Humedad	50% - 60%	45% - 55%	30% - 40%
Concentración de Oxígeno	10%	10%	10%
Tamaño de partícula	< 25 cm	15 cm	< 1,6 cm
pH	6,5 - 8,0	6,0 - 8,5	6,5 - 8,5
Temperatura	45 - 60°C	45°C - T. Amb.	T. ambiente
Densidad	250 - 400 kg/m ³	< 700 kg/m ³	< 700 kg/m ³
Materia Orgánica (Base seca)	50% - 70%	> 20%	> 20%
Nitrógeno Total (Base seca)	2,5 - 3%	1 - 2%	1%

Fuente: Adaptado Román, Martínez y Pantoja (2013).

3.7 FACTORES QUE AFECTAN EL COMPOSTAJE ANAERÓBICO

Se presenta en la Ilustración 18 un esquema de los factores biológicos, físicos, químicos y operacionales que afectan el proceso anaeróbico.

Ilustración 18 – Factores que afectan la digestión anaeróbica



Fuente: Elaborado por la autora

3.7.1 Biológicos

Son los factores que más afectan a la digestión, el conjunto de microrganismos que componen el lodo activo de los digestores, es normalmente llamado biomasa. Los microrganismos encargados de las fases previas a la metalogénesis, son facultativos y tienen elevadas tasas de crecimiento celular, sin embargo, las arqueas metanogenicas poseen bajas tasas de crecimiento, ocasionando dificultades al iniciarse la operación de un digestor sin

inoculación (SILVA; CONTRERA ,2019). Los autores también mencionan que la inoculación es la transferencia de una parte de la biomasa activa de un sistema que se encuentra en operación, para otro que la inicia, con el fin de acelerar su partida y estabilización.

3.7.2 Físicos

3.7.2.1 Temperatura

Se pueden dividir los microrganismos en tres grupos de acuerdo a las fajas de temperatura: psicrófilos de 4 a 20°C, mesófilos de 20 a 40°C y termófilos en temperaturas mayores a 40°C. La faja de temperatura operacional no puede ser alterada en un digestor, debido a que habría pérdida de actividad, ya que los microrganismos son diferentes para cada faja (SILVA; CONTRERA, 2019).

3.7.2.2 Humedad

Mientras más elevada la humedad en un digestor, más rápido se producen las reacciones biológicas, por lo tanto, aumenta la generación de biogás. Un medio con gran humedad puede diluir algunos compuestos que ocasionarían efectos tóxicos al sistema (SILVA; CONTRERA, 2019).

3.7.3 Químicos

3.7.3.1 pH

La digestión anaeróbica se desarrolla en condiciones óptimas en la faja de valores de 6,5 a 7,5, de acuerdo con la mesa del biogás (2010). Van Haandel; Marais (1999)⁴ establecen que las bacterias que son responsables por la hidrólisis, pueden tolerar una faja amplia de pH, y las acidificantes prefieren pH debajo de 8, pudiendo producir ácidos hasta valores de pH menores a 5. Es importante destacar que cuando las acidificantes producen más ácido de lo que las metanogénicas logran consumir, el pH disminuye y el sistema se desequilibra, acidificando al reactor (apud SILVA; CONTRERA, 2019).

⁴ VAN HAANDEL, A. C.; MARAIS, G. V. R. O campamento do sistema de lodo ativado: teoria e aplicações para projetos e operações. Campina Grande: epgraf, 472 p 1999.

3.7.3.2 Nutrientes

Según la mesa del biogás (2010), es baja la necesidad de nutrientes en el proceso anaeróbico, debido a la reducida velocidad de crecimiento. Sin embargo, es fundamental que la relación C/N se encuentre dentro del rango 20/1 y 30/1 y la relación N/P permanezca dentro del rango de 1/5 y 1/7 para la estabilización del proceso.

3.7.4 Operacionales

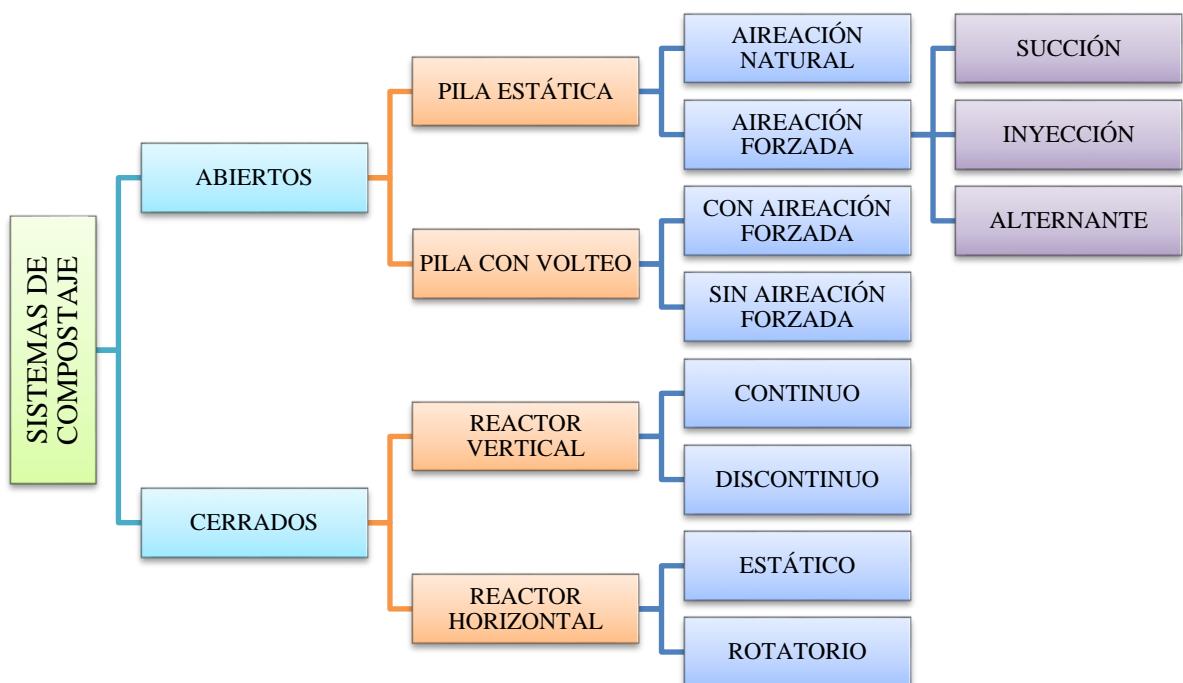
3.7.4.1 Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)

Es el cociente entre el volumen del digestor y el caudal de alimentación. Puede considerarse como el tiempo que debe permanecer el efluente orgánico en el digestor de forma a alcanzar los niveles de energía y reducción de carga contaminante que se hayan prefijado, conforme lo establece la mesa del biogás (2010).

3.8 SISTEMAS DE COMPOSTAJE

El flujoGRAMA presentado en la Ilustración 19 presenta el sistema del compostaje.

Ilustración 19 – Sistemas de Compostaje



Fuente: Adaptado Gatón (2002).

3.8.1 Abiertos

Los materiales a compostar se disponen en hileras o pilas al aire libre o en naves.

3.8.1.1 Pila Estática

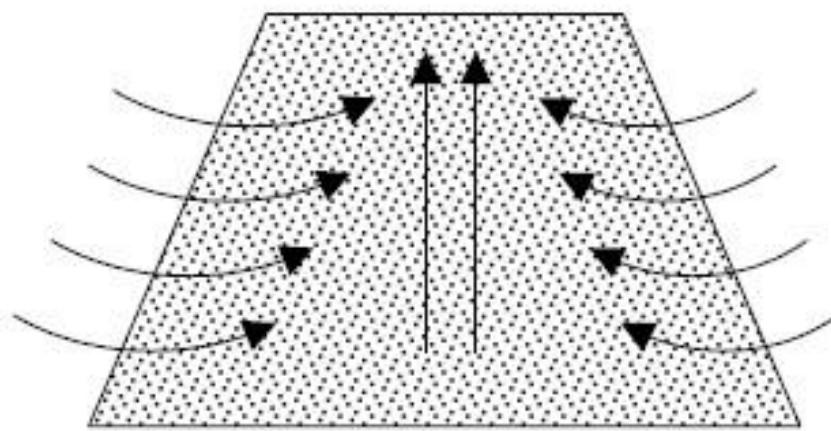
3.8.1.1.1 Aireación Natural

Es uno de los sistemas más antiguos conocidos, las pilas en general son de 1,5 m de altura y 2 a 3 m de ancho, las mismas permanecen estáticas durante el proceso del compostaje (GATÓN, 2002). Dicho autor además menciona que la pila presenta porcentajes variables de oxígeno en el aire de sus intersticios, el exterior de la hilera contiene casi tanto oxígeno como el aire atmosférico (18 – 20%), sin embargo, en el interior, el contenido de oxígeno desciende y de CO₂ aumenta hasta el punto de que a una profundidad mayor de 60 cm el contenido de oxígeno puede estar entre 0,5 y 2%.

De acuerdo con Negro (2000), este tipo de sistema se realiza en pilas, de altura limitada, y permanecen estáticas durante el proceso. La ventilación es natural a través de los espacios de la masa a ser compostada. En general las pilas pueden superar la altura de 1,5 m, con una anchura de base de 2,5 a 3 m, sin limitaciones en cuanto a su longitud y de frente triangular.

En las Ilustraciones 20 y 21 se observan el flujo de aire a través de la pila y la disposición de las mismas respectivamente.

Ilustración 20 – Flujo de Aire Caliente en una Pila de Aireación Natural



Fuente: Gatón (2002).

Ilustración 21 - Pila con Aireación Natural



Fuente: Disponible en <<http://www.greenvillesoilandwater.com/composting/aerated-turned-windrow-composting/>>

3.8.1.1.2 Aireación Forzada

Para lograr una mejor aireación se recurre a la aireación forzada en los que un sistema de tuberías y bombas permiten operar en condiciones controladas (SANDOVAL, 2010).

Las pilas son preparadas sobre una red tubular perforada de 10 cm de diámetro acoplada a un soplador o exaustor a través del cual ocurre el suministro de aire por aspiración o insuflación a la masa a ser compostada (MASSUKADO, 2008; LEITE, 2015).

Sobre dicha tubulación, es recomendable colocar una camada estructurante, a fin de facilitar el pasaje del aire a través de la pila y sobre esta camada es montada la pila (ANDREOLI et al., 2001). El propósito de dichas tubulaciones es evitar que el proceso se vuelva anaeróbico, además del control de la temperatura y la humedad (LUPION, 2019).

De acuerdo con Andreoli et al. (2001), cuando el aire es aspirado acontece una menor formación de caminos preferenciales de aireación tornando la degradación más uniforme y en menor tiempo.

La altura inicial de las pilas debe ser de unos 150 a 245 cm de altura, según la porosidad del material, las condiciones climáticas y el alcance del equipo utilizado para construir la pila.

La altura adicional es ventajosa en invierno, ya que ayuda a retener el calor. Puede ser necesario completar la pila con 15 cm de compost acabado o agente de carga. La capa de compost acabado protege la superficie de la pila del secado, la aísla de la pérdida de calor,

desalienta las moscas y filtra el amoníaco y los olores potenciales generados dentro de la pila (FAO, 2003).

Este sistema no es recomendado para cualquier tipo de residuos, restringiéndose para aquellos que tengan material de entrada más homogéneo, tanto en su composición como en su granulometría (MASSUKADO, 2008).

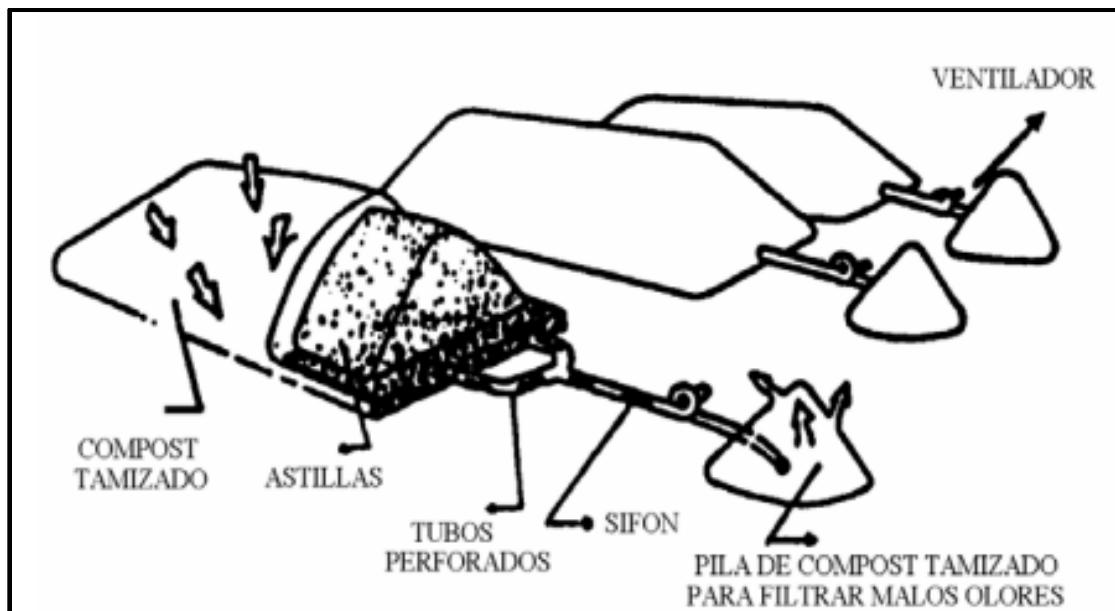
La eliminación de patógenos de la masa en este método ocurre en 15 días; en 30 días, la estabilización; en 45 a 60 días, el material estará completamente humificado (BIDONE; POVINELLI, 1999).

Es recomendable la utilización de un sistema de colecta y tratamiento de gases que atraviesan la pila para evitar la diseminación de malos olores (LEITE, 2015). Dicho autor menciona también, que, por presentar menor necesidad de área, se torna viable la ejecución del proceso en áreas cubiertas, disminuyendo los problemas relacionados al clima.

Este método permite operar en altas temperaturas, alrededor de 80°C a 85°C, a partir de una población microbiana seleccionada que mantenga su actividad igual en elevadas temperaturas (TORRES DE CARVALHO, 2002).

Como se observa en la Ilustración 22, la masa es empilada sobre una base de material poroso, con tubos perforados para facilitar la aireación, el cual está ligado a un ventilador.

Ilustración 22 - Esquema de Pila Estática Aireada



Fuente: Negro (2000).

