



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

COMPOSTEO DE LODOS RESIDUALES DE LA PTAR DE LA CIUDAD

UNIVERSITARIA UNAM

“Una Alternativa Sustentable”

## TESINA

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA

PRESENTA:

ING. ASTRID YOHANA QUINTERO VARGAS

DIRECTOR DE TESINA: DR. ARTURO CRUZ OJEDA

MÉXICO, D.F.

JUNIO 2014

### **Dedicatoria:**

*A mi esposo, por su apoyo incondicional, por su esfuerzo y dedicación para ayudarme a alcanzar este logro, por sus palabras de aliento cuando sentí decaer, por estar en todo momento para extenderme su mano cuando más lo he necesitado. Por su confianza y la fortaleza brindada. Por darme la oportunidad de seguir creciendo como persona y como profesional, y por creer en mí, en nuestros sueños y en un futuro mejor...*

*A mi madre y mi padre, por darme la vida, por el amor que me brindan, por confiar en mis decisiones y apoyarme en todo momento. Por su paciencia y fortaleza para esperarme en la distancia. Por creer en mí. Por ser la base fundamental de mis sueños. Mi madrecita por estar tan atenta en mis avances, por cada palabra que me alienta, que me estimula, que me hace creer que sí puedo, que me motiva para luchar hasta el final...*

*A mis hermanos, por su apoyo y moral en todo momento, por su amor, por estar siempre ahí dispuestos a escucharme y brindarme sus palabras de aliento...*

### **Agradecimientos:**

*Agradezco a la UNAM por abrirme las puertas y permitirme alcanzar una meta más en mi vida.*

*Particularmente al Dr. Enrique Cesar Valdez, por motivarme a ingresar a la Especialidad y por sus excelentes enseñanzas, para la vida personal y profesional. Por su apoyo incondicional para lograr el objetivo final, y por confiar en mis capacidades...*

*Agradezco enormemente a mi tutor, el Dr. Arturo Cruz Ojeda, por su paciencia y dedicación para llevar a cabo y culminar con éxito éste proceso. Por las enseñanzas brindadas, por su actitud positiva y su buena disposición para acudir cuantas veces fue necesario...*

*A mis Sinodales: M.I. Alba Beatriz Vásquez González, Dr. Oscar González Barceló, y M.I. Cristian González Reyes. Por su confianza y apoyo para lograr esta meta.*

*Gracias al M.I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose, por sus enseñanzas, por su permanente apoyo, sus recomendaciones y buenos consejos, su buena actitud, su carisma y su disposición para ayudar a los estudiantes...*

*Gracias a mi amiga: Catalina Guerra, por su apoyo incondicional, sus palabras motivadoras, por impulsar mis esfuerzos para lograrlo, y por su hermosa amistad...*

*Gracias a todos mis demás familiares y amigos, los que confían en mí y saben la razón de mis luchas. A mi maestro de vida Iván Escobar R., cuyas enseñanzas siempre aplicaré...*

**COMPOSTEO DE LODOS RESIDUALES DE LA PTAR DE LA CIUDAD UNIVERSITARIA UNAM**  
**“Una Alternativa Sustentable”**

## **Contenido**

	<b>Pág.</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>7</b>
<b>1.1. Objetivos .....</b>	<b>9</b>
<b>1.1.1 Objetivo General .....</b>	<b>9</b>
<b>1.1.2 Objetivos específicos .....</b>	<b>9</b>
<b>1.2. Justificación .....</b>	<b>10</b>
<b>1.3. Manejo de lodos residuales en México .....</b>	<b>11</b>
<b>1.4. Manejo de lodos residuales en el mundo .....</b>	<b>12</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1. Lodos residuales y biosólidos .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2. Compostaje de lodos residuales municipales .....</b>	<b>16</b>
<b>2.3. Legislación en México .....</b>	<b>17</b>
<b>2.4. Requerimientos de Composteo .....</b>	<b>20</b>
<b>2.4.1. Reacciones .....</b>	<b>20</b>
<b>2.4.2. Materia prima, acondicionadores, o enmiendas y agentes de carga (estimulantes de crecimiento bacteriano) .....</b>	<b>22</b>
<b>2.4.3. Sitio de composteo, equipos y herramientas .....</b>	<b>24</b>
<b>2.4.4. Ventajas y limitaciones .....</b>	<b>26</b>
<b>2.5. Operaciones de Composteo .....</b>	<b>27</b>
<b>2.5.1. Espesamiento o deshidratación .....</b>	<b>30</b>
<b>2.5.2. Mezclado .....</b>	<b>35</b>
<b>2.5.3. Composteo, digestión en pilas .....</b>	<b>40</b>
<b>2.5.4. Curado .....</b>	<b>47</b>
<b>2.5.5. Control de lixiviados .....</b>	<b>48</b>
<b>2.5.6. Monitoreo del proceso: Principales parámetros del proceso de composteo .....</b>	<b>48</b>
<b>2.5.6.1. Humedad .....</b>	<b>49</b>

2.5.6.2.	<i>Temperatura</i> .....	50
2.5.6.3.	<i>pH</i> .....	53
2.5.6.4.	<i>Concentración de nutrientes</i> .....	53
2.5.6.5.	<i>Porosidad</i> .....	54
2.5.6.6.	<i>Suministro de oxígeno</i> .....	55
2.5.7.	<i>Secado y cribado, almacenamiento y distribución</i> .....	56
2.6.	<i>Tipos de composteo y dimensionamiento de instalaciones de compostaje</i> .....	58
2.6.1.	<i>Camellones o pilas de composteo</i> .....	60
2.6.2.	<i>Pila estática</i> .....	70
3.	<b>PROPUESTA METODOLÓGICA PARA TRATAR LOS LODOS RESIDUALES DE C.U.</b> .....	70
3.1.	<i>Cantidad, calidad de lodos y tren de tratamiento</i> .....	72
3.2.	<i>Selección del sitio</i> .....	76
3.2.1.	<i>Selección del material acondicionador y agentes de enriquecimiento nutritivo (enmiendas)</i> .....	78
3.3.	<i>Etapas de composteo de lodos</i> .....	80
3.3.1.	<i>Espesado y mezclado (lodos acondicionados)</i> .....	80
3.3.2.	<i>Partes que forman el composteo en pilas estáticas o camellones (hileras) y cálculo de la dimensiones de las pilas y áreas de maniobras requeridas</i> .....	84
3.3.3.	<i>Maduración, cribado, secado</i> .....	93
3.3.4.	<i>Calidad del lodo composteado</i> .....	94
3.3.5.	<i>Diagrama de flujo del proceso de composteo propuesto para la estabilización de lodos por composteo</i> .....	94
4.	<b>PROPUESTA DE APROVECHAMIENTO Y/O DISPOSICIÓN DE LODO COMPOSTEADO</b> .....	96
4.1.	<i>Uso de lodos compostados en CU</i> .....	96
4.2.	<i>Comercialización de lodo compostado y generación de patente</i> .....	97
5.	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	98
6.	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	101

## Lista de tablas

Pág.

Tabla 1. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos .....	19
Tabla 2. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos.....	19
Tabla 3. Aprovechamiento de biosólidos .....	19
Tabla 4. Contenido de humedad en lodos de diferentes etapas de tratamiento de aguas .....	31
Tabla 5. Características de los lodos según su deshidratación .....	31
Tabla 6. Consideraciones para el diseño de lechos de secado convencionales.....	33
Tabla 7. Caracterización y composición de lodos .....	37
Tabla 8. Frecuencias de monitoreo típicas de las características de los biosólidos compostados....	49
Tabla 9. Resultados de metales lodos PTAR CU .....	73
Tabla 10. Resultados de análisis fisicoquímicos lodos PTAR CU .....	73
Tabla 11. Resultados de análisis microbiológicos lodos PTAR CU.....	73
Tabla 12. Volúmenes utilizados en la mezcla para compostar lodos.....	88
Tabla 13. Dimensiones de las pilas de composteo .....	92
Tabla 14. Dimensiones de áreas para preparación y disposición de material. ....	92

## Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Diagrama generalizado del compostaje.....	28
Ilustración 2. Etapas del proceso de composteo. ....	29
Ilustración 3. Diagrama de flujo método de pilas aireadas para compostaje.....	29
Ilustración 4. Control de temperatura y aireación de pilas .....	46
Ilustración 5. Evolución de la temperatura durante el proceso de maduración.....	51
Ilustración 6. Relación del volumen con la sequedad.....	63
Ilustración 7. Lodo deshidratado con un 70 % de humedad, con apariencia de pasta.....	65
Ilustración 8. Esquema general de una pila de compostaje. ....	66
Ilustración 9. Esquema de una posible distribución, con rotación .....	69
Ilustración 11. Proceso de triturado de material vegetal en Planta de Compostaje UNAM .....	82
Ilustración 12. Máquina trituradora de la Planta de Compostaje de la UNAM .....	82
Ilustración 13. Trozos de troncos almacenados. Planta de Compostaje UNAM .....	83
Ilustración 14. Trituración de troncos pequeños en leñadora. Planta de Compostaje UNAM .....	83
Ilustración 15. Disposición de material vegetal al llegar. Planta de Compostaje UNAM .....	85
Ilustración 16. Conformación de pilas por etapa de maduración. Planta de Compostaje UNAM ....	85
Ilustración 17. Volteo de pilas de material vegetal compostado. Planta de Compostaje UNAM .....	86
Ilustración 18. Control de temperatura mediante volteo de pilas. Planta de Compostaje UNAM ...	86
Ilustración 19. Diagrama del proceso de estabilización de lodos de C.U. UNAM por composteo....	95