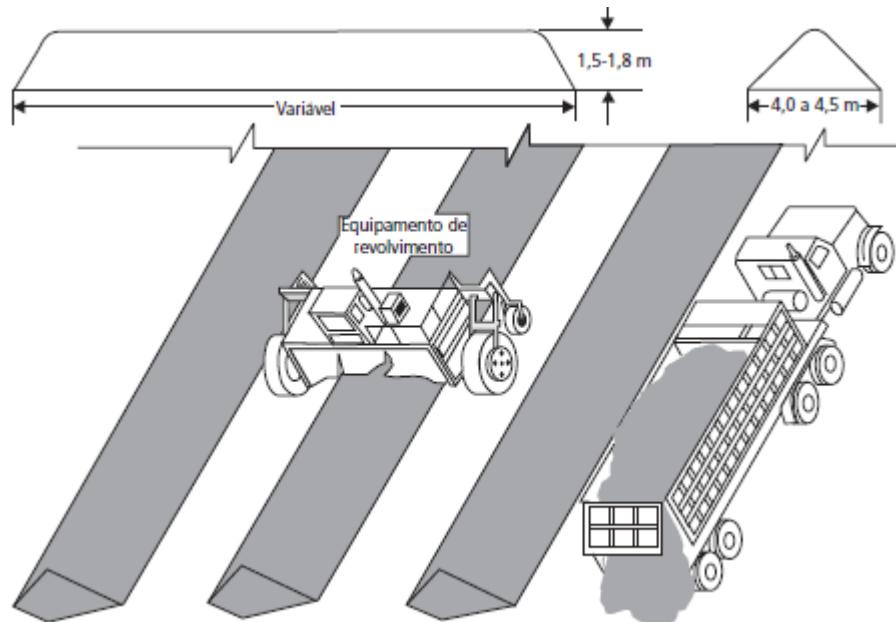
3.8.1.2 Pilas con Volteo

Gatón (2002) menciona que debido a su simplicidad es un sistema muy utilizado, pero tiene sus limitaciones. Es un sistema lento, la pila es oxigenada tan solo periódicamente, requiere más espacio y presenta dificultades en el control higiénico.

La altura de la pila es de aproximadamente 2,5 m. La frecuencia del volteo depende del tipo de material, la humedad y climatología, el grado de estabilidad y de los tiempos de residencia en planta que se estimen adecuados (GATÓN, 2002).

Usualmente los volteos se realizan con una pala cargadora, recogiendo y soltando el material para posteriormente reconstruir la pila. En la Ilustración 23 se observa el modelo de pila revuelta mecánicamente.

Ilustración 23 - Modelo de Pilas Revueltas Mecánicamente



Fuente: Andreoli (2001).

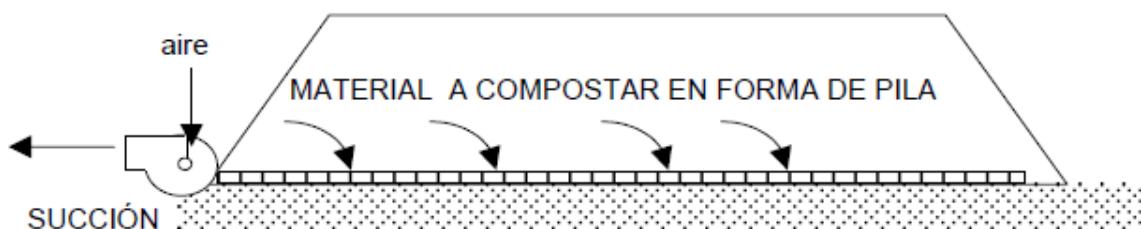
3.8.1.2.1 Con Aireación Forzada

La mezcla se voltea y homogeniza, luego es suministrado aire por ventilación, el cual se realiza por medio de tuberías perforadas o por un canal empotrado en la solera. Las tuberías se conectan a un ventilador que asegura la entrada de O₂ y la salida de CO₂. La ventilación se puede realizar por inyección, succión o utilizando sistemas alternantes (GATÓN, 2002).

En los sistemas alternantes (succión-inyección) la aireación por succión permite controlar mejor el proceso, la emisión de olores y que se alcancen temperaturas más elevadas, posteriormente

tras la disminución de microorganismos patógenos se invierte el flujo de aire y el proceso continua de acuerdo con el autor. La Ilustración 24 exhibe la pila con revolvimiento con aireación forzada.

Ilustración 24 – Pila con volteo con Aireación Forzada



Fuente: Gatón (2002).

3.8.2 Cerrados

Son sistemas en los cuales son utilizados reactores, se emplean cuando es preciso tasas elevadas de transformación y en condiciones muy controladas. El tiempo del proceso es reducido, pero en cambio es más complejo y las instalaciones más costosas de construir, operar y mantener (LEAL, 2016).

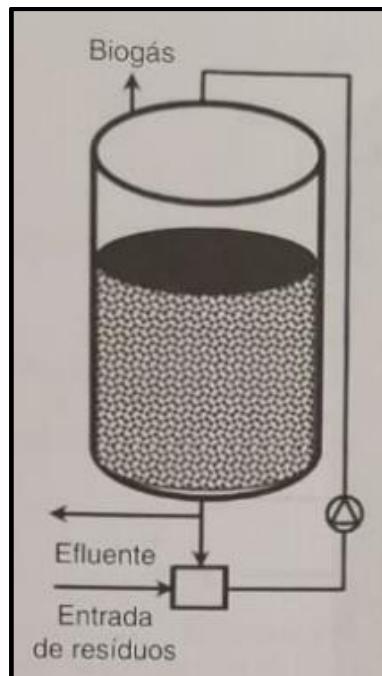
3.8.2.1 Reactor Vertical

Conforme a Lupion (2019) se utiliza un cilindro vertical, pudiendo el aire ser inyectado de fondo o distribuido a lo largo de la estructura. Los residuos son dispuestos desde la parte superior del cilindro, llevándose a cabo la descomposición a lo largo de la estructura, mientras el residuo se mueve de manera descendente. Es importante que el reactor opere de manera tal, que, su período de detención coincida con el final de la fase termófila. La maduración y mineralización del compost se lleva a cabo en los patios específicos.

El reactor continuo consta de un cilindro cerrado, aislado térmicamente, con una capacidad de 1000 a 3000 m³ y una altura de 4 a 10 m (GATÓN, 2002).

El tiempo de retención del material es de alrededor de 15 días, luego del cual se pasa a un parque de maduración. El inconveniente de este tipo de reactores es el costo elevado de instalación y mantenimiento (SANDOVAL, 2010). La Ilustración 25 presenta el reactor vertical utilizado en los procesos de compostaje.

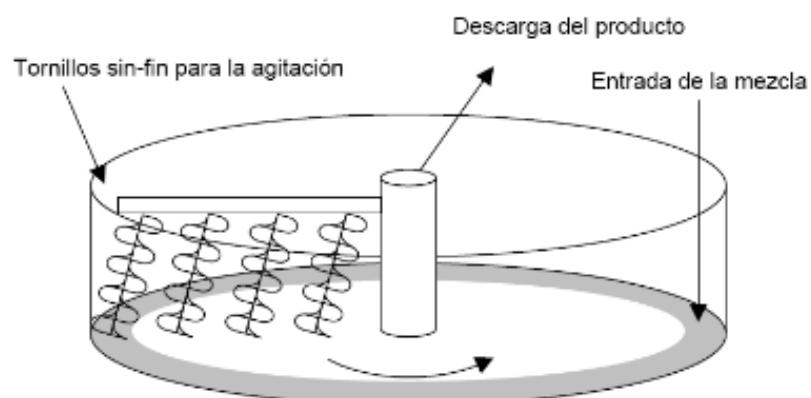
Ilustración 25 - Reactor Vertical



Fuente: Silva; Contrera (2019).

En el reactor vertical circular (Ilustración 26), el material es introducido desde la parte superior y la masa es volteada mediante un brazo giratorio, el material es retirado por el centro de la base. El tiempo de retención es de aproximadamente 10 días, luego del cual se procede a la maduración (SANDOVAL, 2010).

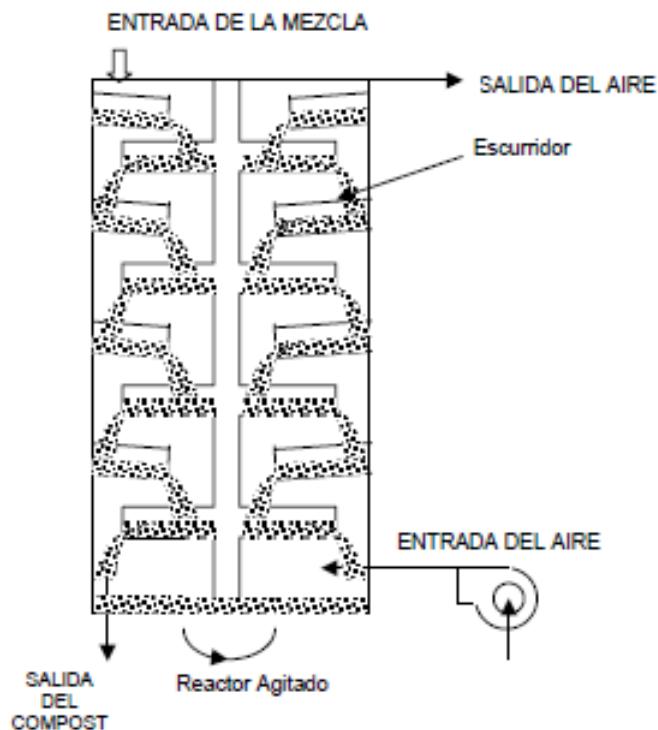
Ilustración 26 - Reactor Circular



Fuente: Sandoval (2010).

El reactor del tipo discontinuo (Ilustración 27) consta de un depósito cilíndrico de gran dimensión dividido en varios niveles, cada uno de los cuales de 2 a 3 m de altura. El material a ser compostado se coloca en el nivel más elevado y mecánicamente es volteado, de esta manera se riega la masa a la vez que desciende al nivel inferior; la fermentación es concluida cuando el material ha descendido al último nivel, luego del cual pasa al parque de maduración (GATÓN, 2002).

Ilustración 27 - Reactor Vertical Discontinuo



Fuente: Gatón (2002).

3.8.2.2 Reactor Horizontal

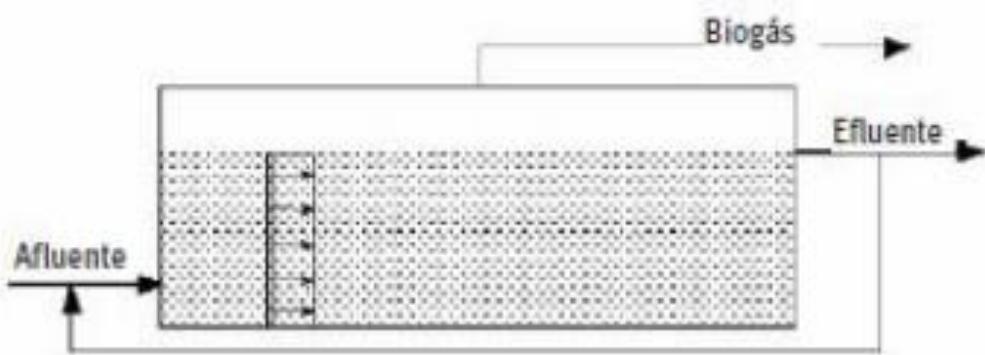
Se utiliza un cilindro dispuesto de manera horizontal, la entrada de los residuos se da a partir de una extremidad, y en la otra, la salida de los mismos luego de finalizada la fase termófila. En este tipo de sistema ocurre una aireación sobre presión para facilitar la oxigenación y el movimiento del compost a lo largo del cilindro. Posterior a la descomposición el compost es llevado a los patios de maduración dispuestos para el efecto (LUPION, 2019).

El material se somete al proceso de compostaje por un período de 15 a 30 días en condiciones estáticas (reactor túnel) o de volteo periódico (reactor rectangular dinámico). El reactor túnel en forma de caja rectangular, tiene 4 m de altura, 5,5 m de ancho y longitud variable según el volumen a tratar. La agitación se logra mediante sistemas hidráulicos y la

aireación se realiza por sistemas situados en la parte inferior. El tiempo de retención es de 14 días y el producto precisa usualmente un tratamiento posterior (NEGRO et al., 2000).

Respecto al reactor rectangular, el autor menciona que tiene forma de caja rectangular de 3 m de altura y 6 m de ancho, y longitud variable. El producto es colocado en el reactor desde la zona superior, y mediante un dispositivo es mezclado y se descarga en otra zona del reactor mediante una cinta transportadora y una grúa móvil. Con el mismo sistema se extrae el material ya compostado. La aireación se realiza por la zona inferior. El tiempo de retención es de 14 a 21 días y normalmente no necesita un tratamiento posterior. La Ilustración 28 exhibe un reactor horizontal.

Ilustración 28 - Reactor Horizontal



Fuente: Disponible en <http://oa.upm.es/47331/1/TFG_MARIO_RIAL_AXPE.pdf>

3.8.3 Comparación entre los Distintos Métodos de Compostaje

En el Cuadro 10 se presentan las ventajas y desventajas de los distintos métodos de compostaje.

Cuadro 10 - Ventajas y Desventajas de los Métodos de Compostaje

MÉTODO DE COMPOSTAJE	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Pilas Estáticas	Una vez que la pila está armada, necesitan volteos ocasionales para restaurar la porosidad. Bajos costos.	Compostaje lento. Mayor riesgo de olores. Las pilas deben ser pequeñas Susceptible a efectos climáticos.
Pilas de Volteo	Permite el compostaje de un gran volumen de residuos. La aireación permite un mejor secado y separación del material que las Pilas Estáticas.	Requiere de una mayor cantidad de volteos. Susceptible a efectos climáticos. Problemas de olores. Alta disponibilidad de terreno. Alto costo en maquinarias.
Pila Estática Aireación Natural	No requieren de volteo. Menor costo que el de Aireación Forzada.	Susceptible a efectos climáticos. No apropiada para materiales de fácil compactación. La mezcla inicial es crítica para mantener la aireación. Precisa espacio para maquinarias.
Pila Estática Aireación Forzada	No se requiere de espacio para las maquinarias. Menor tiempo de compostaje. Alcanza mayores temperaturas.	Puede provocar un gran secado de la pila.
Reactor	Sin influencia climática. Rápida descomposición. Mejor calidad del producto final. Aprovechamiento del espacio.	Alto costo inicial y operacional.

Fuente: Rojas (2003).

En el Cuadro 11 se presenta una comparación entre los métodos de compostaje Abiertos y Cerrados.

Cuadro 11 - Comparación entre Sistemas Abiertos y Cerrados

PARÁMETROS	SISTEMAS ABIERTOS	SISTEMAS CERRADOS
Superficie	Grande	Reducida
Tecnología	Sencilla	Sofisticada
Sistema	Discontinuo/Semicontinuo	Semicontinuo/Continuo
Inversión	De baja a moderada	De elevada a muy elevada
Costos de Explotación	Variables según estructurales	Elevados
Consumo Energético	Bajo/Medio	Medio/Elevado
Mano de Obra	Variable según la instalación	Más especializada
Duración de la descomposición	Mayor tiempo de duración	Menor tiempo de duración
Olores	Problemas si no hay aireación	Aireación controlada

Fuente: Adaptado Sandoval (2010).

3.8.4 Compostaje Comunitario y Doméstico

3.8.4.1 Método de Alambrado

Se utiliza una estructura cilíndrica vertical de alambrado, pudiendo ser hecha de diversos materiales. Para la mezcla del material bastaría con abrir los laterales y mezclar el mismo, ésta mezcla no es efectuada en todos los casos, pero debido a la constitución vertical del sistema, éste método posibilita una mejor aireación, debido a la mayor facilidad de circulación del aire por la masa del compuesto (LIMA, 2017; BIANCO; GUERMANDI; SIMÕES, 2019). En la Ilustración 29 se puede apreciar el compostaje por el método de alambrado.

Ilustración 29 – Compostera de alambrado



Fuente: Lupion (2019).

3.8.4.2 Hilera Estática

Consiste en un sistema de camadas superpuestas, donde los RS son colocados en la base, directamente sobre el suelo. Se cubre con materia seca cada camada, y al agregar una nueva camada de residuo sobre la materia seca y ésta es nuevamente cubierta con las hojas secas, aserrín u otros similares (LIMA, 2017). La Ilustración 30 indica el método de hileras estáticas.

Ilustración 30 – Método de Hilera Estática (A) Vista Interior (B) Vista Superficial



Fuente: Lupion (2019).

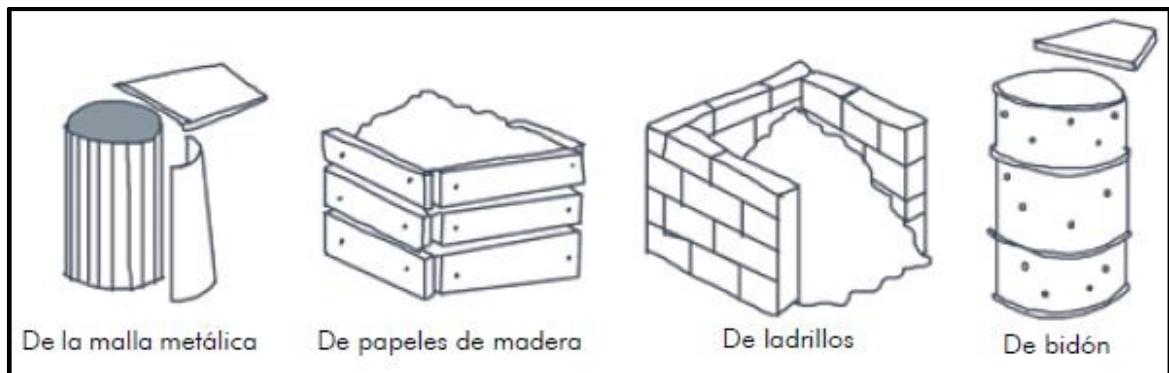
3.8.4.3 Método Indiano o Windrow

En este método las camadas son superpuestas en forma cuadrangular sobre un colchón constituido por hojas secas, aserrín u otros materiales secos, incluso el mismo compuesto ya maduro (inóculo de microrganismos descomponedores). Los RS fueron depositados en la zona central, mientras que la materia seca en superficies laterales y en la camada superior. Para aumentar la altura de colocación de los residuos orgánicos (RO) la materia seca superficial es dispuesta en los laterales, aumentando la altura de las paredes y posibilitando compostar mayor cantidad de masa, la cual es dispuesta sobre los RO parcialmente descompuestos (LIMA, 2017).

3.8.4.4 En Recipientes

Constituyen sistemas cerrados, protegen al material de las acciones climáticas como el viento o lluvias, favorece el mezclado, la extracción de lixiviado y permite el control de vectores. La desventaja del método es que podría presentar altas temperaturas, por lo cual el control de los parámetros es de gran importancia, durante altas temperaturas es posible la adición de suelo (10%) como un regulador de temperatura. El tiempo aproximado de maduración es de seis a diez semanas (ROMÁN; MARTÍNEZ; PANTOJA, 2013). En la Ilustración 31 se pueden observar los recipientes utilizados para el compostaje.

Ilustración 31 – Recipientes para Compostaje



Fuente: Román, Martínez, Pantoja (2013).

3.9 CARACTERIZACIÓN DEL COMPOST

El compost producido mediante el proceso del compostaje tiene como principales características la presencia de humus y nutrientes minerales y su calidad es función de la mayor o menor cantidad de éstos elementos (MONTEIRO et al., 2001).

La calidad del compost además de verse afectado por el tipo de material que se composta, es influenciada por el desarrollo del proceso en sí, por la procedencia de la materia prima, el tipo de recogida, y por el tratamiento del residuo (tipo de tecnología, equipamiento, funcionamiento, organización y seguridad en el trabajo) (SOLIVA; LÓPEZ, 2004).

La calidad no solamente debe ser controlada en el producto final, sino que ésta dependerá además de los controles que se realicen en las materias primas, durante el proceso y en el producto final. Los diferentes materiales que se pueden compostar determinan los tipos de compost que pueden obtenerse, esta diversidad aumenta la dificultad de establecer sistemas para valorar la calidad del compost (GÓMEZ, 2006).

Los usos del compost son variados y las exigencias para cada uno difieren. Es importante establecer qué tipo de características se deben tener en cuenta cuando el producto se fabrica con una finalidad determinada. Habitualmente la calidad del compost se corresponde más con la ausencia de contaminantes, un aspecto aceptable y un producto de fácil aplicación, que con el contenido en materia orgánica estabilizada y fitonutrientes, conforme a la autora. En la Tabla 2 se indica las propiedades necesarias de un compuesto para ser comercializado, según la OMS.

Tabla 2 - Propiedades generales de un compost para ser comercializado según la OMS

PROPIEDADES	RANGO NORMAL
Contenido en humedad (%)	30-50
Materia inerte (%)	30-70
Contenido materia orgánica (%)	10-30
pH	6-9
Tamaño máximo de las partículas (mm)	2-10

Fuente: Fernández (2010).

3.9.1 Madurez del Compost

La madurez se refiere al grado de humificación del material, depende del uso final que se le vaya a dar al material, y, por consiguiente, requiere de una valoración sobre si el compost es apropiado o no para el uso al que se destina. Igualmente, es importante tener en cuenta que todos los usos del compost requieren un producto estable y libre de componentes fitotóxicos (GÓMEZ, 2006).

Son numerosos los métodos posibles para indicar la madurez del compost, pero aún no se ha definido un método fiable, consecuente y que cuantifique la madurez para todos los tipos de compost, y que, además, sea universalmente aceptado, establece Gómez (2006).

3.9.2 Métodos para determinar el Grado de Madurez del Compost

Para alcanzar efectos positivos con la aplicación del compost, éste debe ser lo suficientemente maduro, de lo contrario la materia orgánica poco estabilizada seguirá el proceso de descomposición en el suelo pudiendo causar inconvenientes. Para evitar posibles adversidades es conveniente la evaluación de la madurez del mismo (NEGRO et al., 2000).

3.9.2.1 Test Físico

a) Olor

El compost maduro debe tener ausencia de olor desagradable, al contrario, debe presentar un olor característico al humus o tierra mojada, producido por los actinomicetos de acuerdo a Gatón (2002).

b) Color

Durante el compostaje tiene lugar un proceso de oscurecimiento o melanización del material como consecuencia de la rápida humificación de la materia orgánica. La formación de zonas más claras en el interior del montón podría indicar problemas de anaerobiosis durante el proceso del compostaje (NEGRO et al., 2000).

c) Temperatura Estable

La evolución de la temperatura es considerada como un reflejo de la actividad microbiana involucrada, que decrece cuantiosamente al final del proceso, disminuyendo la temperatura del compost de 60 - 70°C hasta llegar a valores de temperatura ambiente. Por lo tanto, el compost es considerado maduro cuando la curva de temperatura se ha estabilizado y no varía con los volteos del material (NEGRO et al., 2000).

3.9.2.2 Métodos basados en el estudio de la evolución de parámetros de actividad microbiana

“Estos métodos están basados, en la hipótesis que establece que la madurez de un compost se alcanza por estabilidad biológica del producto. El grado de estabilidad se puede determinar directamente a partir del conteo de la biomasa microbiana o de medidas de la actividad metabólica o bien, indirectamente, por medio del estudio de los constituyentes fácilmente biodegradables o su susceptibilidad a la degradación” (NEGRO et al., 2000).

3.9.2.3 Métodos basados en el estudio de la materia orgánica humificada del compost

El grado de madurez del compost se puede relacionar con las características de los compuestos húmicos presentes, especialmente teniendo en cuenta su grado de polimerización, tasa de extracción y su riqueza en el compost (NEGRO et al., 2000).

3.9.2.4 Test Químico

Conforme al autor Negro et al. (2000):

a) Relación C/N (Fase Sólida)

El compost es considerado maduro cuando su relación C/N es menor de 20 y próximo a 15, pudiendo tener un valor superior, ya que gran parte del carbono orgánico, al encontrarse en formas resistentes como celulosas o ligninas, no puede ser utilizado inmediatamente por los microorganismos.

b) Relación C/N (Extracto Acuoso)

El compostaje es la degradación bioquímica de la materia orgánica por acción de microrganismos, los componentes solubles son disueltos en agua y asimilables por los mismos.

Los compuestos insolubles son transformados enzimáticamente en compuestos solubles y posteriormente absorbidos por las células microbianas.

Se puede estipular la maduración del compost basado en la determinación del C orgánico y del N orgánico en los extractos acuosos del material, éste se reduce a medida que prospera la degradación del residuo, hasta lograr la estabilización entre 5 y 6, cuando el producto ha madurado, por lo que puede ser utilizado como parámetro de madurez.

c) Determinación de la DQO

Radica en la oxidación del material mediante dicromato potásico y su valoración posterior con sulfato ferroso amónico.

d) pH

El pH aumenta paulatinamente durante la estabilización del material, llegando a valores de 7 u 8. Valores inferiores indicarían la presencia de anaerobiosis y por consiguiente la inmadurez del producto final.

e) Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Numerosos estudios realizados con compost provenientes de variados RO y con abonos orgánicos han demostrado según el autor, que la CIC se acrecenta con el aumento del grado de estabilidad de la materia orgánica.

f) Conductividad Eléctrica

La conductividad del compost puede afectar al test de germinación pudiendo oscilar entre los 440 y los 6590 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Lo anhelado son valores dentro del rango de los 1500-2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

3.9.2.5 Test Biológico

Proveen un valor de la actividad de la biomasa microbiana o determinan algunos de los constituyentes biodegradables y susceptibles de degradación, pueden ser apropiados para establecer el grado de estabilidad de un compost conforme a Gatón (2002).

a) Métodos Respirométricos

Miden el consumo de O₂ de los microorganismos en una suspensión preparada con una muestra de compost; si el compost no está suficientemente estabilizado, dicho consumo será elevado y si existe una alta estabilidad el consumo será menor. Estos métodos son muy bien considerados para para determinar la estabilidad, no obstante, algunos de los inconvenientes que presentan son, que el proceso de incubación puede ser relativamente lento y que la complejidad de los aparatos sea más o menos sofisticada (ADANI; GENEVINI; LOZZI, 2001).

b) Parámetros bioquímicos de la biomasa del compost

Se pueden medir las variaciones de algunos parámetros bioquímicos en la fase de fermentación como en la de enfriamiento, como ser la actividad enzimática (enzimas hidrolíticas) y la concentración de ATP. Estos parámetros tienden a disminuir con el tiempo de compostaje, este decaimiento ocurre durante la etapa termogénica y se completa cuando la temperatura se sitúa entre 50 y 60 °C (GATÓN, 2002).

c) Test de Germinación

Consiste en determinar el poder germinativo de un compost, en placas petri y en condiciones idóneas de germinación (GATÓN, 2002).

d) Ensayos de respuesta Vegetal

Permiten evaluar el efecto del compost sobre la producción vegetal, utilizando diferentes tipos de suelos y como planta testigo *Lolium rigidum*, debido a su capacidad de extracción de los nutrientes del suelo y porque admite cortes sucesivos con los que valorar la acción del compost sobre la producción de biomasa en distintos periodos de tiempo (NEGRO; SOLANO, 1996).

3.9.3 Factores Limitantes para el Uso del Compost

3.9.3.1 Microrganismos Patógenos

Luego de un buen proceso de oxidación, y una buena fase de estabilización, el producto final debe estar prácticamente exento de microorganismos patógenos.

Gatón (2002) menciona que, en el caso de problemas de aireación o compactación, lo que causaría la no destrucción de la totalidad de patógenos, es conveniente someter al material a una fase de termogénesis antes de emplearse en agricultura.

Además, indica que los residuos provenientes de la fracción orgánica de RSU y de la poda municipal, contienen, en general, menor número de microorganismos patógenos y resulta improbable que resistan las temperaturas existentes en la fase termofílica.

El Cuadro 12 presenta la temperatura y tiempo de exposición necesarios para la eliminación de algunos microrganismos presentes en el compost.

Cuadro 12 - Temperatura y Tiempo de exposición para la destrucción de patógenos

ORGANISMOS	TEMPERATURA Y TIEMPO DE EXPOSICIÓN
Salmonella thyphosa	Son suficientes 30 min a 55-60°C, no se desarrolla a temperaturas superiores a 46°C
Salmonella sp.	Se destruyen al exponerse a 1 hora a 55°C o 15-20 min a 60°C
Shigella sp.	Se destruyen al exponerse 1 hora a 55°C
Escherichia Coli	La mayoría mueren al exponerse 1 hora a 55°C o 15-20 min a 60°C
Taenia Saginata	Se eliminan en unos pocos minutos a 55°C
Larvas de Trichinella spiralis	Mueren rápidamente a 55°C e instantáneamente a 60°C
Streptococcus pyogenes	Mueren después de 10 min a 54°C
Mycobacterium tuberculosis var. hominis	De 15-20 min a 66°C
Corynebacterium diphtheriae	Se elimina por exposición, 45 min a 55°C
Huevos de Ascaris lumbricoides	Mueren en menos de 1 hora a 55°C

Fuente: Adaptado Golueke (1975).