## Lista de ecuaciones

Ecuación 1. Humedad de la mezcla (%): $G$ .....	39
Ecuación 2. Relación Carbono Nitrógeno C/N: $R$ .....	39
Ecuación 3. Pérdida de calor en el proceso de compostaje: $Q_1$ .....	44
Ecuación 4. Relación densidad, masa y volumen .....	62
Ecuación 5. Relación volumen y sequedad.....	62
Ecuación 6. Volumen final después de deshidratación: $V_1$ .....	63
Ecuación 7. Altura de la pila: $A$ (m) .....	64
Ecuación 8. Área transversal de la pila: $A_{tp}$ ( $m^2$ ) .....	64
Ecuación 9. Volumen de la pila por metro lineal: $V_p$ ( $m^3$ ).....	64
Ecuación 10. Volumen total de material a compostar: $V_t$ ( $m^3$ ) .....	64
Ecuación 11. Longitud de una unidad de composta: $L$ (m) .....	66
Ecuación 12. Área de la base de una pila para compostar: $A_{bp}$ (m) .....	66
Ecuación 13. Área total para las pilas de compostaje de lodos: $A_{tc}$ (m) .....	67
Ecuación 14. Número de pasillos entre pilas de composteo: $N_p$ .....	68
Ecuación 15. Área total de pasillos entre pilas: $A_{tpas.-p}$ ( $m^2$ ) .....	68
Ecuación 16. Número total de pasillos en el sistema de composteo: $N_{tp}$ .....	68
Ecuación 17. Área del pasillo adicional: $A_{pa}$ .....	68
Ecuación 18. Área total del sistema de composteo: $A_{tsc}$ .....	69

## **RESUMEN**

En el tratamiento de aguas residuales se generan lodos como un subproducto que representa un problema ambiental cuando no se les da una disposición final sanitaria adecuada. En México la mayoría de lodos residuales que se producen al año son vertidos a los drenajes municipales o a rellenos sanitarios inadecuadamente diseñados. Actualmente hay interés sobre el tratamiento de lodos, pero existe un amplio desconocimiento de los diferentes procesos de tratamiento, particularmente la metodología sobre cómo compostarlos, por lo que se requiere una mayor investigación y concientización sobre la aplicación de este proceso aerobio como una técnica viable y sustentable para aprovechar los residuos de las PTAR's como los lodos residuales; estos lodos pueden ser utilizados, mediante un tratamiento de estabilización, como abono orgánico para mejorar y fertilizar suelos o para el control de la erosión. En esta propuesta conceptual se analizan diferentes técnicas y metodologías de los procesos para el tratamiento de lodos y obtención de compostaje, realizadas en México y en otros países, y se define cuales son las más convenientes en cuanto a eficiencia y rentabilidad de acuerdo a las características típicas de los lodos residuales en México y específicamente los generados en la PTAR Cerro del Agua de la UNAM. Se presenta una propuesta para establecer o contar con una metodología adecuada para el composteo de los lodos residuales y el dimensionamiento de sus instalaciones como una alternativa sustentable que evite riesgos al ambiente y a la salud pública, la cual puede ser aplicada a los lodos generados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ciudad Universitaria (UNAM), para posteriormente incorporarlos en sus zonas verdes, en los jardines y en el vivero de la universidad. Se hacen recomendaciones orientadas a la posible implementación de la metodología propuesta a través de un proyecto conjunto entre las partes que intervienen en el manejo de residuos que se generan en la universidad.

## 1. INTRODUCCIÓN

En el tratamiento de aguas residuales municipales se generan lodos como un subproducto y representan un problema ambiental cuando no son tratados correctamente o no se les da una disposición final adecuada. El depósito directo en el drenaje, o en presas, terrenos, rellenos sanitarios, etc., de los lodos residuales representa un problema importante de contaminación debido a sus altos contenidos de microorganismos patógenos, concentraciones traza de oligoelementos y compuestos orgánicos en algunos casos tóxicos, y de microorganismos patógenos, generando daños en el suelo, el aire y los cuerpos de agua y acuíferos, así como en la salud humana. Esto ha hecho que se dé un mayor cuidado al manejo de los lodos y que en muchos países, incluido México, se establezcan normas y leyes que controlen la disposición final de los lodos residuales.

La Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 rige el manejo de lodos y biosólidos en el país, y define que los lodos son sólidos con un contenido variable de humedad, provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, que no han sido sometidos a procesos de estabilización; en tanto que los biosólidos son lodos que han sido sometidos a procesos de estabilización y que por su contenido de materia orgánica, nutrientes y características adquiridas después de su estabilización, pueden ser susceptibles de aprovechamiento, según el tipo de estabilización alcanzada.

El composteo de lodos es una técnica para darles un tratamiento final seguro, siendo esta una alternativa sustentable por ser económica, ecológica y socialmente conveniente. Esta alternativa para el manejo y la gestión de lodos residuales es la que más se ha utilizado en los últimos años en los países desarrollados y más recientemente en países en desarrollo, aprovechando sus características benéficas en cuanto a nutrientes y materiales apropiados para la fertilización de suelos y cultivos, y para mejorar suelos en condiciones críticas, lo que ha conllevado al establecimiento de normas que regulan los límites máximos permisibles de contaminantes y los han agrupado en categorías de acuerdo a sus condiciones respecto a la calidad que poseen después del tratamiento que se les aplica para controlar patógenos y toxicidad.

De acuerdo al Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación realizado por SEMARNAT en el año 2011, sin incluir las plantas de tratamiento de las descargas provenientes de industrias, centros comerciales y hospitales, entre otras, en México para dicho año había un promedio de 2,289 plantas de tratamiento de aguas residuales, en las cuales se generan grandes cantidades de volúmenes de lodos que en la mayoría de los casos son vertidos a los drenajes municipales aumentando así la contaminación de las aguas nacionales, de los suelos y de la atmósfera; y contribuyendo de manera significativa en los problemas de

contaminación que afectan los ecosistemas de los lugares donde están siendo depositados.

Debido a lo anterior se evidencia la necesidad de ahondar en el estudio de posibles alternativas para darle una disposición final eficiente, rentable y ecológica, en términos de sustentabilidad, a los volúmenes de lodos que generan las plantas de tratamiento de aguas residuales en el país.

Para este caso se propondrá una alternativa de manejo orientada a cumplir con las características que definen la sustentabilidad (ambiental, social y económica), para los lodos que se producen en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Cerro del Agua de la UNAM, aplicando la técnica del composteo con el fin de obtener un producto final limpio y seguro de tal forma que posteriormente pueda ser aplicado en los campos de la misma ciudad universitaria.

Para realizar la propuesta conceptual sobre la técnica del composteo de lodos residuales se hace una revisión bibliográfica exhaustiva basada en investigaciones hechas en México y en otros países, y en la revisión de proyectos y casos de aplicaciones reales en los cuales se han obtenido buenos resultados. Igualmente se realiza una comparación de los diferentes métodos y técnicas en el proceso de compostaje de lodos residuales para definir cuáles podrían resultar más viables y presentar mejores resultados, inicialmente para el caso particular de los lodos generados en la PTAR CU, y posteriormente que sirva como referencia para otros proyectos relacionados con la disposición final de lodos residuales en otros lugares.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo General**

Hacer una propuesta conceptual para dar una disposición final adecuada a los lodos generados en la PTAR de CU UNAM mediante las técnicas de composteo para incorporarlos a los campos de la universidad.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Revisar el estado del arte de las técnicas aplicadas en México y en otros países para compostar lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales.
- Estudiar los diferentes procesos físicos y químicos que intervienen en la elaboración de compost usando lodos residuales.
- Definir y hacer la propuesta metodológica más apropiada para dar el tratamiento final a los lodos generados en la PTAR de CU UNAM, aprovechando la infraestructura actual de la planta de compostaje de residuos vegetales de la misma universidad.
- Producir una composta de excelente calidad para uso de los jardines y en el vivero de la universidad y su posible comercialización.

## **1.2. Justificación**

En la actualidad la Universidad Nacional Autónoma de México en su Ciudad Universitaria (C.U.) cuenta con una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales llamada Cerro del Agua, construida desde el año 1982 para tratar las aguas residuales de la Ciudad Universitaria y aprovecharlas para ser reutilizada en el riego de sus áreas verdes, además de permitir la realización de actividades académicas para la docencia y la investigación. Esta obra fue dirigida por la Dirección de Obras y Servicios Generales y hace parte del Sistema de Saneamiento y Desalojo de Aguas Residuales del Campus Universitario.

Actualmente la planta trata diariamente un promedio 18 l/s de aguas residuales, y de este tratamiento se generan aproximadamente 15m<sup>3</sup> de lodos residuales con una humedad de alrededor del 99.2% y una cantidad de sólidos secos de aproximadamente 8 g/L (120 Kg/día), los cuales son dispuestos en un tanque para su concentración y vertido final directamente al drenaje municipal de la Ciudad de México.

Con el fin de evitar el vertido de los lodos generados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de CU al drenaje municipal se hace necesario buscar una alternativa sustentable de tal forma que se les pueda dar una disposición final que sea viable económica y ambientalmente, y que beneficie a la sociedad. Dentro de las diferentes técnicas que hay para tratar los lodos residuales, como la incineración, el aprovechamiento energético de la digestión anaerobia, la digestión aerobia, la estabilización alcalina, entre otras, está la técnica del composteo que es una de las más recomendadas y aplicadas en otros países, para ser dispuestos en la recuperación de suelos erosionados y en la fertilización de suelos y cultivos.

### **1.3. Manejo de lodos residuales en México**

En México en el año 2010 se generaron 6,700 millones de metros cúbicos de aguas residuales, de éstas el 89.9% se colectaron por medio de sistemas de alcantarillado, de las cuales 2,857 millones de metros cúbicos (el 43.3%) recibieron tratamiento. Se espera que para el año 2030 se generen 9,200 millones de metros cúbicos de los que sólo el 38% recibiría tratamiento de acuerdo con el nivel requerido por Ley. Para revertir esa situación se requieren grandes inversiones económicas. (Comisión Nacional del Agua 2011).