3.9.3.2 Contaminantes Orgánicos

Estos contaminantes se presentan cuando no hay una adecuada colecta selectiva de materiales y un inadecuado control durante el proceso. Al separar los residuos tóxicos y

peligrosos de los RSU, el riesgo de contaminación disminuye significativamente conforme a Gatón (2002).

3.9.3.3 Contaminantes Inorgánicos

Es un factor muy importante a tener en cuenta, especialmente para usos en la agricultura, debido a que algunos metales, a partir de cierto nivel de concentración, podrían ser tóxicos para las plantas. El nivel de peligrosidad va ligado a la toxicidad y permanencia, incluyendo la capacidad de las plantas de absorber los metales (GATÓN, 2002).

3.9.3.4 Exceso de Nutrientes

La abundancia de N_2 se puede lixivar cuando se encuentra en forma de nitratos, provocando la contaminación de las aguas subterráneas.

También la utilización de compost inmaduro, en el que la relación C/N es baja, puede causar una alta volatilización de nitrógeno en forma de amonio, lo que puede ocasionar problemas de fitotoxicidad sobre la germinación de semillas (GATÓN, 2002).

3.9.3.5 Exceso de Salinidad

Según Sandoval (2010) el exceso de salinidad debido al amplio uso del cloruro de sodio en los alimentos influye negativamente en la capacidad de germinación de semillas y en el crecimiento de plantas, además de deteriorar la estructura del suelo.

3.10 APLICACIONES DEL COMPOST EN ÁREAS DEGRADADAS

El Manual de Directrices para la Recuperación de Áreas Degradadas (IBAMA) (1990)⁵, establece que la degradación ocurre cuando la vegetación y la fauna autóctonas de un lugar son removidas, expulsadas o destruidas; se pierde, remueve o entierra la camada superficial del suelo o cuando el caudal del sistema hídrico es alterado a la vez que ocurre la inmovilización socio económica de la zona (apud MARTÍN, 2011).

⁵INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. Manual de recuperação de áreas degradadas pela mineração: técnicas de revegetação. Brasília, 1990.

Conforme a Blum (1998)⁶ la degradación del suelo consiste en una pérdida o reducción de energía del sistema. Si el sistema basa sus funciones y usos en flujos de energía, cuando éste se encuentra degradado sufre pérdidas o disminuciones de la misma (apud MARTÍN, 2011).

3.10.1 El Compost en la Erosión del Suelo

El material orgánico puede utilizarse de tres maneras en el control de la erosión conforme a Mukhtar (2005), como mantas de compost para la erosión en pendientes pronunciadas, bermas de compost donde las partículas son más gruesas para filtrar gran cantidad de agua y controlar el movimiento de sedimentos o también como compost socks para el control de sedimentos y otros contaminantes, controlan el flujo de aguas pluviales y retienen sedimentos desde arriba de la pendiente, retiene la escorrentía y el sedimento de la pendiente misma.

Un estudio realizado por Demars (1998) mostró que la aplicación del compost disminuyó la pérdida de suelo en un 86% en comparación con suelos desnudos, y además los sedimentos que alcanzaron las aguas superficiales colindantes disminuyeron en un 99% en comparación con las cercas de limo y el 38% en comparación con la hidrosiembra. El mismo menciona que el compost puede aumentar la infiltración del suelo hasta en un 25%.

Conforme Risso (2015) el compost favorece el control la erosión a través de:

- El aumento de la infiltración de agua en la superficie del suelo;
- La reducción de la escorrentía y el transporte de partículas del suelo;
- El incremento del crecimiento de plantas y la cobertura del suelo;
- La disminución del desplazamiento de partículas del suelo;
- El aumento de la capacidad de retención de agua del suelo;
- El alivio de la compactación del suelo al aumentar el mismo su estructura.

Los tipos de métodos de implementación del compost, ya sea como mantas (Ilustración 32), bermas (Ilustración 33) o compost socks (Ilustración 34) dependerá de la pendiente del sitio, la cantidad de lluvia potencial, la actividad alrededor del sitio y el establecimiento previsto de vegetación (RISSE, 2015).

⁶ BLUM, W.E.H. Basic Concepts: Degradation, Resilience and Rehabilitation. In: LAL, R.; BLUM, W.E.H., VALENTINE, C.; STEWART, B.A. Methods for assessment of soil degradation. Boca Raton: CRC Press, 1998.

Ilustración 32 – Manta de Compost



Fuente: Risse (2015).

Las mantas de compost pueden controlar la erosión en áreas perturbadas como sitios de construcción y áreas de tierra perturbada o excavada, con una pendiente aproximada de 4:1. El propósito principal de la capa de compost es la de proteger la superficie hasta que la vegetación sea restablecida, es importante tener en cuenta la calidad del producto aplicado de forma a garantizar el crecimiento de la vegetación (RISSE, 2015).

Ilustración 33 – Bermas de Compost



Fuente: Risse (2015).

Según Risse (2015) su utilización es habitual en pendientes pronunciadas (mayores a 4:1) con alto potencial erosivo, la berma de filtro permite que el agua de escorrentía penetre y continúe fluyendo mientras los sedimentos y contaminantes son filtrados, además ralentiza el flujo permitiendo el asentamiento de las partículas del suelo.

Ilustración 34 – Compost Socks



Fuente: Risse (2015).

Cada método tiene sus ventajas, y la elección dependerá de la pendiente del sitio a tratar, la cantidad de lluvia potencial, la actividad alrededor del sitio y el establecimiento previsto de la vegetación, de acuerdo a lo expuesto por Risse (2015).

3.10.1.1 Parámetros a considerar

Los parámetros más significativos a tener en cuenta, de acuerdo a lo expuesto por Risse (2015):

- pH: la amortiguación del pH del suelo a través de la aplicación del compost puede aumentar la vegetación, debe estar comprendido entre valores de 6 a 8, para la revegetación es recomendable valores cercanos a 7.
- Materia Orgánica: un mayor contenido de la misma mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, ayuda al establecimiento vegetal. Debe oscilar entre valores de 40 y 70%.
- Relación C/N: un factor fundamental considerado en la madurez del compost, es importante tener en cuenta que el compost aplicado debe ser considerado maduro.
- Contenido de N, P, K: el aporte de macronutrientes favorece a la revegetación del suelo.
- Humedad: comprendido entre valores de 20 a 50 %, las compostas más secas son recomendables para áreas propensas a fuertes precipitaciones debido a su mayor

absorción de agua, y mayor retención de contaminantes, disminuyendo de esta manera la posibilidad de lixiviación de aguas tanto superficiales como subterráneas

3.10.2 Usos del Compost en Suelos Contaminados por Metales Pesados

El compost puede ser utilizado para la remoción de metales pesados, especialmente, cobre (Cu), zinc (Zn) y níquel (Ni). Como resultado de un estudio Kocasoy; Güvener (2009) concluyeron que el metal que presentó mayor remoción a través de la aplicación de composta fue el Cu, seguido del Zn y Ni, en tanto el cromo (CR) fue el metal con menor remoción.

Fornes et al. (2009) afirma que se genera un efecto bioestimulante sobre la población microbiana autóctona, con el aporte de nutrientes a un entorno contaminado mediante la aplicación del compost.

Las compostas a corto plazo, acrecientan el rendimiento y la profundidad de enraizamiento, promueven la disminución de captación de metal por los vegetales, aumentan el pH y estado nutricional del suelo (FARRELL et al., 2010a).

En otro un estudio realizado por Farrell; Jones (2010b) comprueban el efecto beneficioso de diversos compost, provenientes de RSM, en un suelo contaminado por arsénico (As), Cu, plomo (Pb) y Zn, en condiciones muy ácidas, como resultado se determinó que, a excepción del As, todas las compostas disminuyeron las concentraciones de los elementos potencialmente tóxicos del suelo y aumentaron los valores de los nutrientes y el pH.

En los procesos de compostaje los hongos son muy eficientes en el proceso de detoxificación de áreas contaminadas por metales pesados, se puede afirmar por lo tanto que el compostaje es un buen reservorio de especies microbianas útiles para tal efecto, especialmente cuando se aplican las células en etapa de crecimiento (MARTÍN, 2011).

Los ROM, juntamente con residuos verdes, presentan un PH alcalino y valores elevados del coeficiente de distribución (Kd), por lo que este tipo de compostas resultan adecuados para la recuperación de los suelos contaminados (VENEGAS; RIGOL; VIDAL, 2015).

Con el fin de disminuir los niveles de biodisponibilidad de los metales pesados, ha sido aplicado el compost tradicionalmente como una fuente de sustancias húmicas de acuerdo a Walker et al. (2004).

Según Martín (2011) el proceso del compostaje además de ser un tratamiento que reduce los niveles de concentración de metales pesados en los RO, funciona como un reservorio de especies microbianas, capaces de bioacumular y biotransformar este tipo de contaminantes.

3.10.2.1 Parámetros a considerar

- pH: de acuerdo con Julca (2017) es el factor principal de control de la disponibilidad del plomo para las plantas, los PH alcalinos mejoran la solubilidad de metales y su absorción por las raíces de las plantas.
- Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC): Baize (2001) afirma que el aumento del CIC provoca un aumento en la disponibilidad de los metales para las plantas, ya que aumenta la capacidad del suelo de fijar metales.
- Contenido de materia orgánica: los suelos con alta cantidad de materia orgánica presentan un mejor CIC. La materia orgánica tiene la habilidad de enlazar cationes y retener elementos contaminantes (SCHINDLER, 2009).

3.10.3 Usos del Compost para la Mejora de Nutrientes (Agricultura)

El compost del residuo, cuando es preparado técnicamente, puede mejorar las propiedades físicas, químicas, y bilógicas del suelo, de allí su clasificación como abono orgánico o como acondicionador del suelo (LIMA, 1985).

De acuerdo a Bidone; Povinelli (1999) el compost puede ser utilizado como re acondicionador de suelos, aumenta la disponibilidad de macro y micronutrientes para las plantas en general, tiene un efecto controlador sobre las plagas de plantas, mejora el aprovechamiento de fertilizantes minerales y activa trascendentalmente la vida microbiana. Proporciona hábitat y alimento para organismos benéficos del suelo y lo inocula con organismos beneficiosos como bacterias fijadoras de nitrógeno.

Se puede observar en el Cuadro 13 los efectos de la materia orgánica humificada en las propiedades del suelo.

Cuadro 13 - Efectos de la Materia Orgánica en Suelos Cultivados

PROPIEDADES DEL SUELO	EFECTOS DE LA MATERIA ORGÁNICA HUMIFICADA
Físicas	Aumento de la capacidad calorífica Reducción de las oscilaciones térmicas Agregación de las partículas elementales Da soltura a los arcillosos y cohesión a los arenosos Aumenta la estabilidad estructural Aumenta la permeabilidad hídrica y gaseosa Facilita el drenaje Reduce la erosión Aumenta la capacidad de retención hídrica Reduce la evaporación Mejora el balance hídrico
Químicas	Aumenta el poder tampón Regula el PH Aumenta la capacidad de cambio catiónico Forma fosfohumatos Forma quelatos Mantiene las reservas de nitrógeno
Biológicas	Favorece la respiración radicular Favorece la germinación de las semillas Favorece el estado sanitario de los órganos subterráneos Regula la actividad microbiana Es fuente de energía para organismos heterótrofos Modifica la actividad enzimática Mejora la nutrición mineral

Fuente: Adaptado Urbano (1992).

3.10.3.1 Parámetros Importantes

Según Román; Martínez; Pantoja (2013) una de las mayores ventajas de la aplicación del compost es el aporte de los siguientes macronutrientes:

- Contenido de N: el aporte de nitrógeno ayuda al crecimiento de las plantas, ya que participa de los procesos principales del desarrollo de las mismas, además de ayudar a la absorción de otros nutrientes.
- Contenido de P: es importante en la transferencia de energía, permite la mayor eficiencia de la fotosíntesis.
- Contenido de K: es fundamental en la síntesis de carbohidratos y proteínas, por lo tanto, en la estructura de las plantas, ayuda a mejorar el régimen hídrico, consecuentemente mejora su tolerancia a sequías, heladas y salinidad.

- pH: de acuerdo a diversos autores, el pH es importante para la absorción de sustancias minerales, éstos no deben ser muy elevados para producir una óptima absorción de nutrientes. El rango óptimo de valores de PH depende del tipo de cultivo.
- CE: una elevada CE en el suelo puede ejercer un efecto fitotóxico, provocando la inhibición del desarrollo vegetal (Fernández, 2010), es deseable un valor por debajo de 200 uS/cm.

Además, es importante considerar otros parámetros como ser el contenido de metales pesados, debido a su impacto en la cadena trófica a nivel terrestres y acuático en elevadas concentraciones. La concentración de metales pesados es un factor que determina la viabilidad para fines agrícolas.

En la Tabla 3 y Tabla 4 respectivamente se pueden observar los criterios de calidad del compost como abono orgánico y las fracciones estándar del compost.

Tabla 3 - Criterios de Calidad del Compost como Abono Orgánico

Parámetro	Unidad	Mínimo	Promedio	Máximo
Pérdida de ignición	% TS	25	35	45
Residuo de ignición	% TS	55	65	75
Contenido de agua	%	35	36	50
Contenido de proteínas	%	30	33	35
Contenido de celulosa	%	3	4	5
Densidad	kg/m ³	550	680	850
Contenido de sal soluble	kg/m ³	2	4	8
Conductividad eléctrica	mnhos/cm	2	2.5	4
pH		7.0	7.6	8.3
N total	% TS	0.8	1.1	1.5
N mínimo	mg/l compost	100	150	400
Fósforo (P ₂ O ₅ total)	% TS	0.4	0.7	1.0
Fósforo (P ₂ O ₅ soluble)	mg/l compost	500	1200	2000
Potasio (K ₂ O total)	% TS	0.6	1.2	1.5
Potasio (K ₂ O soluble)	mg/l compost	1000	2500	5000
Magnesio (MgO total)	% TS	0.2	0.4	0.7
Magnesio (MgO soluble)	mg/l compost	150	250	500
Calcio (CaO total)	% TS	2	3	6

Fuente: Adaptado Röben (2002).

Tabla 4 - Fracciones Estándar del Compost

FRACCIÓN	DIÁMETRO DE LAS PARTÍCULAS	APLICACIONES DEL COMPOST
Compost fino	< 12 mm	Abono, mejoramiento del suelo
Compost mediano	12 – 25 mm	Abono, mejoramiento del suelo, material de filtros biológicos
Compost grueso	> 25 mm	Material de estructura para mejoramiento del suelo, material de estructura para compostaje, material de cobertura del relleno sanitario, material de relleno para trabajos de construcción o de arquitectura de paisaje

Fuente: Adaptado Röben (2002).

En las Tablas 5 y 6 se exhiben las características del compost para la agricultura conforme a la Norma mexicana NADF 020 (2011) y las concentraciones de metales pesados presentes en compost para la agricultura orgánica según la norma chilena NCh 2880 (2005).

Tabla 5 – Características del Compost para la agricultura

PARÁMETRO	TIPO DE COMPOSTA		
	Tipo A	Tipo B	Tipo C
Humedad	25 – 35 % en peso	25 – 35 % en peso	25 – 45 % en peso
PH	6.7 – 7.5	6.5 – 8.0	6.5 – 8.0
CE	< 4 dS/m	< 8 dS/m	< 12 dS/m
MO	> 20 % MS	> 20 % MS	> 25 % MS
C/N	< 15	< 20	< 25
Macronutrientes (N, P, K en % MS)	De 1% a 3% en cualquiera de ellos y su suma \leq 7% debe portar la leyenda de mejorador de suelos. Si cualquiera excede 3% o la suma es > 7% debe portar la leyenda de composta para nutrición vegetal y se indicarán las cantidades para cada macronutriente.		
Granulometría	\leq 10 mm	\leq 30 mm	\leq 30 mm
Fitotoxicidad (IG)	\geq 85%	\geq 75%	\geq 60%
Diferencia de temperatura con el ambiente medida a una Prof. \geq 50 cm	\leq 10°C	\leq 10°C	\leq 15°C

Tipo A: sustrato en viveros y sustituto de tierra para maceta.

Tipo B: agricultura ecológica y reforestación.

Tipo C: paisaje, áreas verdes urbanas y reforestación.

Fuente: Adaptado Norma mexicana NADF 020 (2011).

Tabla 6 - Concentraciones de metales pesados presentes en compost para la agricultura orgánica

METALES PESADOS	CONCENTRACIÓN MÁXIMA EN MG/KG DE COMPOST (BASE SECA)
Arsénico	10
Cadmio	1
Cobre	50
Cromo	60
Mercurio	1
Níquel	10
Plomo	50
Selenio	6
Zinc	60

Fuente: Adaptado a la norma chilena NCh 2880 (2005).

3.11 CONSIDERACIONES ECONÓMICAS

3.11.1 Estudio de Factibilidad para una Planta de Compostaje

En el caso de la construcción de una planta de compostaje, es necesario realizar estudios de la situación actual y las posibilidades del municipio en cuestión

De acuerdo con Röben (2002), un estudio de factibilidad debería comprender los siguientes puntos:

- Desechos Sólidos
 - Cantidad de desechos sólidos y biodegradables
 - Verificar si existe separación de los residuos en la fuente
 - Consideración de desechos biodegradables especiales (industria alimentaria, agropecuaria, avicultura, etc.)
- Lugar de emplazamiento
 - Posibilidad de construir en cercanías al relleno sanitario
 - Distancia al centro de la ciudad
 - Distancia al relleno
 - Área disponible (considerando la tecnología a ser implementada, cantidad de material, área de almacenamiento y tratamiento de aguas lixiviadas)
 - Material del suelo
 - Costo del terreno
- Clima Local
 - Nivel de Precipitaciones
 - Temperatura

- Operación de la Planta
 - Personal disponible en el municipio
 - Nivel de formación del personal
 - Capacitaciones necesarias
 - Análisis económico y técnico
- Tecnología Seleccionada
 - Planta manual o mecanizada
 - Tipo de proceso seleccionada
 - Unidades o procesos que pueden ser mecanizados
 - Presupuesto de inversión y operación
 - Ventajas y desventajas técnicas
 - Capacidad financiera del municipio

3.11.2 Factores Intervinientes en un Estudio de Costos

La implantación de una usina de reciclaje y compostaje presupone la elaboración previa de un estudio de viabilidad económica en el cual deben ser analizados los siguientes aspectos de acuerdo a Monteiro et al. (2001):

3.11.2.1 Inversión

- Licenciamiento Ambiental;
- Terreno y legalizaciones de tierra;
- Proyectos arquitectónicos y de ingeniería;
- Obras de infraestructura;
- Adquisición de máquinas y equipamientos;
- Gastos de capital y depreciación de los equipamientos.

3.11.2.2 Costos

- Personal en general;
- Gastos operacionales y de manutención;
- Gastos de energía y otras tarifas;
- Gastos de reposición de piezas y equipamientos;
- Gastos con gerenciamiento y administración.

3.11.2.3 Ingresos

- Directos: comercialización de reciclables y del compost.
- Indirectos: reducción de costos de transporte al aterro y del volumen de residuos que llegan al mismo.
 - Ambientales: economía del consumo de energía y recursos naturales, reducción de carga de residuos poluentes en el ambiente.
 - Sociales: oferta de empleo digno y formal para los catadores de residuos y concientización ambiental de la población.

3.12 CONSIDERACIONES GENERALES

3.12.1 Alternativas de Compostaje

Se presenta en el Cuadro 14 las recomendaciones a tener en cuenta para algunos procesos de compostaje de acuerdo con Röben (2002):

Cuadro 14 – Alternativas de Compostaje y Recomendaciones

ALTERNATIVA	SE RECOMIENDA EN LOS SIGUIENTES CASOS:	NO SE RECOMIENDA EN LOS SIGUIENTES CASOS:
Planta de compostaje completamente manual	<ul style="list-style-type: none"> - Municipio pequeño o mediano - Municipio con fondos escasos - Terreno barato - Terreno vasto - Mano de obra barata y suficiente - No hay personal calificado 	<ul style="list-style-type: none"> - Municipio grande - Terreno caro - Limitaciones de terreno - Mano de obra cara
Mecanización del pre-acondicionamiento (tamiz tambor, banda transportadora)	<ul style="list-style-type: none"> - No hay clasificación domiciliaria de los desechos biodegradables - Municipio muy grande - Presupuesto suficiente para inversión y operación 	<ul style="list-style-type: none"> - Municipio pequeño - Escasez de fondos
Mecanización del condicionamiento del producto (tamiz aireada)	<ul style="list-style-type: none"> - Se recomienda siempre cuando hay fondos disponibles 	<ul style="list-style-type: none"> - Escasez de fondos
Clasificación mecanizada del producto	<ul style="list-style-type: none"> - Muy grandes municipio - Fondos suficientes - Escasez de mano de obra 	<ul style="list-style-type: none"> - Municipio mediano o pequeño - Escasez de fondos

(Continua)

Cuadro 14 – Alternativas de Compostaje y Recomendaciones

(Continuación)

Compostaje mecanizado	<ul style="list-style-type: none"> - Muy grandes municipios - Fondos suficientes - Terreno caro - Existe mano de obra calificada - Si una compañía productora o vendedora de ese equipo ofrece asumir todos los costos de inversión para el derecho de vender el compost 	<ul style="list-style-type: none"> - Municipio pequeño - Escasez de fondos - Terreno vasto - Terreno barato - Mano de obra barata
Clasificación domiciliaria de desechos biodegradables	<p>Se recomienda en casi todos los casos, especialmente:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Municipios pequeños y medianos - Estructura urbana con bastante espacio, casas con jardines o patios - Clima moderado 	
Compostaje de desechos no clasificados	<ul style="list-style-type: none"> - Municipio muy grande que no puede introducir la clasificación domiciliaria rápidamente - Fondos suficientes para la mecanización del pre condicionamiento 	<ul style="list-style-type: none"> - En todos los casos donde es posible la clasificación domiciliaria

Fuente: Adaptado Röben (2002).

3.12.2 Aplicación del Compostaje en Paraguay

Es importante crear conciencia acerca de la importancia de la clasificación y separación de los residuos en la fuente de generación e incentivar la colecta selectiva de los mismos, de manera a que puedan ser tratados y promover así una gestión integrada de los RS.

El compostaje surge como una opción factible a la cantidad creciente de RSU generados y destinados a los vertederos en el país, permitiría disminuir el aporte de los RO a los rellenos sanitarios, además de ser una alternativa ambientalmente adecuada para el tratamiento de las áreas degradadas.

Considerando que la práctica del compostaje es muy poco utilizada en el país, y visando sus grandes bondades, surge como alternativa la aplicación inicial del proceso a escala doméstica y/o comunitaria.

A nivel de municipios, sería factible, implementar este tipo de tratamientos para el gerenciamiento de los RSOM, debido a las ventajas ya mencionadas anteriormente, como ser, una tecnología viable, económica, sencilla, ambientalmente recomendada y con múltiples aplicaciones.

Además, el compostaje in situ, podría ser aplicado como una metodología de gerenciamiento en los campamentos de obras viales, debido a la cantidad de residuos producidos, reduciendo de esta forma la cantidad de desechos que son destinados a los aterros sanitarios, en ocasiones construidos en cercanías del local por parte de las empresas contratistas, sin atender a todas las exigencias ambientales.

Procesos de compostaje como el de recipientes cerrados, del tipo alambrado o pilas estáticas, precisan de equipamientos sencillos, son adecuados para pequeñas áreas, requieren una baja inversión inicial y costo de mantenimiento, además de la simplicidad de la operación del procedimiento, y la rapidez con que el producto puede ser obtenido.

Otra ventaja de la utilización de los procesos de compostajes en las obras civiles, sería la aplicación en muchas ocasiones, en el mismo local de obras, del compost, atendiendo a las mejorías del medio físico.

Es importante mencionar que deben ser atendidos los requisitos de calidad del compost, para lo cual sería necesario adoptar una normativa a seguir para evaluar los parámetros más significativos que afectan al producto final, como ser el pH, la relación C/N, la concentración de los metales pesados, humedad y temperatura.

4 METODOLOGÍA

4.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

El trabajo realizado fue del tipo no experimental, de investigación documental, con enfoque cuantitativo, sin la manipulación de las variables en estudio.

Debido a que, en el presente trabajo, la investigación fue desarrollada a través de la metodología del análisis, se colectaron las informaciones, mediante una búsqueda bibliográfica seleccionada, en fuentes primarias y secundarias de confiabilidad, en el marco del tema abordado (SAMPLIERI; COLLADO; LUCIO, 2014).

El nivel descriptivo del trabajo consistió en identificar y describir los distintos procesos del compostaje, así como las características del producto final.

Se confeccionó tablas comparativas de los parámetros de calidad que debe cumplir el compost, conforme a las normas más adelante mencionadas, así como las diferencias entre las distintas normativas vigentes.

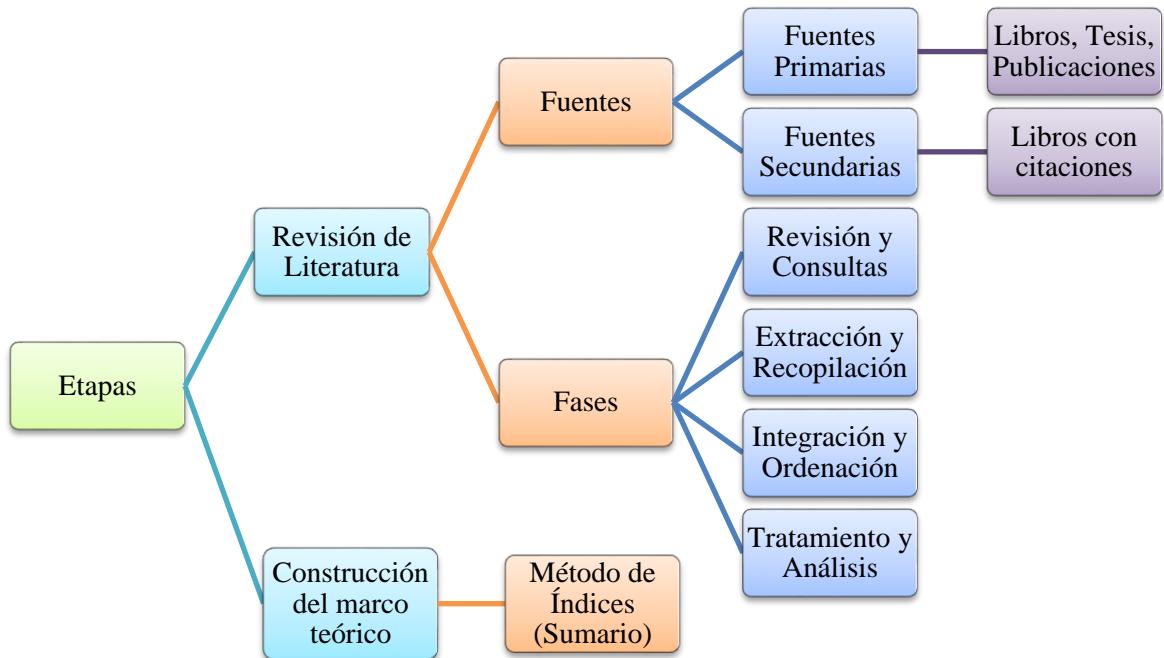
Además, a partir de antecedentes de compost elaborados, se realizó un análisis comparativo de los resultados de los parámetros que caracterizan a los mismos, en ese contexto fueron indicados los principales parámetros que deben ser evaluados; los distintos procesos y materiales de entrada, de forma a evaluar consecuentemente las modificaciones que ocasionan los mismos.

Asimismo, en el estudio también serán propuestas normativas para la reutilización de los residuos sólidos orgánicos del Paraguay, a partir de los métodos de compostaje.

4.1.1 Etapas

El fluograma presentado en la Ilustración 35, exhibe las etapas de investigación empleadas en esta investigación.

Ilustración 35 – Etapas de Investigación

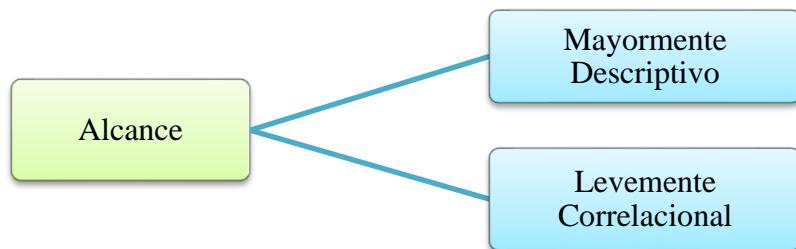


Fuente: Elaborado por la autora.

4.1.2 Alcance

El flujograma presentado en la Ilustración 36, refleja el alcance de la investigación de la presente investigación.