Para el año 2030, se requerirá infraestructura para dar tratamiento a 7,157 millones de metros cúbicos, lo que significa cubrir una brecha de 4,300 millones de metros cúbicos. Esta brecha de tratamiento estará integrada principalmente por insuficiencia de capacidad instalada para el tratamiento de aguas residuales, capacidad instalada sin operar por falta de red de alcantarillado y agua residual tratada de manera ineficiente. Las cuencas con mayores retos en este rubro son Lerma, Valle de México, Tula, Balsas, Bajo Papaloapan, Río Bravo y Península de Yucatán (Comisión Nacional del Agua 2011).

De acuerdo a los objetivos planteados en el Programa Nacional Hídrico (PNH) 2007–2012, el caudal de aguas residuales municipales tratado se incrementó en 10.4%, llegando a un 46.5%, con lo que se logró duplicar la cobertura del año 2000 al 2011. En cuanto al tratamiento de aguas residuales no municipales, incluyendo las industriales, la evolución en el tratamiento ha sido más lenta, pues entre 1999 y 2009 el volumen tratado sólo se incrementó en 14.7 m<sup>3</sup>/s, pasando de 22 m<sup>3</sup>/s en 1999 a 36.7 m<sup>3</sup>/s en 2009, lo que representa una cobertura del 19.3% (De la Peña, Ducci y Zamora 2013).

A diciembre de 2011 existían en el país 2.289 plantas en operación formal, con una capacidad total instalada de 137.1 m<sup>3</sup>/s; se espera que con la apertura de la planta de tratamiento de Atotonilco proyectada para el año 2015 y otras que en el momento están en construcción o ampliación se alcance el 69.4% en la cobertura de tratamiento de las aguas residuales del país (De la Peña, Ducci y Zamora 2013).

En México no se tiene información concreta sobre las cantidades de lodos generados en el país, se tiene muy poco conocimiento de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales que realizan algún tipo de proceso a los lodos para darles una disposición final adecuada. Los procesos que más se utilizan son la digestión aerobia y el tratamiento con cal, en algunos lugares se aplican técnicas de composteo, la técnica

menos usada es la digestión anaerobia, para plantas pequeñas y medianas (Moeller, 1997).

La mayoría de las plantas de tratamiento de aguas residuales existentes en México, se construyeron con digestión aerobia como proceso de estabilización de los lodos. Sin embargo, últimamente, se ha cambiado el proceso de digestión aerobia a anaerobio, en relación principalmente al tamaño de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Algunas de las plantas en México, que se han construido, o están en etapa de construcción, con digestión anaerobia y aprovechamiento del biogás para generación de energía eléctrica son la PTAR Atotonilco (Hidalgo), PTAR Agua Prieta (Jalisco), PTAR El Ahogado (Jalisco) y la PTAR San Pedro Mártir I (Querétaro). Todas estas plantas cuentan con un tren de tratamiento de agua compuesto por tratamiento primario y secundario. En cuanto al tren de lodos, éste consta de espesado, digestión anaerobia y deshidratado. La digestión anaerobia les permite producir biogás, con el cual, generan energía eléctrica para satisfacer parte de la demanda de la PTAR y, energía calorífica para calentar el digestor hasta su temperatura de operación óptima (Limón 2013).

Con la PTAR de Atotonilco, que será la más grande del país, se espera sanear el 60% de las aguas residuales generadas en el Valle de México y contribuirá con el tratamiento del 16,7% a la cobertura de tratamiento nacional. Esta PTAR tratará las aguas mediante un proceso convencional o biológico en combinación de tratamiento físico-químico. Se espera que mediante tratamiento anaerobio de los lodos se obtenga gas metano para la generación de energía eléctrica que supla el 60% de las necesidades eléctricas de la misma (De la Peña, Ducci y Zamora 2013).

#### **1.4. Manejo de lodos residuales en el mundo**

En países desarrollados como Estados Unidos, Alemania, España, Holanda, Francia, y otros, desde hace muchos años se ha estado prestando mayor atención al manejo y la disposición final de los lodos residuales debido al incremento de sus producciones. Igualmente está ocurriendo últimamente en países en desarrollo como Chile, Brasil, Colombia, y México, evidenciándose la tendencia a darles una disposición final como abono para mejorar la calidad de los suelos agrícolas.

En el año 1989 Estados Unidos produjo 5.4 millones de toneladas métricas secas de biosólidos, en 1998 la cifra aumentó a 6.3 millones, la estimación para el año 2000 fue de 7.1 millones y para el año 2010 fue de 8.2 millones. En la Unión Europea se

generaron 6.5 millones en 1992 y 7.4 millones en 1999. El uso más común que se le ha dado a los lodos en estos países es su aplicación en suelos agrícolas, principalmente como fertilizante y mejorador de suelos. Y este uso ha ido aumentando en Estados Unidos y en la Unión Europea. Por ejemplo, Francia y Noruega destinan el 58% de sus biosólidos para sus suelos. Dinamarca y Estados Unidos el 54%, España el 50% e Inglaterra el 48% y varios países más utilizan el 40% o más con este fin (Girovich, 1996; Epstein, 2003). Otras estimaciones indican que en Estados Unidos se generaron 6,9 millones de toneladas de lodos en el año 1998, de los cuales el 67% se aplicó a los suelos agrícolas, el 4% a suelos forestales, el 9% para rehabilitar suelos marginales, el 8% se aplicó sobre sitios de contacto público, y el 12% se distribuyó o comercializó en sacos para aplicarlos al suelo o macetas (Outwater, 1994)

Según información suministrada en el año 2009, Estados Unidos genera cerca de 8 millones de toneladas anuales de lodo residual seco, de los cuales el 67% se aplica en suelos agrícolas, el Reino Unido genera 1.4 millones de toneladas anuales y reutiliza el 61%, y España aplica en suelos el 66% de los lodos que genera anualmente lo que corresponde a 670 mil toneladas (Barrios, 2009). Gervin, S. afirma que la EPA (United States Environmental Protection Agency) calcula que en el año 2005 las 16.000 plantas de tratamiento de aguas residuales en Estados Unidos generaron aproximadamente 7 millones de toneladas de biosólidos; y que alrededor del 60% de todos los biosólidos fueron usados de manera benéfica como fertilizante en las tierras de cultivo; después del tratamiento, el 17% fue enterrado en un relleno sanitario, el 20% se incineró y cerca del 3% fue relleno de tierra o cubierta de recuperación de minas (Mendívil, 2009).

En Estados Unidos la comercialización del compost obtenido del tratamiento de lodos residuales se ha dado a mayor escala y existen varias marcas reconocidas cuyas ventas anuales son significativas, tales como "MetroGRow", en Madison Wisconsin. En los Ángeles se comercializan los productos "Nitrohumus", "Amend" y "Topper". La compañía Kello Supply Inc., comercializa un promedio de 225.000 metros cúbicos por año. En Milwaukee se comercializa desde 1920 "Milorganite" para plantaciones de naranja en Florida y es exportado a Japón, Canadá, Venezuela e India. Aproximadamente 50.000 toneladas son producidas anualmente. En Washington DC se comercializa el "Compro", para los jardines de la Casa Blanca y el National Arboretum. La demanda de "Compro" excede a la oferta (Facultad de ciencias químicas y farmacéuticas, Universidad de Sonora 2004) (Mendívil, 2009).

“...En el condado de King, en el Estado de Washington, dos plantas de tratamientos de aguas servidas producen 100.000 toneladas húmedas de lodos (20.000 toneladas secas). Los biosólidos tratados son de la clase B, según la clasificación que establece la EPA, y han sido utilizados en la agricultura y en la actividad forestal. Una porción de los biosólidos compostados se ha comercializado por el sector privado bajo la marca “GroCo” como un compost general para una variedad de aplicaciones incluyendo el uso en parques de la ciudad de Seattle. Este producto es compostado con aserrín” (Facultad de ciencias químicas y farmacéuticas, 2004). En Austin, en el estado de Texas, se producen 50 toneladas secas de biosólidos por día. El 55% de los biosólidos son compostados y vendidos en el comercio a través de la marca “Dillo Dirt”. El 45% restante es aplicado en actividades agrícolas. El producto es compostado con astillas de maderas y aserrín. La demanda de Dillo Dirt excede la oferta disponible (Mendívil, 2009).

Para el año 2.000 en el Estado de Nueva Inglaterra de Estados Unidos, había aproximadamente 600 EDAR (Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales) de propiedad pública que trataron aproximadamente 425.000 toneladas secas de lodos en ese año. Un poco más de una quinta parte de los lodos fue reciclada como biosólidos y enmiendas del suelo. De las más de 93.000 toneladas secas de biosólidos recicladas en el 2000, el 18.5% fue tratado según los estándares de Clase B para uso a granel en tierras agrícolas y el 81.5% fue tratado según los estándares de Clase A para uso en paisajismo y jardinería a través del compostaje o el secado térmico.

En Maine se ha tenido el mayor índice de reciclado de la región, con más del 90% de sus lodos tratados para uso en agricultura y aplicaciones de jardinería. Vermont recicla alrededor del 75% de sus lodos principalmente mediante compostaje. El índice de reciclaje de New Hampshire descendió desde el 50% en el 1996 al 30% en el 2000, debido principalmente al escrutinio público y a la más estricta normativa estatal y local de aplicación al suelo de biosólidos. Massachusetts recicló un 20% de los lodos de EDAR producidos en el estado, casi todos como lodos de Clase A, incluyendo una gran proporción de “Bay State Fertilizer” de la Massachusetts Water Resources Authority (MWRA) de Boston. Connecticut y Rhode Island tuvieron ambos índices de reciclado por debajo del 10% (Cabildo-Tenerife 2001).