Ilustración 36 – Alcance de la Investigación



Fuente: Elaborado por la autora.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 NORMATIVAS RELACIONADAS AL USO Y CALIDAD DEL COMPOST

Se presenta en la Tabla 7, una comparación entre los límites microbiológicos (en compuestos) establecidos por las normas colombiana NRC 5167, chilena NCh 2880 y mexicana NADF 020 y el Real Decreto Español RDE 824.

Tabla 7 – Comparación de Límites Microbiológicos en Compost Establecidos por las Normas Colombiana, Chilena, Española y Mexicana.

Parámetro	NTC 5167 - 2004	NCh 2008 - 2005	RDE 824 - 2005	NADF 020 - 2011
Coliformes Fecales		< 1000 NMP/g		< 1000 NMP/g
Salmonella spp.	Ausente en 25 g de producto final	Ausente	Ausente en 25 g de producto final	< 3 NMP/g
Ascaris		Ausente		1 en 4 g
Escherichia coli			< 1000 NMP/g	
Enterobacterias totales	< 1000 UFC/g			

Fuente: Elaborado por la autora.

Los parámetros microbiológicos permiten determinar la calidad sanitaria del compost, los rangos admisibles para las diferentes normas, no presentan gran discrepancia.

En la Tabla 8 se exhiben los parámetros físicos máximos admisibles por las normas chilena NCh 2880, mexicana NADF 020 y la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Tabla 8 – Comparación de Parámetros Físicos Permitidos en el Compost – Normas Chilena, Mexicana y la OMS

Parámetro	Unidad	NCh 2880 - 2005		NADF 020 - 2011		OMS
		Clase A1	Clase B1	Clase A2	Clase B2	Clase C2
Tamaño de partículas	mm		≤ 15	≤ 10	≤ 30	≤ 30
Materias Inertes	%			Ausente		30 - 70
- Plásticos			≤ 0.05		$< 0.5\%$	$< 1\%*$
- Piedras			≤ 5		$< 3\%$	$< 5\%*$
- Vidrio y Metales			≤ 0.5		$< 1\%$	$< 2\%*$
Humedad	%	25 - 50		25 - 35	25 - 35	25 - 45
						30 - 50

*La suma de los porcentajes de impurezas debe ser menor al 5%

Clase A1: producto de alto nivel de calidad que cumple con las exigencias establecidas en la norma. Este producto no presenta restricciones de uso y es apto para la agricultura ecológica.

Clase B1: producto de nivel intermedio de calidad que cumple con las exigencias establecidas en la norma. Este producto puede presentar algunas restricciones de uso, para su utilización debe ser mezclado con otros elementos adecuados.

Clase A2: se recomienda su utilización en viveros y como sustituto de tierra para maceta.

Clase B2: agricultura ecológica y reforestación.

Clase C2: paisaje, áreas verdes urbanas y reforestación.

Fuente: Elaborado por la autora.

Los porcentajes de humedad permisibles en general se encuentran en rangos de 25 a 50, presentando los valores más bajos los de mayor calidad. El tamaño de las partículas para compostas de clase A no presentan diferencias significativas. En cuanto al contenido de materiales inertes, el rango de valores de la OMS es superior al de las normas chilena y mexicana.

Los parámetros químicos admisibles para las compostas, son comparados en la Tabla 9, considerando las normas chilena NCh 2880, mexicana NADF 020, los rangos establecidos por la OMS, Agencia de Protección Ambiental de los estados Unidos o United States Environmental Protection Agency (EPA) y la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes o American Association of State Highway & Transportation Officials (AASHTO).

Tabla 9 – Comparación de parámetros químicos permitidos en el compost, de acuerdo con las normas chilena, mexicana, los rangos establecidos por la OMS, EPA y la AASHTO.

Parámetro	Unidad	NCh 2880 - 2005		NADF 020 - 2011		OMS	EPA	AASHTO
		Clase A1	Clase B1	Clase A2	Clase B2			
pH		5 – 7.5		6.7 – 7.5	6.5 - 8	6.5 - 8	6 - 9	5 – 8.5
Conductividad Eléctrica	dS/m	≤ 5	5 - 12	< 4	< 8	< 12	< 10	< 5
Relación C/N		10 - 25	10 - 40	< 15	< 20	< 25		
Materia Orgánica	%	≥ 45	≥ 25	> 20	> 20	> 25	25 - 50	30 - 65
Contenido de N	%	≥ 0.8	≥ 0.8	1 – 3*		1 – 3*	0.4 – 3.5	
Contenido de P	%	≤ 0.1	≤ 0.1	1 – 3*		1 – 3*	0.3 – 3.5	
Contenido de K	%			1 – 3*		1 – 3*	0.5 – 1.8	

* Si suma es ≤ 7% (Composta mejorador de suelos), si la suma es > 7% o cualquiera excede 3% (Composta para nutrición vegetal)

Clase A1: producto de alto nivel de calidad que cumple con las exigencias establecidas en la norma. Este producto no presenta restricciones de uso y es apto para la agricultura ecológica.

Clase B1: producto de nivel intermedio de calidad que cumple con las exigencias establecidas en la norma. Este producto puede presentar algunas restricciones de uso, para su utilización debe ser mezclado con otros elementos adecuados.

Clase A2: se recomienda su utilización en viveros y como sustituto de tierra para maceta.

Clase B2: agricultura ecológica y reforestación.

Clase C2: paisaje, áreas verdes urbanas y reforestación.

Fuente: Elaborado por la autora.

Se puede observar que los rangos de valores establecidos son similares en todas las normas, no presentando un gran rango de diferencia entre los mismos.

En la Tabla 10 se aprecian los rangos permisibles para la concentración de metales, definidos por las normas colombiana NTC 5167 (2004), chilena NCh 2880 (2005), el Real Decreto Español RDE 824 (2005), la norma mexicana NADF 020 (2011), los rangos establecidos por la OMS y la guía de Australia Environment Protection Authority (EPA).

Tabla 10 – Comparación de los Límites de concentración de metales pesados en el compost

Parámetro	Unidad	NTC	NCh 2880	RDE 824			NADF 020		OMS	EPA
		5167		Clase A1	Clase B1	Clase C1	Clase A2	Clase B2	Clase C2	
Arsénico (As)	mg/kg	41	15				0.1	0.7	2	20
Cadmio (Cd)	mg/kg	39	2	0.7	2	3	0.7	1	3	15 - 40
Cobre (Cu)	mg/kg		100	70	300	400	70	70	400 - 500	90 - 260
Cromo (Cr)	mg/kg	1200	120	70	250	300	70	70	250	100
Mercurio (Hg)	mg/kg	17	1	0.4	1.5	2.5	0.4	0.7	3	1 - 5
Níquel (Ni)	mg/kg	420	20	25	90	100	25	60	100	60
Plomo (Pb)	mg/kg	300	100	45	150	200	45	120	200	200 - 400
Zinc (Zn)	mg/kg		200	200	500	1000	200	500	1200-1800	800 - 1200
										300

Clase A1: productos fertilizantes cuyo contenido en metales no superen los valores de la columna A1.

Clase B1: productos fertilizantes cuyo contenido en metales no superen los valores de la columna B1.

Clase C1: productos fertilizantes establecidos en la columna C1, no pueden aplicarse en suelos agrícolas en dosis superiores a 5 tn de materia seca por ha y año.

Clase A2: se recomienda su utilización en viveros y como sustituto de tierra para maceta.

Clase B2: agricultura ecológica y reforestación.

Clase C2: paisaje, áreas verdes urbanas y reforestación.

Fuente: Elaborado por la autora.

En el cuadro comparativo se exhiben mayor amplitud de variación en cuanto a los límites de concentración establecidos por las diferentes normas.

La NTC 5167 admite valores mayormente elevados en comparación a las demás normas, en lo que respecta a los parámetros en general.

Es importante destacar que las clases A1 y A2 correspondiente a las normas RDE 824 y NADF 020 presentan los mismos límites de concentración para todos los metales considerados, y es posible notar además que el Cd y Pb presentan los menores valores.

5.2 EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL COMPOST

Se presenta un análisis comparativo de los diferentes resultados de compost elaborados por los autores mencionados, por distintos procesos y con diferentes materiales de entrada.

5.2.1 Comparación de Distintos Métodos de Compostaje con el Mismo Material de Entrada

En la Tabla 11 se puede observar los resultados de los ensayos elaborados por Lima (2017) con compuestos orgánicos (cáscaras, legumbres y crudos), en los métodos de compostaje Indiano, de Alambrado y Estático, y con los mismos compuestos orgánicos además de restos de alimentos, en el método del Compost Total.

Tabla 11 – Propiedades Físicas y Químicas Determinadas en 4 Tipos de Compuestos Analizados por Lima (2017)

Parámetro	Unidad	Compost Total	Compost Indiano	Compost Alambrado	Compost Estático
Densidad	g/cm ³	0.61	0.52	0.87	0.79
Humedad	%	48.33	45.53	23.57	22.78
CRA*	%	54.93	65.26	22.75	43.43
pH en H ₂ O		6.5	7.4	7.7	6.4
CE	µS/cm	2200	665	709	157
C	%	10.15	8.29	3.63	7.00
H	%	1.72	1.31	0.79	1.28
N	%	1.06	0.63	0.36	0.60
Relación C/N		9.57	13.16	10.07	11.60

(Continua)

Tabla 11 – Propiedades Físicas y Químicas Determinadas en 4 Tipos de Compuestos Analizados por Lima (2017)

(Continuación)

Parámetro	Unidad	Compost Total	Compost Indiano	Compost Alambrado	Compost Estático
P	g/kg	2.31	2.01	2.01	1.35
K**	g/kg	1.33	1.58	1.99	0.66
Mg***	g/kg	0.2	1.3	1.3	0.9
Materia Orgánica	g/kg	376.17	418.70	193.92	218.19
Pb	mg/kg	11	3	6	21
Cd	mg/kg	1.3	< 0.06	< 0.06	0.5
Cr	mg/kg	1.8	5.9	6.1	4.5
Ni	mg/kg	1.6	< 0.8	< 0.8	1.7

CRA: capacidad de retención de Agua

K: potasio

Mg: magnesio

Fuente: Adaptado Lima (2017).

A pesar de presentar distintos valores de parámetros, para los diferentes métodos de compostaje, con el mismo material de entrada, en general el rango de valores se encontró dentro del promedio de límites de valores establecidos por las normas.

Los compostajes del tipo total e indiano presentaron porcentajes de humedad que superan por el doble del valor a los métodos de alambrado y estático.

Se puede observar que la CE del compost total mostro un valor muy superior al de los otros métodos.

El contenido de materia orgánica del compost indiano correspondió al mayor valor observado, mientras que el contenido de Pb del mismo método fue el menor valor observado.

En la Tabla 12 se exhiben los resultados de los ensayos elaborados por Guermandi (2015) con material de entrada compuesto por RO de restaurantes y viviendas universitarias (sin incluir carne, restos de alimentos, ni cocidos), pasto y aserrín, mediante el método de alambrado, en sus distintas variantes:

Tabla 12 – Propiedades Físicas y Químicas Determinadas en 4 Tipos de Compuestos Analizados por Guermandi (2015)

Parámetro	Unidad	LTR	LNTR	LC_NTNR	LPVC_NTNR
Humedad	%	54.76	56.43	66.67	64.17
pH		8.03	8.23	8.36	7.93
Materia Orgánica	%	83.57	81.83	81.13	86.18
Carbono (C)	%	38.13	38.02	38.65	40.40
Nitrógeno (N)	%	2.48	2.24	1.92	2.37
Relación C/N		15.38	16.95	20.13	16.93
CIC	mmol/kg	789.551	908.282	761.985	878.221
CRA	%	395.5	352.1	467.3	534.3
CE	dS/m	1.13	1.72	1.30	1.58
Plomo (Pb)	mg/kg	88.0	131.6	24.0	12.0
Cadmio (Cd)	mg/kg	< 0.04	< 0.04	< 0.04	< 0.04
Cromo (Cr)	mg/kg	2.8	11.0	23.2	2.0
Níquel (Ni)	mg/kg	42.2	48.0	29.2	26.0

LTR: Pila con residuos triturados y con revolcamiento quincenal.

LNTR: Pila con residuos no triturados y con revolcamiento quincenal.

LC-NTNR: Pila de control, sin revolcamiento y sin trituración.

LPVC-NTNR: Pila compuesta por tubos de PVC, sin revolcamiento y sin trituración.

Fuente: Adaptado Guermandi (2015).

De manera general, los parámetros de LPVC-NTNR y LC-NTNR fueron muy similares, así como los parámetros de LTR y LNTR, indicando tal vez, que, la diferencia entre el mezclado o no del material pudo haber influenciado los valores de los parámetros, sin embargo, entre los métodos presentados en el ensayo, el rango de valores difirió de manera poco significativa.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) del proceso tipo LNTR arrojó el valor más elevado, mientras que la capacidad de retención de agua (CRA) del proceso tipo LPVC-NTNR fue el de valor superior.

Las mayores divergencias se observaron en las concentraciones de los metales donde el Pb y el Ni del proceso tipo LNTR fueron los mayores.

Se puede apreciar en la Tabla 13 los resultados de los ensayos elaborados por Negret (2018) con RSO, utilizando para la obtención del compost el método de alambrado, a través de cuatro composteras, de forma a analizar el producto final mediante procesos diferentes.

Tabla 13 - Parámetros del ensayo Negret (2018)

Parámetro	Unidad	En Capas	Mezclado	Estático	Con Comida
Temperatura	° C	28.7	29.9	29	31.1
pH		6.8	6.7	6.9	7.1

Fuente: Adaptado Negret (2018).

Todos los valores obtenidos de pH a través distintos métodos, cumplieron con los requisitos de las normas internacionales. En este caso el pH varió de 6.7 a 7.1.

5.2.2 Comparación de Procesos Similares de Compostaje con Distintos Materiales de Entrada

Se exhibe en la Tabla 14 un cuadro comparativo con los distintos parámetros obtenidos por los autores citados, mediante el método de pilas revueltas mecánicamente, considerando distintos tipos de productos de entrada.

Tabla 14 – Comparación de Parámetros por el Método de Pilas Revueltas Mecánicamente en Compostas con Diferentes Tipos de Entradas.

Parámetro	Unidad	Gatón (2002)	Gatón (2002)	Massukado (2008)
		Tipo I*	Tipo II**	Tipo III***
Carbono Orgánico	%	21	20	12.11
Materia Orgánica	%	36	34	21.8
N total	%	2.5	2.1	0.95
C/N		8,2	9.4	12.75
pH		8.5	7.8	8.48
CE	µS/cm	1050	1278	1760
Humedad	%	24	45	33.57
Cobre (Cu)	mg/kg	252	210	57.76
Cadmio (Cd)	mg/kg	3	6	
Cromo (Cr)	mg/kg	57	72	
Níquel (Ni)	mg/kg	57	43	
Plomo (Pb)	mg/kg	120	129	
Zinc (Zn)	mg/kg	579	470	147.18

Tipo I: 90% FORSU + 10% PODA

Tipo II: 100% FORSU

Tipo III: RO de restaurantes y supermercados

Fuente: Elaborado por la autora.

Con distintos materiales de entrada, las concentraciones de metales, presentaron un amplio rango de valores, en cambio los demás parámetros en general, no variaron demasiado y se encontraron dentro de los límites establecidos por las distintas normas, sin embargo, es

preciso determinar el tipo de norma a ser utilizada para determinar si los límites de concentraciones fueron los adecuados.

Se observó que en la composta Tipo III el valor de la conductividad eléctrica (CE) fue la más elevada. Respecto al Cu y Zn del mismo tipo de composta, los valores fueron significativamente menores.

En la Tabla 15 se observan los distintos parámetros obtenidos a través del método de pilas revueltas manualmente, con distintos productos de entrada.

Tabla 15 - Comparación de Parámetros por el Método de Pilas Revueltas Manualmente

Parámetro	Unidad	Camacho (2013) Tipo I	Camacho (2013) Tipo II	Camacho (2013) Tipo III	Massukado (2008) Tipo IV	Lupion (2019) Tipo V
Humedad	%	55.66	46.45	31.97	17.78	57
Materia orgánica	%	46.58	43.08	25.92	37	33.10
Carbono orgánico	%				20.5	17.09
C/N		14.6	15.9	16.1	10.2	9
N	%	1.84	1.56	0.93	2.1	2.05
pH		9.18	9.12	8.93	8.29	8.65
CE	dS/m	0.57	0.49	0.40		0.48
Co	mg/kg	4.35	5.14	6.06		
Cr	mg/kg	46.26	51.44	58.52		
Cu	mg/kg	31.95	31.98	42.79	22.7	
Ni	mg/kg	26.22	26.49	31.77		
Pb	mg/kg	6.37	9.04	17.24		
Zn	mg/kg	171.85	155.71	279.73	75.1	
CIC	mmol/kg				310	920

Tipo I: 2:1:0.125 (Guacamole, poda y gallinaza)

Tipo II: 1:2:0.125 (Guacamole, poda y gallinaza)

Tipo III 1:7:1 (Guacamole, poda y gallinaza)

Tipo IV: RO domiciliares y de escuelas

Tipo V: RO de restaurantes, poda y aserrín

Fuente: Elaborado por la autora.

Los resultados de los ensayos realizados por Camacho (2013), a pesar de contener distintas proporciones de los mismos materiales de entrada, han dado lugar a productos bastante similares.

El menor porcentaje de humedad fue observado en el ensayo de Massukado (2008) de tan solo 17.78 % comparado al de los demás autores.

En los parámetros de humedad, C/N, Cu y Zn se exhibieron las mayores diferencias de Camacho (2013) respecto a los ensayos de Massukado (2008).

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) entre los ensayos de Massukado (2008) y Lupion (2019) difirieron significativamente.

Se muestra en la Tabla 16 los resultados de los ensayos realizados por Molina (2016) con residuos de almendra y coco, por el método del recipiente o sistema cerrado (Bidón).

Tabla 16 - Comparación de Parámetros por el Método de Recipiente Cerrado

Parámetro	Unidad	Tipo I	Tipo II
pH		7.6	7.84
CE	dS/m	3.48	3.12
Materia Orgánica	%	31.91	37.02
N	%	1.08	1.03
P2O5	%	1.08	1.11
K ₂ O	%	0.75	0.73
CaO	%	3.68	3.09
MgO	%	1.23	1.18
Humedad	%	60.55	59.57
C/N	%	17.13	20.84

Tipo I: Residuos de coco, estiércol de cuy, aserrín, restos de alimento, tierra.

Tipo II: Residuos de almendra, estiércol de cuy, aserrín, restos de alimento, tierra.

Fuente: Adaptado Molina (2016).

Las compostas realizadas con distintos tipos de residuos, presentaron características muy similares y ambas cumplieron con los requisitos de valores establecidas por las normas internacionales, para todos los parámetros analizados.

5.2.3 Comparación de Parámetros para Distintos Tipos de Compuestos

En la Tabla 17 para efectos comparativos, distintos autores presentan valores de pH para compost originados a partir del empleo de diferentes métodos de compostaje.

Tabla 17 – Valores de pH para Distintos Tipos de Compost

Autor	Origen	Material Compostado	pH en H ₂ O
Barreira (2005)	Usinas de compostaje de São Paulo	RSU	5.05 – 8.17
Farrell y Jones (2010)	Europa	RSM	7.28 ± 0.03
Simantiraki et al. (2013)	Grecia	ROM (1 semana de maduración)	5.4 – 6.7
		ROM (8 meses de maduración)	8.2 – 8.7
Vegenas, Rigol y Vidal (2015)	España	ROM	8.3
		RSM	8.1
Clemente (2017)	Perú	RSOM (4 meses de compostaje)	8.85 ± 0.05
		RSOM (5 meses de compostaje)	8.95 ± 0.15
Gómez (2016)	España	Residuos cárnicos	8.19 – 8.33

Fuente: Adaptado Lima (2017).

Se mostraron valores de pH bastante semejantes, a pesar de que el contenido de residuos en cada caso y el método de compostaje utilizado fueron desiguales. El valor más bajo fue observado para el compost de Grecia en 1 semana de maduración (5,4 – 6,7). El más alto fue observado para el compuesto de Perú con 5 meses de compostaje (8,95).

En la Tabla 18 se listan datos comparativos de valores de carbono, nitrógeno y sus relaciones C/N para distintos tipos de compuestos.

Tabla 18 - Valores de Carbono, Nitrógeno y Relación C/N para Distintos Tipos de Compost

Autor	Origen	Material Compostado	C (%)	N (%)	C/N
Barreira (2005)	Usinas de compostaje de São Paulo	RSU	n.p.	n.p.	14.15 – 40.72
Massukado (2008)	São Carlos	ROM	12.11 – 23.47	0.95 – 2.38	8.3 – 12.75
Farrell y Jones (2010)	Europa	RSM	24.6 ± 4.3	0.97 ± 0.17	25
Simantiraki et al. (2013)	Grecia	ROM (1 semana de maduración)	26 – 29.2	1.1 – 1.3	22 – 24
		ROM (8 meses de maduración)	15.3 – 21	1.5 – 1.6	10 – 13
Venegas, Rigol y Vidal (2015)	España	ROM	27	1.8	15
		RSM	31	1.7	18
Clemente (2017)	Perú	RSOM (4 meses de compostaje)	12.09	0.73	16.56 ± 0.25
		RSOM (5 meses de compostaje)	9.93	0.605 ± 0.015	16.42 ± 0.19

n.p.: no presenta

Fuente: Adaptado Lima (2017).

Los valores de C, N y C/N obtenidos en los diferentes ensayos, se encontraron dentro del rango esperado, presentando algunos de los mismos mucha similitud. No se observaron grandes diferencias a pesar de que el material de entrada en cada caso y los métodos fueron diferentes.

El menor porcentaje de C fue alcanzado por Clemente (2017) para los RSOM con 5 meses de compostaje, mientras que mayor porcentaje correspondió al ensayo de Venegas; Rigol; Vidal (2015) para los RSM. El compost con mayor porcentaje de N fue el elaborado por Venegas; Rigol; Vidal (2015) para los ROM, mientras que la relación más elevada de C/N fue la presentada por Barreira (2005).

En la Tabla 19 estudios de diferentes autores presentan concentraciones de metales para compost de diferentes orígenes, a partir del compostaje de RSM o RO.

Tabla 19 - Concentraciones de Metales para Distintos Tipos de Compost

Metales (mg/kg)	Massukado (2008) *	Farrell y Jones (2010) **	Simantiraki et al. (2013) ***	Venegas, Rigol y Vidal (2015) ****
Pb	< 1.0 – 23.0	906 ± 324	77.52 – 774.53	89
Zn	49.5 – 147.18	505 ± 216	218.81 - 1697	523
Cd	< 0.5 – < 1.0	n.p.	< l.q.	2.9
Cu	16.2 – 57.76	329 ± 83	126.15 – 1269.14	168
Cr	< 0.5 – 31.1	48.1 ± 13.3	38.45 – 258.72	n.p.
Ni	< 0.5 – 2.1	87.2 ± 19.2	19.49 – 203.15	40

* Considerando los datos referentes al compostaje del patio y de la huerta de Sao Carlos;

** Apenas la fracción de finos de los residuos sólidos municipales (< 5 cm) fue utilizada y contenía 64±3% de materia orgánica;

*** Se presentan los menores y mayores valores entre los compuestos frescos y maduros;

**** Compuestos a partir de residuos orgánicos municipales;

< l.q.: inferior al límite de cuantificación;

n.p.: no presenta.

Fuente: Adaptado Lima (2017).

Se pudo observar un amplio rango de valores, para los distintos ensayos, lo que podría deberse al material de entrada que utilizó cada autor para elaborar el compost.

Los valores de concentración de metales de Massukado (2008) respecto a los otros autores fueron muy inferiores para todos los metales estudiados.

Los valores de Cu de Simantiraki (2013) para compostas frescas y maduras, varió de valores de 126.15 a 1269.14 mg/kg, donde el mayor valor superó ampliamente a las demás concentraciones del mismo metal.

Lima (2017) expuso que la gran amplitud de valores en cuanto a la concentración de los metales pesados sugiere la necesidad de un acompañamiento y un análisis pormenorizado a fin de descubrir por ejemplo como el contenido de Pb fue asimilado por el compuesto (Farrell y Jones presenta un contenido muy elevado de Pb), sea a través del sustrato inicial, o a lo largo del proceso del compostaje.

Cabe mencionar además que el contenido de metales pesados, puede presentar valores variables dependiendo del tipo de ensayo utilizado para determinar los niveles de concentración.

6 CONCLUSIONES

Es necesaria una mayor rigurosidad en la aplicación de las leyes y reglamentos que tratan de la gestión de los residuos sólidos en el Paraguay, así como también los organismos encargados en los distintos municipios deben asumir la responsabilidad del gerenciamiento de los residuos.

Es crucial generar conciencia acerca de la importancia de la separación de los residuos en la fuente e incentivar la colecta selectiva de los mismos de igual manera, de forma a que los residuos orgánicos, así como otros tipos de residuos puedan ser tratados y promover de esta manera una gestión integrada de los RS.

El proceso de compostaje constituye una opción viable a la cantidad creciente de residuos urbanos generados y destinados a vertederos en el Paraguay, permite disminuir el aporte de los residuos orgánicos a los rellenos sanitarios, además de ser una alternativa ambientalmente adecuada para el tratamiento de las áreas degradadas.

Es preciso adoptar una normativa a seguir para evaluar los parámetros que afectan al producto final; teniendo en cuenta que las normas internacionales presentan gran divergencia entre sí respecto a algunos parámetros, es necesario un estudio detallado de la norma a utilizar como base, visando las características del suelo, el clima y tipo de residuos generados en el Paraguay.

La tecnología más adecuada para llevar a cabo el proceso de compostaje a ser utilizado, depende fundamentalmente de la cantidad de residuos a tratar, la demanda comercial del compost, la evaluación económica (capacidad de inversión y mantenimiento), el local donde será implantado y además de ser transcendental contar con el licenciamiento ambiental para tal efecto.

Es fundamental garantizar la calidad del compost obtenido, mediante la valoración de los parámetros más significativos, como ser la relación C/N, el principal indicador de madurez, que debe estar balanceado entre valores de 14:1 a 10:1 de forma a establecer la humificación, maduración o bioestabilización del RO.

Es importante que del valor del pH de la composta oscile en el rango de 7 a 8,5, cabe destacar que el mismo no depende del tipo de material de entrada.

El pH que al final del proceso del compostaje debe atender a valores entre 7 a 8,5, independientemente al material de entrada.

Es sustancial atender la concentración de los metales pesados en el compost, fundamentalmente debido a la toxicidad, especialmente para usos agrícolas.

El compost puede ser aplicado en áreas degradadas tanto para evitar como remediar la erosión del suelo, debido a las propiedades que aporta al mismo; en la agricultura ya que resulta beneficioso como un acondicionador del suelo y aportante de micro y macronutrientes; así como también en áreas contaminadas por metales pesados ya que favorece a la remoción de metales tóxicos.

Los parámetros más relevantes a ser considerados en la calidad del compost para su utilización en suelos erosionados son el pH, la relación C/N, contenido de N, P, K y el contenido de materia orgánica.

Los parámetros que deben ser atendidos para su uso en la agricultura son el pH, contenido de N, P, K, concentración de metales pesados y la conductividad eléctrica (CE).

Mientras que para su aplicación en áreas contaminadas el valor del pH del compost, así como el contenido de materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) son los parámetros más destacados a ser considerados.

En los resultados se pudo observar que el material de entrada no afecta particularmente la calidad final del compost, en cuanto a los parámetros físicos y químicos, sin embargo, es preciso un control permanente durante todo el proceso, de manera a obtener un producto de calidad.

De acuerdo a los resultados de los ensayos observados, a pesar de utilizar el mismo proceso de compostaje, los valores de concentración de metales presentan diferencias significativas cuando los materiales de entrada son diferentes.

No se cuentan con normativas específicas para la realización de ensayos de parámetros de residuos sólidos orgánicos ni compostas, los mismos son adaptaciones o adecuaciones de ensayos en productos similares.

Los distintos procesos para la elaboración del compost son válidos para la obtención de un producto final de calidad, sin embargo, atendiendo a las condiciones fundamentalmente económicas y de demanda, los métodos de compostaje doméstico o comunitario son los más favorables para su implementación en el Paraguay.