En Holanda el Plan de Residuos, fija objetivos para el manejo de lodos generado en todo el país, mediante las siguientes disposiciones: 30% de reciclaje, 30% de compostaje, 30% de recuperación de energía y el 10% de vertido como residuos no aprovechables. En Viena, el esquema es de 50% de valorización energética, 29% de

reciclaje, 12% de compostaje y 9% a vertedero ([www.emision.com/161.htm](http://www.emision.com/161.htm). 2000), (Oropeza G. 2006).

En Chile, en el año 1999 se empezó a ejecutar un plan de desarrollo que incluye el saneamiento de la totalidad de las aguas residuales de la ciudad capital Santiago de Chile y con ello el tratamiento de los lodos generados. Y a nivel nacional se realizó en el año 2001 el Reglamento para la “Disposición y reúso de lodos no peligrosos” por la Comisión Nacional de Medio Ambiente (CONAMA) (Castillo, Mena y Alcota 2002).

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. *Lodos residuales y biosólidos***

Los lodos son subproductos acuosos generados durante el tratamiento de aguas residuales. Son removidos en tratamientos primarios secundarios o terciarios, o por otros tipos de tratamientos; tienen propiedades que permitirían mejorar las características físicas y productivas de los suelos, también contienen elementos traza metálicos y patógenos, que pueden ocasionar daños a la salud humana (Castro y col. 2007).

La presencia de agentes contaminantes en los lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales, como metales pesados, materia orgánica, y patógenos, se debe principalmente a la variedad de orígenes de las descargas de efluentes que se evacuan en los sistemas de alcantarillado. Por ello cuando no se les da una disposición final adecuada a los lodos, éstos representan un problema ambiental debido a que generalmente son vertidos nuevamente a los drenajes municipales.

De acuerdo a las definiciones que establece la NOM-004-SEMARNAT-2002, los biosólidos son lodos que han sido sometidos a procesos de estabilización y que por su contenido de materia orgánica, nutrientes y características adquiridas después de su estabilización, puedan ser susceptibles de aprovechamiento. La EPA (United States Environmental Protection Agency) elaboró los Criterios para el Uso y Disposición de Lodos Residuales y en el capítulo 40 del Reglamento del Código Federal CFR, en su apartado 503 define los biosólidos como: “sólidos provenientes del tratamiento de las aguas residuales y estabilizados biológicamente, con suficiente concentración de nutrientes, bajo contenido de microorganismos patógenos, presencia permisible de metales pesados, que se puede utilizar como fertilizante, acondicionador o mejorador de suelos, de acuerdo con la composición fisicoquímica del biosólido y la vocación de uso del suelo”.

Para obtener un lodo con características apropiadas que cumpla con los estándares máximos permisibles establecidos por las normas, relacionados con los agentes contaminantes, se pueden aplicar técnicas de tratamiento que a través de ciertos procesos físicos, químicos y biológicos permiten la estabilización de la materia orgánica y la eliminación de patógenos y en algunos casos la disminución de metales pesados y elementos traza. Dentro de las técnicas conocidas se encuentra el compostaje de lodos, que requiere una serie de procesos basados en el control de parámetros como temperatura, pH, humedad, tiempo de estabilización, aireación, etc., y que aplicada correctamente puede transformar los lodos en un producto limpio y seguro para ser aplicado en suelos y cultivos.

De acuerdo a la legislación de Estado Unidos, en el Reglamento del Código Federal (40 CFR Part 503 Rule: Standards for the Use and Disposal of Sewage Sludge) Estándares para la Aplicación y Disposición de Lodos de Aguas Residuales, de la EPA (United States Environmental Protection Agency) se establece que todos los lodos provenientes de las aguas residuales deben ser procesados antes de ser aplicados o incorporados al terreno. El proceso se denomina “estabilización” y permite que se minimice la generación de olores, se destruyan los agentes patógenos y se reduzca la probabilidad de atracción de vectores. Existen diversos métodos para lograr la estabilización, entre ellos está el ajuste del pH o estabilización alcalina, la digestión, el compostaje y el tratamiento térmico.

## **2.2. *Compostaje de lodos residuales municipales***

Para el compostaje no existe una definición universalmente aceptada, pero en la mayoría de las fuentes se define como la descomposición biológica y la estabilización de los sustratos orgánicos bajo condiciones que permiten el desarrollo de temperaturas termófilas como resultado de calor producido biológicamente, con un producto final, suficientemente estable para el almacenamiento y la aplicación a la tierra sin efectos medioambientales adversos (Haug, 1980). También se define al compostaje como una biotecnología que permite ejercer control sobre los procesos biológicos de degradación de la materia orgánica, mediante un proceso de estabilización caracterizado por el predominio de metabolismos respiratorios aerobios y por la alternancia de etapas mesotérmicas (10 – 20 °C) con etapas termogénicas (40 – 75 °C) (Moeller C., y otros 2008).

El compostaje resulta ser una técnica de estabilización en condiciones aerobias de residuos orgánicos que puede ser aplicada para el aprovechamiento de los lodos resultantes de las plantas de tratamiento de aguas residuales, cuyo objetivo principal puede ser dar una disposición final apropiada y a la vez obtener abono orgánico que permita la fertilización y recuperación de suelos, y cuando se logra un producto final de excelente calidad puede ser usado para cultivos en prácticas de agricultura.

En el diseño del sistema y durante todo el proceso de compostaje se deben facilitar las condiciones óptimas para el trabajo de los actores principales, microorganismos: bacterias, hongos y actinomicetos. Las condiciones biológicas y físicas (transferencia de masa y energía) son los principios básicos para el proceso. Este proceso se debe a una serie de reacciones ocasionadas por la acción conjunta de los microorganismos como bacterias, hongos y actinomicetos que actúan a través de la mineralización de la materia orgánica (Soliva y Huerta 2004).

Debido a las condiciones en que se realiza un proceso común de compostaje, y a las características químicas y físicas en que ocurre la descomposición de la materia orgánica, esta técnica cumple con todos los factores que se requieren para darle un uso final sustentable a los lodos residuales municipales, siempre y cuando se realice considerando los cuidados que se deben tener durante el proceso, e interpretando las señales de alerta que indican que hay fallas en alguna parte del mismo.

El compostaje de lodos residuales municipales permite la estabilización de la materia orgánica y la reducción de microorganismos patógenos, y con ello el cumplimiento de las normas que se han establecido tanto a nivel nacional como internacional, para darles una disposición final que no impacte negativamente al ambiente y que evite problemas de contaminación y daños ecológicos y a la salud humana.

### **2.3. *Legislación en México***

En México la disposición de lodos residuales ha sido tomada en cuenta como factor importante para disminuir el impacto ambiental que esta genera, y se ha incluido en la legislación para controlar el uso y las condiciones respecto a agentes contaminantes. La normatividad mexicana en materia de lodos residuales se ha ido transformando e incrementando debido a la creciente necesidad de dar solución a la problemática de su manejo (Moeller C., y otros 2008).

Desde el año 1988 se empezaron a crear leyes y normas relativas al manejo de lodos residuales en México, se creó la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Medio Ambiente, que planteó lineamientos para ser aplicados a residuos peligrosos y lodos. Posteriormente se creó la Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993 que establece las características y el listado de los residuos peligrosos y los límites que los hacen peligrosos. Se hizo el Proyecto de Norma PROY-NOM-052-ECOL-2001 que realizó algunos cambios debido a la diversificación de los residuos peligrosos.

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en 1993 crea la NOM-053-SEMARNAT-1993 que establece procedimientos para llevar a cabo la prueba

de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. Luego se crea la Constancia de no peligrosidad de residuos, la cual determina qué residuos listados por la NOM-052-ECOL-1993 pueden ser exceptuados del régimen de regulación de los residuos peligrosos en virtud de que no exceden los parámetros CRETIB (Código de clasificación de las características que contienen los residuos peligrosos y que significan: Corrosivo, Reactivo, Explosivo, Tóxico, Inflamable y Biológico infeccioso).

En el año 2002 se crea la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, la cual está más orientada al manejo de lodos y biosólidos, y trata sobre los lodos y biosólidos, especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Incluye los lodos residuales generados en las plantas de tratamiento, y los provenientes de los desazolves de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal y de las plantas potabilizadoras.

Para la aplicación de esta norma los generadores de biosólidos deben controlar la atracción de vectores, lo que se logra con una reducción de sólidos volátiles de, por lo menos, 38%, demostrando su efectividad, para ello la norma presenta varias opciones tecnológicas para la reducción de atracción de vectores como alternativas de tratamiento que permiten alcanzar dicho propósito (Moeller C., y otros 2008).

La Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 clasifica los biosólidos como tipo: excelente y bueno, según su contenido de metales pesados. Y como clase: A, B y C según su contenido de patógenos y parásitos. Para esto la norma establece los límites máximos permisibles de metales pesados, patógenos y parásitos. Estas clasificaciones se presentan en las Tabla 1 y Tabla 2 .

Aunque, según la información en la tabla 3, la norma establece que los biosólidos tipo excelente o bueno y clase C pueden ser destinados para fines agrícolas y mejoramiento de suelos, esta disposición deberá estar sujeta también a lo establecido por la Ley Federal de Sanidad Vegetal y conforme a la normatividad vigente en la materia. De igual forma para la disposición final de los lodos o biosólidos, éstos deben cumplir con la especificación del trámite de no peligrosidad y con los límites máximos permisibles para el contenido de los indicadores de contaminación, patógenos y parásitos especificados anteriormente (Moeller C., y otros 2008).