7 RECOMENDACIONES

- Promover la separación en la fuente de los residuos, y elaborar campañas de concientización acerca de la importancia del gerenciamiento de los residuos sólidos, además de campañas informativas acerca de los beneficios de este tipo de prácticas.
- Implementar sistemas de recolección selectiva de residuos en los municipios.
- Realizar un análisis técnico para la elaboración de una normativa del proceso del compostaje
- Aprovechar el compost como una alternativa ambiental para el tratamiento de áreas degradadas.
- Utilizar el compost de RSO generado en los municipios, a través de las técnicas del compostaje comunitario; proveniente de restaurantes, supermercados y similares, para mejorar áreas verdes urbanas, en la reforestación, paisaje y como sustrato en viveros.
- Implementar el proceso del compostaje doméstico en obras de infraestructura, con campamentos de obra de gran envergadura, en sustitución de los rellenos, en sitios ubicados en zonas alejadas, donde no se cuente con el sistema de recolección de residuos.
- Promover el uso de este tipo de tecnología ambientalmente amigable como alternativa para las empresas constructoras contratadas por entidades públicas, debido a que son las encargadas del gerenciamiento de los residuos en obras.
- Aplicar mayor rigurosidad en la fiscalización durante el tratamiento y la disposición final de residuos.
- Efectuar los análisis del producto final con regularidad para contar con información de sus características físicas, químicas y microbiológicas, para garantizar su calidad acorde con las normas previamente establecidas.
- Realizar estudios e investigaciones de las metodologías y ensayos necesarios para determinar los parámetros de calidad del compost.

REFERENCIAS

ADANI F.; GENEVINI, P.L.; LOZZI, P. **Determination of Biological Stability by Oxygen Uptake on Municipal Solid Waste and Derived Products.** Compost Science and Utilization. Vol 9, n° 2, 2001.

ANDREOLI, C. V. et al. Higienização do Lodo de Esgoto. In: ANDREOLI, C. V. **Resíduos Sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final.** Rio de Janeiro: ABES, 2001.

Argumentan en contra de venta de predio a EL FAROL y son destituidos. Diario Digital Camisa 12, Pedro Juan Caballero, 25 de noviembre de 2019. Disponible en <<http://camisa12.com.py/post.php?id=2989>>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10.004:** Resíduos Sólidos – Classificação. 2004.

ATTET P., G. Informe III. **Elaboración del Plan Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos del Paraguay (PNGIRS) incluyendo los lineamientos para la elaboración de los Planes Municipales para la Gestión Integral de Residuos Sólidos (PMGIRS) y las Normativas Técnicas y Criterios Operacionales para cada componente del servicio público de aseo.** 2019.

BAIZE, D.; STERCKEMAN, T. **Of the necessity of knowledge of the natural pedogeochemical background content in the evaluation of the contamination of soils by trace elements.** Science of the Total Environment, 2001.

BIDONE, F. R.; POVINELLI, J. **Conceitos Básico de Resíduos Sólidos.** Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

BRASIL. Ley N° 12.305, 2 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Cateura es área protegida de Asunción dentro de un parque nacional. Diario Última Hora, Asunción, 19 de mayo de 2018. Disponible en <www.ultimahora.com/cateura-es-area-protegida-asuncion-dentro-un-parque-nacional-n1148515.html>

Centro de Compostaje y Reciclaje Municipal recibe visita de estudiantes. Luque, 8 de mayo de 2017. Disponible en <<http://www.luque.gov.py/notas-prensa/centro-de-compostaje-y-reciclaje-municipal-recibe-visita-de-estudiantes/>>

Centro de Compostaje y Reciclaje Municipal recibe visita de estudiantes. Lueuq, 8 de mayo de 2017. Disponible en <<https://www.fmazulyoro.com.py/articulo-1-17526-municipalidad-de-luque-produce-abono-organico-en-su-planta-de-compostaje-.html>>

CUADROS SANTOS. Compostaje y Biometanización. Módulo: Contaminación por Residuos. Master em Ingenieria y Gestión Medioambiental 2007/2008.

DE LA FUENTE, C.; CLEMENTE, R.; MARTÍNEZ-ALCALÁ, I.; TORTOSA, G.; BERNAL, M. P. **Impact of fresh and composted olive husk and their water-soluble fractions on soil heavy metal fractionation, microbial biomass and plant uptake.** Journal of Hazardous Materials. 2011.

DEMARS, K. R.; Long, R. P. **Field Evaluation of Source-Separated Compost and CONEG Model Procurement Specifications for Connecticut DOT Projects.** 1998.

ELLIS, J. **Plan de acción.** Área Metropolitana de Asunción Sostenible. 2014.

ESPAÑA. Real Decreto 824/2005, 8 de julio, sobre productos fertilizantes. Boletín Oficial del estado, 19 de julio de 2005, núm. 171, p 255592.

EPA. Compost guideline. South Australia: Environment Protection Authority, 2013.

Como fazer compostagem em casa. Expedição Vida, 7 de marzo de 2014. Disponible en <<http://expedicaovida.com.br/como-fazer-compostagem-em-casa/>>

FARRELL, M.; JONES, D. L. Food waste composting: Its use as a peat replacement. *Waste Management*, v.30, n.8, 2010a.

_____. **Use of compost in the remediation of heavy metal contaminated soil.** *Journal of Hazardous Materials*, v.175, n.1, 2010b.

FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. **Manual prático para compostagem de biossólidos.** 1º ed. Rio de Janeiro: ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000.

FERNÁNDEZ G., P. J. **Efectos sobre el sistema suelo planta de compost de lodo anaerobio. Comparación con un fertilizante tradicional de la comarca de Cartagena.** Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, Universidad Politécnica de Cartagena, 2010.

FONSECA, E. **Iniciação ao Estudo dos Resíduos Sólidos e da Limpeza Urbana.** 2001.

FORNES F.; GARCÍA DE LA FUENTE, R.; BELDA, R. M.; ABAD, M. **Alperujo compost amendment of contaminated calcareous and acidic soil: Effects on growth and trace element uptake by five Brassica species.** *Bioresouce Technology* 100, 2009.

Gancheros de Cateura. *Diario La Nación*, Asunción, 25 de noviembre de 2019. Disponible en <www.lanacion.com.py/oyo/2018/09/05/gancheros-de-cateura/>

GATÓN, J. J. **Estudio de la estabilidad durante el compostaje de residuos municipales.** Tesis doctoral, Departamento de Química Inorgánica E Ingeniería Química. Universidad de Córdoba. Córdoba, España, 2002.

GNEITING, L. et al. **Diagnóstico departamental de la gestión integral de residuos sólidos urbanos del departamento de Itapúa del Paraguay.** 7º Congreso Iberoamericano de Residuos Sólidos, 2017

GOLUEK, C.G. **Composting. A Review of rationales principles and Public health.** *Compost Science and Utilization*. 1975.

GÓMEZ B., R. **Compostaje de residuos sólidos orgánicos. Aplicación de técnicas respirométricas en el seguimiento del proceso.** Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma de Barcelona, 2006.

GUERMANDI, J. I. **Avaliação dos parâmetros físicos, químicos e microbiológicos dos fertilizantes orgânicos produzidos pelas técnicas de compostagem e vermicompostagem da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos coletada em estabelecimentos alimentícios de São Carlos/SP.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

HAUG, R. T. **The practical handbook of compost engineering.** Florida: Lewis Publishers, 1993.

IRIGOIEN, I.; ARIZMENDIARRIETA, J. S.; MURO, J.; OREJA, A.; EYAPE, E.; CIA, J.; PLANA, R. Proyecto piloto de bioeconomía circular de resíduos orgânicos a escala local com dimensión social y formativa. In: JORNADAS DE LA RED ESPAÑOLA DE COMPOSTAJE, 9., Valencia, 2018. p. 310.

JULCA V., K. B. **Eficiencia del maiz (zea mays) cultivado com abonos orgânicos (compost y húmus hechos a partir de restos de flores) em la disminución de las concentraciones de plomo de suelos contaminados por el passivo ambiental minero CATA-RECUAY, ANCASH 2017.** Tesis de Grado – Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Universidad César Vallejo, Lima, 2017.

KIEHL, E. J. **Fertilizantes orgânicos.** São Paulo: Agronômica Ceres, 1985.

KOCASOY, G.; GÜVENER, Z. Efficiency of compost in the removal of heavy metals from the industrial wastewater. Environmental Geology, 2009.

La basura copa Asunción. Diario ABC Color, Asunción, 3 de abril de 2018. Disponible en <www.abc.com.py/nacionales/basura-copa-asuncion-1689594.html>

LEAL D., G. **Evaluación de riesgos ambientales en la producción de compost orgánico a partir de alperujo en el T. M. de Guadalcazar (Córdoba).** Masterado – Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y Montes, Universidad de Córdoba, 2016.

LEITE A., T. **Compostagem termofílicas de lodo de esgoto: higienização e produção de bioassólido para uso agrícola.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

LIMA Q., L. M. **Tratamento de Lixo.** 1985.

_____. **Lixo Tratamento e biorremediação.** 3 ed. revista e ampliada. 2004.

LIMA Z., J. **Caracterização geológica – geotécnica e estudo da adsorção de Pb, Zn e Cd, por turfa e compostos orgânicos.** (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnica – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

LOPEZ C., J. **Obtención de biogás a partir de Residuos Sólidos Urbanos para su inyección a Red.** Grado en Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid. 2015.

LUPION, R. M. **Caracterização de composto orgânico proveniente da compostagem de resíduos sólidos e analise de seu emprego em solos degradados do município de Nazareno (MG).** Monografia (Graduação em engenharia ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

MARTIN L., M. **Biorremediación de metales pesados com aislados microbianos procedentes de processos de compostaje,** 2011.

MASSUKADO, L. M. **Desenvolvimento do processo de compostagem em unidade descentralizada e proposta de software livre para o gerenciamento dos resíduos sólidos domiciliares.** Tese (Doutorado – Programa de Pós-graduação em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2008.

MIEMBROS DE LA MESA DE BIOGÁS. El Sector del Biogás Agroindustrial en España.
Madrid, 2010.

MOGUEL R., G. J. Informe del Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos Peligrosos del Paraguay (PNGIRP). 2019

MONTEIRO P., J. H. et al. Manual Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos. Río de Janeiro: IBAM, 2001.

MUKHTAR, S. Using compost for erosion control and revegetation. 2005

NEGRO, M. J. et al. Producción y Gestión del Compost. 2000.

NORMA AMBIENTAL PARA EL DISTRITO FEDERAL. (2011). Requerimientos mínimos para la producción de composta a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, agrícolas, pecuarios y forestales, así como las especificaciones mínimas de calidad de la composta producida y/o distribuida en el Distrito Federal. México: Norma NADF 020.

NORMA CHILENA OFICIAL. (2005). Compost – Clasificación y Requisitos. Norma NCh 2880. Santiago, Chile.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. (2004). Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos os fertilizantes y enmiendas de suelo. Norma NTC 5167. Colombia.

NOVAIS, R. F. et al. Fertilidade do solo. 1º ed. Viçosa, 2007.

PARAGUAY. Ley n° 3956, del 28 de diciembre de 2009. Gestión Integral de Residuos Sólidos en la República del Paraguay.

Planean tratar el líquido tóxico del vertedero Cateura y liberarlo al río. Diario Última Hora, Asunción, 2 de febrero de 2018. Disponible en <www.ultimahora.com/planean-tratar-el-liquido-toxico-del-vertedero-cateura-y-liberarlo-al-rio-n1131675.html>

PEREIRA NETO, J. T. **Gerenciamento de resíduos sólidos em municípios de pequeno porte.** Revista Ciencia e Ambiental, n° 18, vol 1 – Lixo Urbano, Universidad Federal de Santa María: UFSM, 1990.

PEREIRA NETO, J. T., **Manual de compostagem: processo de baixo custo**, Viçosa, MG: Ed, UFV, 2007.

PIRES S., C. **O tratamento dos resíduos orgânicos como cumprimento da Política Nacional de Resíduos Sólidos: Análise dos planos municipais da bacia do Alto Tiete.** Dissertação (Mestrado) – Programa Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

PROSAB, Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, Manual Prático para a Compostagem de Biossólidos, Associação Brasileira de Engenharia Ambiental (ABES). Rio de Janeiro, 1999.

RISSE, M. **Compost utilization for erosion control.** UGA extension, 2015.

RÖBEN, E. **Manual de compostaje para municipios**, Loja, 2002.

ROMÁN, P.; MARTÍNEZ, M. M.; PANTOJA, A. **Manual de compostaje del agricultor.** Experiencias en América Latina. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Santiago de Chile, 2013.

SALINAS R., M. A.; CÓRDOVA, A; VÁZQUEZ. **Manual de compostaje municipal.** Tratamiento de residuos sólidos urbanos. 1 ed., 2016.

SAMPIERI H., R.; COLLADO F., C.; LUCIO B., P. **Metodología de la investigación.** 6 ed., 2014.

SANDOVAL T., J. **Diseño y construcción de un prototípico automático para preparar composta.** Cenidet, 2010.

SCHINDLER, M. ET AL. **Hydrous Silica Coatings: Occurrence, Speciation of Metals and Environmental Significance.** Environmental Science & Technology, 2009.

SECRETARÍA TÉCNICA DE PLANIFICACIÓN. Evaluación regional de los servicios de manejo de residuos sólidos municipales. Informe analítico del Paraguay. Evaluación, 2002.

SECRETARÍA TÉCNICA DE PLANIFICACIÓN. Evaluación regional de los servicios de manejo de residuos sólidos municipales. Informe analítico del Paraguay. Evaluación, 2004.

SECRETARÍA DEL AMBIENTE. Plan Maestro de gestión integral de residuos sólidos urbanos para el área metropolitana de Asunción y acciones complementarias. Resumen Ejecutivo, 2014.

SILVA C., K. C.; CONTRERA, R. C. Biometanização (Digestão Anaeróbia da Matéria Orgânica). SCHALCH, V. et al. **Resíduos Sólidos.** Conceitos, gestão e gerenciamento. 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.

SOLIVA, M.; LÓPEZ, M. **Calidad del compost: influencia del tipo de materiales tratados y de las condiciones del proceso.** Escuela Superior de Agricultura de Barcelona, UPC, 2004.

TORRES DE CARVALHO, P. C. Compostagem. In: TSUTIYA, M. T. et al. (Eds). **Biossólidos na agricultura.** 2º ed. São Paulo: ABES/SP, 2002.

VALENTE, B. S.; XAVIER, E. G.; MORSELLI, T. B. G. A.; JAHNKE, D.S.; BRUM JR., B. S.; CABRERA, B. R.; MORAES, P. O.; LOPES, D. C. N. **Fatores que afetam o desenvolvimento da compostagem de resíduos orgânicos.** Archivos de Zootecnia, v. 58, 2009.

VENEGAS, A.; RIGOL, A.; VIDAL, M. **Viability of organic wastes and biochars as amendments for the remediation of heavy metal contaminated soils.** Chemosphere, 2015.

WALKER; CLEMENTE; BERNAL. **Contrasting effects of manure and compost on soil PH, heavy metal availability and growth of Chenopodium álbum L. in a soil contaminated by piritic mine waste.** Chemosphere 57, 2004.