Tabla 1. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos

CONTAMINANTE (determinados en forma total)	EXCELENTES mg/kg en base seca	BUENOS mg/kg en base seca
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1200	3000
Cobre	1500	4300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2800	7500

Fuente: NOM-004-SEMARNAT-2002

Tabla 2. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos

CLASE	INDICADOR BACTERIOLÓGICO DE CONTAMINACIÓN	PATÓGENOS	PARÁSITOS
	Coliformes fecales NMP/g en base seca	<i>Salmonella spp</i> NMP/g en base seca	Huevos de helmintos/g en base seca
A	Menor de 1000	Menor de 3	Menor de 1(a)
B	Menor de 1000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2'000.000	Menor de 300	Menor de 35

(a) Huevos de helmintos viables. NMP número más probable

Fuente: NOM-004-SEMARNAT-2002

De acuerdo a la clasificación mostrada en las anteriores tablas, tipo y clase, se define el aprovechamiento que se le puede dar a los biosólidos, ver Tabla 3.

Tabla 3. Aprovechamiento de biosólidos

TIPO	CLASE	APROVECHAMIENTO
EXCELENTE	A	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación</li> <li>▪ Los establecidos para clase B y C</li> </ul>
EXCELENTE O BUENO	B	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación</li> <li>▪ Los establecidos para clase C</li> </ul>
EXCELENTE O BUENO	C	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Usos forestales</li> <li>▪ Mejoramiento de suelos</li> <li>▪ Usos agrícolas</li> </ul>

Fuente: NOM-004-SEMARNAT-2002

El compostaje de lodos es una de las técnicas más utilizadas a nivel mundial para estabilizar el lodo y eliminar los microorganismos patógenos y parásitos, esta técnica exige que se realice una alta deshidratación y que se lleve un control que involucra la medición continua de parámetros, manejo de volúmenes y algunas operaciones de rutina. Si se da un manejo adecuado al proceso de compostaje de los lodos residuales es muy factible que se logre obtener un producto final de muy buena calidad que cumpla con las características que definen a los biosólidos clasificarse como Tipo excelente y clase A.

#### **2.4. *Requerimientos de Composteo***

El composteo de lodos es un proceso aerobio, que requiere hacer seguimiento continuo a ciertos parámetros con el fin de garantizar que se lleve a cabo correctamente y que se eliminen contaminantes orgánicos y patógenos, que pueden impedir darle un uso final adecuado a los lodos. El proceso de compostaje se conforma por una serie de reacciones dadas por la actividad biológica de los microorganismos, lo que ocasiona variaciones en parámetros como la temperatura, el pH y la asimilación de nutrientes, la humedad, el oxígeno, entre otros (Montserrat y col. 2004).

##### **2.4.1. *Reacciones***

Las reacciones en el proceso de compostaje se logran gracias a la actividad biológica de los microorganismos. En este proceso se involucran microorganismos como bacterias, hongos y actinomicetos, que surgen de la biodegradación del material en presencia de oxígeno y en condiciones apropiadas de temperatura y pH, hasta alcanzar grados de temperatura suficiente para que los patógenos y parásitos desaparezcan y se logre obtener un material limpio, libre de agentes infecciosos.

De acuerdo a las características de la mezcla que se tiene en el proceso de compostaje ocurren una serie de transformaciones básicas para estabilizar los lodos hasta lograr la higienización adecuada y requerida para poder ser suministrados de manera segura en suelos y cultivos. Las transformaciones que ocurren con el compostaje son la reducción de la humedad y el contenido de materia orgánica, variación en los contenidos de las distintas formas del nitrógeno, aumento de la estabilidad de la materia orgánica, el incremento relativo de todos los componentes minerales que no puedan ser perdidos por lixiviación o volatilización, algunos fitonutrientes se vuelven más difícilmente asimilables, y se aumentan el pH, la conductividad eléctrica y la densidad aparente y real. (Soliva y Huerta 2004).

El proceso de compostaje se da en dos etapas básicas: descomposición y maduración. La etapa de descomposición la constituyen las fases mesofílica, termófila y la fase de enfriamiento. La fase de maduración se caracteriza por la estabilización, en la cual hay menor actividad microbiana y predominan los fenómenos químicos que contribuyen a la humificación. (Turovsky 2006).

En la fase mesofílica los microorganismos inician la descomposición de compuestos fácilmente degradables, se genera un incremento de la temperatura y un descenso del pH por formación de ácidos orgánicos. En la fase termófila se da la aparición de microorganismos termofílicos, con temperaturas que superan los 40°C, se puede llegar a alcanzar temperaturas de alrededor de 60°C en la cual los hongos se inactivan y la descomposición se lleva a cabo por actinomicetos y bacterias formadoras de esporas. Se da un rápido consumo de sustancias fácilmente degradables como los azúcares, luego las grasas, almidón y proteínas, la destrucción de la mayoría de patógenos humanos y vegetales, la alcalinización del pH debido a la liberación de amoníaco por proteínas, y la alteración parcial de celulosa y ligninas. En la fase de enfriamiento empieza la disminución de la temperatura y se genera una invasión de hongos termofílicos en el material a compostar, dándose la transformación de celulosa y hemicelulosa (Soliva y Huerta, 2004).

La etapa de maduración se caracteriza por una menor actividad microbiana y predominan los fenómenos químicos que contribuyen a la humificación. Se requiere menos tiempo que en la etapa de descomposición y hay menor generación de calor, mientras que el pH se torna ligeramente alcalino. Se da la colonización del compost por microorganismos mesófilos y varios tipos de microfauna, lo que genera la competencia por alimentos, formación de antibióticos, aparición de antagonismos y finalmente se obtiene el producto estable que ya puede ser dispuesto para su uso final (Soliva y Huerta, 2004).

#### Reacciones generales

Durante el proceso se eleva la temperatura y se generan microorganismos termofílicos (el rango óptimo para que estos prosperen es de 40 a 75° C), que utilizan una porción del carbono y nitrógeno contenido en la materia orgánica para su crecimiento y respiración, generando calor, el cual produce la rápida destrucción de los microorganismos patógenos. El proceso ocurre mediante las siguientes reacciones globales (Cruz O. A. 2013):



#### **2.4.2. *Materia prima, acondicionadores, o enmiendas y agentes de carga (estimulantes de crecimiento bacteriano)***

##### **Materiales:**

- **Lodo como materia prima**

En el proceso de compostaje de lodos la principal materia prima requerida son los lodos que resultan después del tratamiento de las aguas residuales, con las respectivas características que garantizan que éstos cumplen los parámetros de calidad establecidos por las normas. Para obtener una mejor calidad del producto final y facilitar las reacciones físicas y químicas suele usarse un material de soporte que permite una mejor estructura de las partículas que suele llamarse acondicionador, también se agregan materiales para proporcionar una fuente adicional de carbono y para controlar el contenido de humedad de la mezcla, en algunos casos estos materiales a su vez pueden ayudar en la aireación debido al aumento en la porosidad de la mezcla, a estos materiales se les conoce como agentes de carga, enmiendas, o incluso también acondicionadores **ya que algunos materiales pueden cumplir la doble función.**

Las características típicas de los lodos son poco adecuadas para llevarse a cabo el proceso de compostaje, debido al exceso de agua y de nitrógeno que generalmente contienen, por lo que deben mezclarse con otros materiales que equilibren dichas condiciones. Los materiales elegidos para mezclar los lodos deben caracterizarse por tener menor contenido de humedad y nitrógeno, mejor estructura, una relación carbono a nitrógeno (C/N) equilibrada, y una proporción adecuada de biopolímeros (Soliva y Huerta 2004).

- **Acondicionadores o enmiendas y agentes de carga (estimulantes de crecimiento bacteriano)**

Los acondicionadores y materiales de relleno son materiales (orgánicos o inorgánicos) que se adicionan a los sólidos deshidratados para modificar sus condiciones de contenido de humedad, relación carbono-nitrógeno y/o para proveer estructura o porosidad a la masa antes del proceso de compostaje (WEF 1995). Se pueden encontrar materiales que cumplan solo con una función, es decir, que solo proporcionen porosidad pero no aporten carbono o nutrientes al proceso, y viceversa. Tal es el caso de algunas excretas de animal, que podría hacer buenos

aportes en el aspecto químico pero no muchos en el aspecto físico, ya que por su estructura no aportarían mucha porosidad y soporte al lodo, además depende mucho del tipo de animal, ya que algunas poseen altos contenidos de humedad como es el caso de la excreta de cerdos.

Como materiales de soporte para el proceso de compostaje se pueden utilizar aserrines procedentes de la industria de transformación de la madera, cascarilla de arroz, fibra de coco; cualquier otro material vegetal como restos de poda de jardines, hojas, malezas, pasto, paja; productos derivados de algunos procesos agroindustriales, estiércol de algunos animales, entre otros. Este tipo de materiales se conoce como **“agentes de carga”, y son agregados a la mezcla de compost para proporcionar una fuente adicional de carbono y controlar el contenido de humedad de la mezcla.** Sin embargo, lo más aconsejable sería que se mezclen diferentes restos vegetales de distintos tamaños y composición, lo que permitiría mejorar la aireación de la mezcla y a la vez equilibrar biopolímeros y la relación C/N necesarias (Mendoza y Vigíl 2012).

Turovsky, 2006, se refiere a los materiales de enmienda y menciona las virutas de madera, corteza triturada, astillas, aserrín y desechos de madera del suelo, hojas y desechos de jardín, neumáticos triturados, residuos agrícolas tales como cáscaras de arroz; para adicionarlos a los lodos en el proceso de compostaje.

Los agentes de carga como elementos que se adicionan al lodo permiten conseguir una mezcla de compost con niveles de oxígeno adecuados aumentando los espacios porosos, para ello, (Eftoda y McCartney 2004) han investigado el CBAR (Requerimiento de Agentes de Carga Críticos) el cual está definido como la cantidad mínima de agente de carga necesario para mantener niveles adecuados de oxígeno en el espacio poroso. Su investigación se hizo con el fin de establecer la relación más apropiada entre el lodo y el agente de carga utilizado y así lograr condiciones óptimas en el proceso de compostaje teniendo un mayor control en la humedad y la temperatura. En otras publicaciones los agentes de carga son denominados material de enmienda o acondicionadores, y hace referencia también a diferentes tipos de sustratos que se adicionan al lodo para facilitar las condiciones físicas y químicas en el proceso de compostaje.

Existen muchos tipos de materiales que pueden ser usados como agentes de carga, enmiendas o acondicionadores, entre ellos se encuentran los siguientes:

- ✓ Residuos de madera o aserrín
- ✓ Bagazo de caña de azúcar
- ✓ Cascarilla de arroz
- ✓ Rastrojo de maíz
- ✓ Residuos vegetales como trozos de madera, aserrín, paja, hojas y demás residuos de jardines
- ✓ Pasto
- ✓ Paja
- ✓ Estiércol
- ✓ Papel
- ✓ Mezcla de médula de caña y gravilla de tezontle
- ✓ Mezcla de aserrín y gravilla de tezontle
- ✓ Desechos agroindustriales
- ✓ Estopa de coco

En algunos casos se adiciona a la mezcla un material como agente abultamiento que puede ser pedacería de llanta, para proveer integridad estructural y generar espacios vacíos con el fin de obtener la porosidad necesaria para permitir la aireación y la ventilación del sistema (Kulmant, L. R., 1999). Este material es retirado al final en el proceso de cribado, y puede ser reutilizado nuevamente. Los materiales que se pueden usar para este son:

- ✓ Neumáticos triturados
- ✓ Gravilla de tezontle

### **2.4.3. Sitio de composteo, equipos y herramientas**

#### **Acondicionamientos**

- **Áreas y preparación del terreno**

El área donde se realiza la instalación de las pilas y se lleva a cabo el proceso de compostaje debe cumplir con las siguientes características (Colomer M. y Gallardo I. 2007):

- ✓ Mientras se pueda, las áreas para el proceso de compostaje deben ubicarse en las zonas topográficas más altas del terreno. No es recomendable ubicarse en depresiones del terreno.
- ✓ Se recomienda que el área de compostaje tenga una pendiente superior al 1% hacia las cotas más bajas del terreno, con el fin de poder evacuar aguas lluvias y hacer la colectación de líquidos lixiviados generados durante el proceso.
- ✓ El suelo debe ser impermeabilizado, para evitar una posible contaminación de las aguas subterráneas. Los drenajes también deben ser impermeabilizados.
- ✓ Se deben retirar malezas, arbustos u otros elementos que interfieran con la operación del sistema.
- ✓ Debe hacerse la compactación y nivelación del terreno.
- ✓ Debe hacerse una canaleta perimetral, donde desemboquen las canaletas necesarias para la evacuación y posterior colecta de los líquidos lixiviados.
- ✓ Se debe diseñar un sistema de drenaje que depende de las características topográficas del suelo y las dimensiones del área de compostaje
- ✓ Debe construirse un sitio de recolección de lixiviados, con las dimensiones apropiadas.

Sería recomendable si se dieran las condiciones, que el área donde se realiza el proceso de compostaje no se encuentre a mucha distancia de la zona donde se genera el lodo residual, para evitar gastos en transporte y en operarios para el traslado de los lodos. Lo ideal es que sea en el mismo lugar.

Para el mezclado, si la producción de lodo es menor a 10 ton/día, se puede realizar la mezcla en la misma área de composteo. De no ser así, se requiere de un área independiente que pueda contener el material acondicionador y el lodo producido diariamente, más un espacio para maniobras (Cruz O. A. 2013).

- Maquinaria, equipos y herramientas

Como materiales necesarios para operar un sistema de compostaje es necesario también considerar la maquinaria, los equipos y herramientas que se requieren para llevar a cabo las actividades en cada una de las fases del proceso. Dentro de las cuales se pueden destacar la siguiente:

- ✓ Palas: Adición de material y volteo manual, y otras operaciones de rutina

- ✓ Maquinas trituradoras: se usan cuando el material es muy grueso y requiere ser triturado para disminuir el volumen y la superficie de contacto y facilitar la acción de los microorganismos.
- ✓ Leñadora: Triturar troncos de mayor tamaño hasta alcanzar volúmenes que puedan ser pasados por las máquinas trituradoras.
- ✓ Minicargadores: Mover o desplazar el material de un sitio a otro.
- ✓ Pipa de agua: Regar las pilas de compost cuando hay disminución de la humedad.
- ✓ Cribadora: Realizar el tamizado del material compostado. Las hay de diferentes mecanismos y tamaños. Pueden ser manuales o mecánicas.
- ✓ Elementos para medición de parámetros: termómetros y demás equipos de laboratorio para medir humedad, pH, sólidos, etc.

La disponibilidad de los anteriores elementos se tiene según las características de la planta donde se realice el compostaje de lodos. Mientras más tecnificada se encuentre la planta se obtiene un mejor proceso y mejores resultados finales. Muchas veces no es necesario tener equipos de laboratorio para medir los parámetros ya que se cuenta con laboratorios externos dedicados exclusivamente a prestar ese tipo de servicios.

#### **2.4.4. Ventajas y limitaciones**

El compostaje de lodos permite reducir los agentes patógenos por debajo de los niveles permisibles, degradar los sólidos volátiles y permitir la elaboración de un producto útil con diversas ventajas entre las cuales se cuentan (Mendoza y Vigíl 2012) y (Turovsky 2006):

- El lodo compostado tiene abundantes nutrientes y puede ser usado para una variedad de fines.
- El lodo compostado tiene menos nitrógeno que los biosólidos, éste es liberado más lentamente y por un periodo de tiempo mayor, lo cual es más consistente con las necesidades de consumo de las plantas.
- El producto final obtenido aporta materia orgánica y macronutrientes al suelo.
- El lodo bien compostado puede ser comercializado igualando los requerimientos de los biosólidos de clase A.
- La composta que se obtiene de los lodos incrementa el contenido de agua y la capacidad de absorción de suelos arenosos.

- La composta incrementa la aireación e infiltración de aguas de suelos arcillosos.
- El suelo con composta enriquecido también puede ayudar a suprimir enfermedades y evitar las plagas (EPA - United States Environmental Protection Agency 2002).
- La composta ha demostrado ser eficaz en la degradación o alteración de muchos tipos de contaminantes, tales como la madera-conservantes, disolventes, metales pesados, pesticidas, derivados del petróleo, y de explosivos (EPA - United States Environmental Protection Agency 2002).

Entre las desventajas del compostaje, se encuentran las siguientes (EPA - United States Environmental Protection Agency 2002) y (Turovsky 2006):

- Requiere de mucha mano de obra.
- El composteo en “hilera” y el aireado requieren áreas relativamente grandes y el control de olores usualmente es un problema si no se controla adecuadamente el proceso.
- Estos tipos de composteo son influenciados por la temperatura ambiental y las condiciones climáticas.
- Los reactores *in-vessel* tiene flexibilidad limitada para hacer frente a condiciones cambiantes y son intensivos en mantenimiento.
- La supervivencia y la presencia de patógenos primarios en el producto, si no se controla adecuadamente el proceso.
- Dispersión de patógenos secundarios, tales como *Aspergillus fumigatus*, partículas, otros alérgenos en el aire.
- La falta de consistencia en la calidad del producto con referencia a los metales, la estabilidad y la madurez.

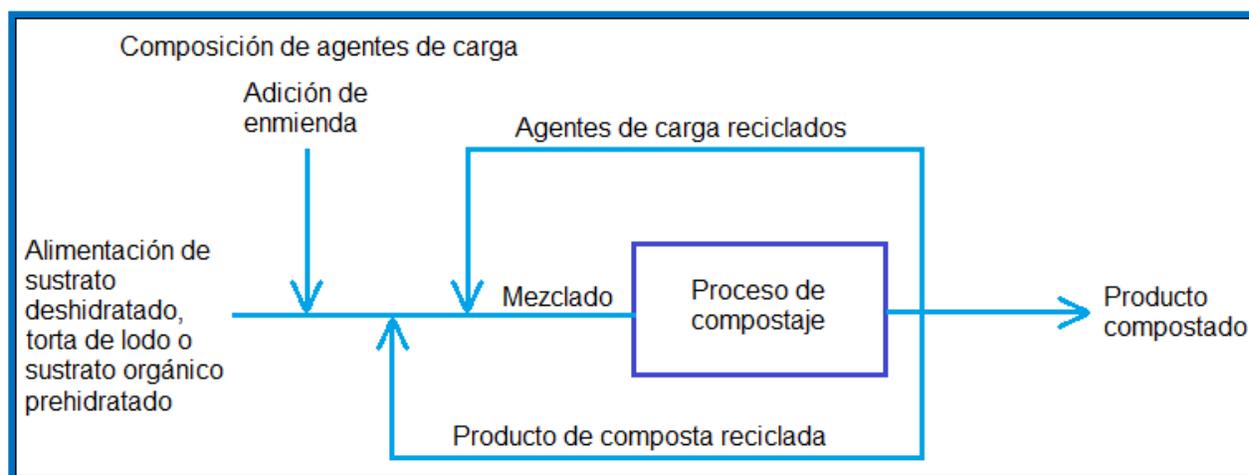
## **2.5. Operaciones de Composteo**

Durante el proceso de compostaje de lodos se requiere la realización de una serie de operaciones que son básicas, para que permanezcan las condiciones que los microorganismos demandan para que su metabolismo se pueda dar y cumplir la función de la descomposición de la materia orgánica hasta obtener el producto final deseado (estabilización).

Un esquema general del compostaje que representa a grosso modo el proceso, incluye inicialmente el ingreso del material o sustrato deshidratado, luego la mezcla en la cual

se hace la adición del material acondicionador, enmienda o agentes de carga, posteriormente el proceso de compostaje donde se efectúan las reacciones que conllevan a la descomposición o transformación de la materia orgánica por parte de los microorganismos, luego el curado, y finalmente la composta como producto limpio y libre de patógenos.

En la Ilustración 1, se presenta el diagrama general de un proceso típico de un sistema de compostaje.



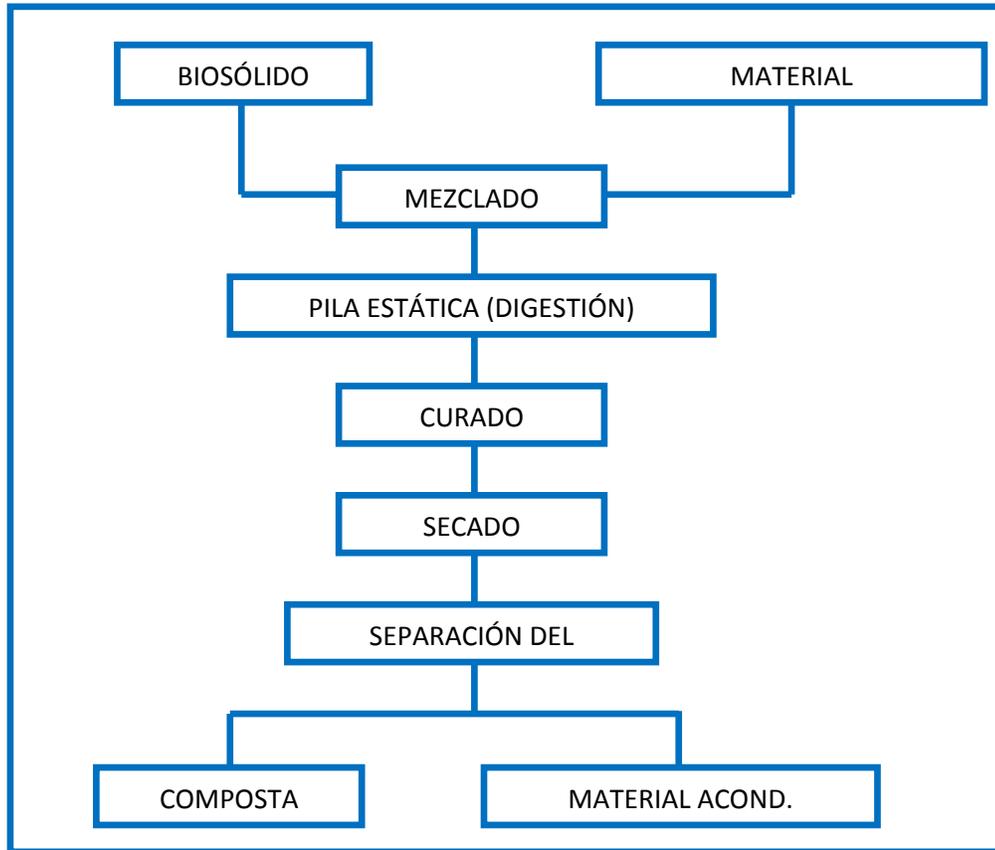
Fuente: (Haug 1980)

Ilustración 1. Diagrama generalizado del compostaje

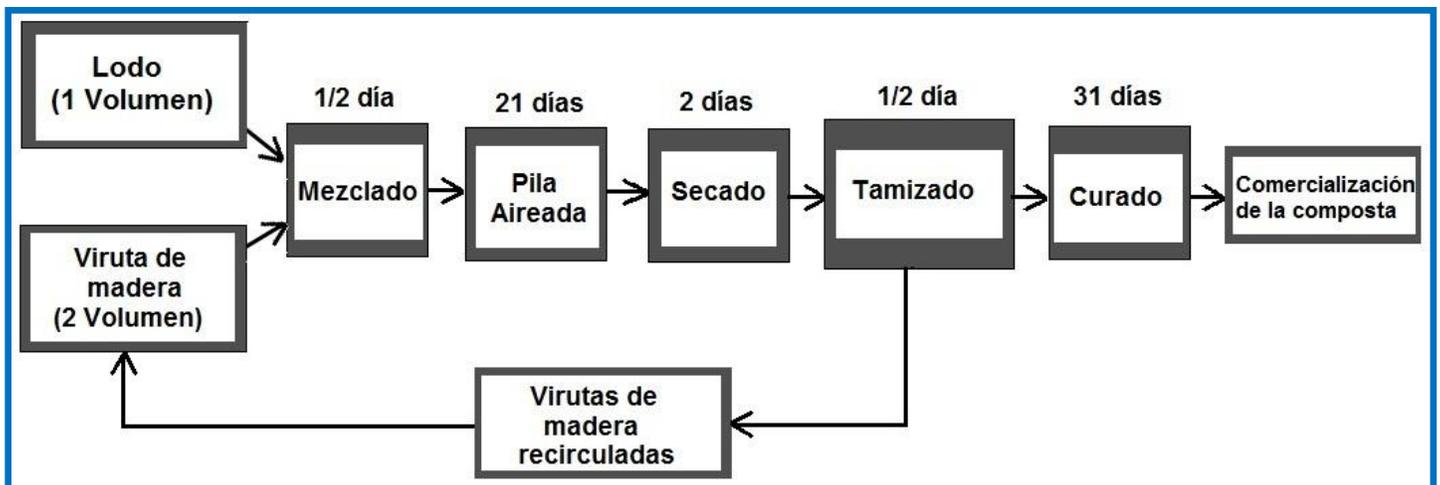
En la Ilustración 2, se presenta un diagrama esquemático de las etapas de un proceso de compostaje de tipo pilas estáticas.

Metcalf & Eddy, 1985, Indican que de los procesos de compostaje, el más logrado es el de pilas aireadas. Una forma de realizar este tipo de compostaje consiste en primero hacer una mezcla del lodo con viruta de madera, posteriormente se amontona el material mezclado en una pila y se cubre **con una capa de 300mm de compost tamizado para su aislamiento y control de olores.**

El oxígeno se suministra mediante aireación forzada. Después de 21 días, más 2 días de secado, se separan las virutas de madera que vuelven a reciclarse. Recomiendan un periodo adicional de 30 días para el curado, posterior a esto la composta queda lista para la preparación y comercialización del producto. En la Ilustración 3 se presenta un diagrama de flujo correspondiente al método de pilas aireadas de Beltsville para el compostaje de lodos (Metcalf y Eddy 1985).



Fuente: (Garrido H, y otros 2008)  
 Ilustración 2. Etapas del proceso de composteo.



Fuente: (Metcalf y Eddy 1985)  
 Ilustración 3. Diagrama de flujo método de pilas aireadas para compostaje

### **2.5.1. Espesamiento o deshidratación**

Según el tipo de tratamiento realizado en las PTAR, los lodos residuales pueden ser de tipo primario, secundario o terciario. El lodo primario es el que resulta de un tratamiento primario aplicado a las aguas residuales, son los que se extraen de los Sedimentadores primarios, provienen de tratamientos que pueden consistir en igualación, neutralización, precipitación química, coagulación-floculación y sedimentación. El lodo secundario resulta de un tratamiento secundario que puede consistir en aireación, reducción-oxidación, filtración. Y por último el lodo terciario es el que proviene de un tratamiento terciario que puede consistir en adsorción con carbón activado, intercambio iónico y ósmosis inversa, entre otros procesos de tratamiento de aguas residuales (Oropeza G. 2006).

Los anteriores tratamientos pueden variar de acuerdo al tipo de agua residual que se tiene, a las condiciones que dispone la planta y a las diferentes técnicas y metodologías que se pueden aplicar.

Los lodos primarios están conformados principalmente por arenas finas, sólidos inorgánicos e inorgánicos, su estado es acuoso y tienen un contenido de humedad superior al 95%. Su concentración de sólidos totales varía de 2.5 a 5.0%, y su concentración de sólidos volátiles totales varía entre el 60 a 89%. Cuando durante el tratamiento de las aguas residuales se usan reactivos químicos para incrementar la remoción de contaminantes se obtiene una mezcla de lodos biológicos y alcalinos. Se caracterizan por ser de color negro-grisaseo, por presentar trazas de grasas y un olor desagradable. Tienen una fácil degradación, contienen microorganismos patógenos y huevos de helmintos (Cruz O. A. 2013). El lodo primario se genera después de las rejillas y desarenado y consiste en productos no disueltos de las aguas residuales. La composición del lodo depende de las características del agua residual. Este lodo contiene generalmente una gran cantidad de material orgánico e inorgánico.

Los lodos secundarios son generados en tratamientos como el secundario (biológico), tal como el de lodos activados, o en tratamientos como el de filtros rociadores o biodiscos. Su apariencia es floculenta, tienen alto contenido de agua y son difíciles de deshidratar, generalmente presentan buena sedimentabilidad. Se caracterizan por ser de color café (marrón) y tener un olor a tierra. Tiene altos contenidos de patógenos y huevos de helmintos. La concentración de sólidos totales

secos varía en un rango de 0.5 a 3%, y la concentración de sólidos volátiles totales se encuentra en un rango entre el 70 y 80% (Cruz O. A. 2013).

Lodo terciario se produce a través de procesos de tratamiento posteriores a los primarios y los secundarios, generalmente este tratamiento consiste en la adición de agentes floculantes. Estos lodos se conocen también como lodos químicos generados por la adición de sales de aluminio o hierro y/o cal durante el tratamiento de agua residual para mejorar la remoción de los sólidos suspendidos o para precipitar algún contaminante. Las variables que afectan las características de los lodos químicos son: composición química del agua, pH, mezclado, tiempo de reacción y forma de floculación entre otras.

**Tabla 4. Contenido de humedad en lodos de diferentes etapas de tratamiento de aguas**

Proceso	% Humedad del lodo	
	Intervalo	Típico
<b>Sedimentación Primaria</b>	88-96	95
<b>Filtro Percolador</b>	91-95	93
<b>Precipitación Química</b>	-	93
<b>Lodos Activados</b>	90-93	92
<b>Tanques Sépticos</b>	-	93
<b>Tanques Imhoff</b>	90-95	90
<b>Aireación Extendida</b>	88-92	90
<b>Lodos Primario Digerido Anaerobiamente</b>	90-95	93
<b>Laguna Aireada</b>	88-92	90
<b>Lodos Primario Digerido Aeróbicamente</b>	93-97	96

Fuente: Cruz O. A., 2013

**Tabla 5. Características de los lodos según su deshidratación**

% de agua	Características
<b>&gt;85</b>	Líquido bombeable
<b>75-65</b>	Pastosos y viscoso
<b>65-60</b>	Desmenuzable, no viscoso.
<b>40-35</b>	Bastante sólido
<b>&lt;15-10</b>	Polvoriento

Fuente: Cruz O. A., 2013

Independientemente del tipo de tratamiento del que provengan los lodos, sus contenidos de humedad siempre están por encima del 90%, lo que impide que puedan ir directamente a un proceso de compostaje para lograr su estabilización. Por esto es necesario aplicar un pretratamiento mediante el cual se logre la una disminución significativa del contenido de humedad.

En la Tabla 4 se presentan los rangos de humedad y valores típicos de los lodos de acuerdo al tipo de tratamiento aplicado. Y en la Tabla 5 se presentan las características de los lodos según el porcentaje de deshidratación que presenten.

Para que los lodos puedan destinarse a una estabilización mediante un proceso de compostaje deben tener un porcentaje de humedad de alrededor del 70 al 80%.

#### Descripción tratamientos para deshidratación de lodos:

El objetivo de hacer una deshidratación a los lodos es reducir el contenido de agua en el lodo estabilizado, con lo que se reduce el volumen de manejo. La eliminación de agua en los lodos puede hacerse por métodos naturales o por métodos artificiales. La pérdida de agua puede ser natural por gravedad o bien, artificial por presión. Los métodos se clasifican en estos dos grupos (Cruz O. A. 2013):

Naturales: Lechos de secado y Lagunas de evaporación

Artificiales: Filtros banda, Filtros prensa, Centrifugas, y Filtros al vacío

#### ▪ Lechos de secado

Los lechos de secado son estructuras rectangulares en donde se deposita el lodo estabilizado, bien distribuido, sobre una cama de arena y grava, con fondo drenado. Esta metodología consiste en extender los lodos sobre una capa de arena y dejarlos secar por drenaje a través de la masa de lodo y de arena mediante la sedimentación de éstos y la filtración de agua que se recolecta en el fondo, y por evaporación debido a las condiciones ambientales.

Con ésta técnica se puede alcanzar un contenido de humedad de aproximadamente el 60%, dejando el lodo por un periodo de tiempo entre 10 a 15 días. Una señal que indica en qué momento el lodo ya está deshidratado es la formación de grietas en la cama de lodo, lo cual indica que ya es conveniente retirarlo. Para diseñar los lechos de secados se recomienda que la altura de lodo sea de alrededor de 0.3m, y se considera un factor de seguridad del 1.2.

Hay varios tipos de lechos de secado:

- ✓ Convencionales de arena y grava
- ✓ De piso pavimentado
- ✓ De medio artificial
- ✓ Por vacío

En la Tabla 6 se presentan algunas consideraciones importantes para el diseño de un lecho de secado de lodos.

**Tabla 6. Consideraciones para el diseño de lechos de secado convencionales.**

Parámetro	Valor o rango
<b>Carga de sólidos</b>	50 - 120 kg SST/m <sup>2</sup> -año
<b>Parámetro de población</b>	8 hab./m <sup>2</sup>
<b>Velocidad en las tuberías de conducción</b>	> 0.75 m/s
<b>Pendiente mínima de drenes</b>	> del 1%
<b>Tamaño de partícula de arena</b>	0.3 a 0.75 mm
<b>Sequedad de la torta de lodo</b>	20 a 40 %
<b>Dimensiones recomendadas</b>	10 m de ancho y 30 m de longitud
<b>Tiempo de residencia</b>	10 – 15 días
<b>Espesores de las capas de grava y arena</b>	20 - 30 cm
<b>Espesor de la capa de lodos a secar</b>	< de 30 cm

Fuente: Cruz O. A., 2013

Dentro de las ventajas que tiene realizar la deshidratación de lodos por lechos de secado se encuentran que es un método de secado barato cuando se cuenta con buena disponibilidad de terreno; no se requieren operarios calificados, es de fácil construcción y no requiere mucho mantenimiento, su consumo de energía es insignificante, no requiere el uso de productos químicos, y se obtiene mayor porcentaje de sólidos, que con otros métodos, como los filtros banda o filtros prensa.

Las desventajas que presenta este método son que requiere mucho terreno para su operación, los lodos deben estar al menos parcialmente estabilizados para poderse aplicar, se puede presentar problemas de olores, deben considerarse las condiciones climáticas cuando se realiza el diseño, para retirar el lodo se requiere mucha mano de obra, es recomendable usarse cuando se tienen poblaciones menores de 20,000 habitantes.

- Filtros banda

La deshidratación de lodos por el método de filtros banda consiste en una técnica en la cual se usa un equipo mecánico que escurre el agua del lodo a través de la presión ejercida por dos bandas sin fin. Para poder aplicar esta metodología es necesario que el lodo sea acondicionado en un tanque de mezcla con compuestos químicos como polioelectrolitos catiónicos.

En el sistema de secado de lodo por filtros bandas, el lodo acondicionado se coloca sobre la banda inferior donde se drena por gravedad, y a partir del punto donde las bandas se juntan el lodo es transportado entre ellas, llevándolo entre rodillos que generan compresión sobre el material.

Durante el mecanismo se recomienda efectuar un efecto de cizalladura cambiando la dirección de la banda para lograr mejores resultados, también se recomienda usar diferentes diámetros para aumentar la presión. Al final del ciclo el lodo es separado por gravedad con un raspador. El sistema cuenta con chorros de agua para limpiar la banda que regresa para recibir más lodo. Un filtro muy tecnificado, en buenas condiciones y bien operado puede proporcionar porcentajes de humedad finales en el lodo de hasta un 20%.

- Filtros prensa

Este sistema de deshidratación actúa mediante la aplicación de una presión elevada sobre el lodo permitiendo la evacuación del agua que contiene. El lodo se bombea al filtro prensa y el agua que se elimina pasa a través de una membrana filtrante, quedando entre las placas del filtro una torta de lodo. Con esta técnica se pueden alcanzar la reducción de los porcentajes de humedad hasta del 40%.

Las placas que conforman el filtro prensa tienen una superficie ranurada, cubiertas por una tela filtrante de polipropileno resistente. La presión de las placas se hace mediante una prensa hidráulica o tornillos accionados mecánicamente y entre ellas se forma una cavidad que es ocupada por el lodo progresivamente. Las placas se saturan de lodo y al separarlas la torta de lodo formada cae por gravedad. Este proceso puede durar hasta cinco horas.

Físicamente el mecanismo de acción de los filtros prensa consiste en una serie de procesos en los que el lodo es bombeado a través de cámaras cubiertas por telas filtrantes, al bombear, la presión aumenta y fuerza al lodo a circular por la estructura del filtro, provocando que los sólidos se acumulen y formen una pasta en las telas de desaguado, el pistón empuja la placa móvil de acero contra la

estructura principal del filtro provocando el cierre de ambos. Una vez terminado el proceso de filtrado, se comprime la torta a través de la inyección de aire. Luego que el pistón de cierre retrocede para la apertura de las placas, y permite que las “tortas” de sólidos desarrolladas caigan a una tolva recolectora.

- Centrífugas

Consiste en un depósito estacionario en el cual se usa la fuerza centrífuga para realizar la separación del lodo desaguado y el agua contenida, dicha separación se da por la diferencia de densidades entre los componentes. Con esta técnica se pueden alcanzar porcentajes de humedad entre el 60 a 70%.

- Filtros al vacío

En estos sistemas la deshidratación se debe a la diferencia de presión por medio de un medio filtrante. Su mecanismo consiste en que el agua del lodo atraviese el medio y los sólidos queden retenidos formándose la torta de lodo. La diferencia de presión es el vacío. Se pueden alcanzar lodos con porcentajes de humedad de hasta un 75 a 85%.

### **2.5.2. Mezclado**

Los lodos y biosólidos generados en PTAR's por su carácter de masa compacta tienden a tener dificultades para la fermentación, ya que no se airean fácilmente, lo que obliga a mezclarlos con materiales de soporte que disminuyan la humedad y aumenten la porosidad; estos materiales deben ser sustancias resistentes a la fermentación y que puedan ser recuperadas y reutilizadas al final del proceso de compostación. Desde el punto de vista de su composición, los lodos y biosólidos son productos ricos en nitrógeno pero que a menudo presentan déficit de fósforo y de otros elementos esenciales para el proceso de compostaje, por lo que se deben mezclar con algún material de enmienda que mejore estas deficiencias (Torres L., y otros 2005).

Para el compostaje de lodos residuales municipales, normalmente los lodos se mezclan con restos de poda que son ricos en celulosa y lignina, que además de favorecer la capacidad de autoaireación equilibran el contenido de humedad y nitrógeno. El compostaje de lodos residuales, junto con la adición de un agente estructurante permite obtener un producto de enorme potencial agronómico que puede aplicarse sin riesgos de fitotoxicidad, y que presenta una materia orgánica

estable y un contenido de elementos nutritivos óptimo para la planta (Cabildo-Tenerife 2001).

En un mezclado de compostaje la porosidad es la característica que proporciona el contacto entre el aire y los biosólidos, esto se requiere para mantener el proceso aeróbico de la composta y es importante en el control de la proporción de la mezcla. La porosidad proporciona una manera de remover el exceso de calor y humedad y es determinada por el tamaño físico de la enmienda la cual a menudo es referida como agentes de carga de volumen. Las partículas que provén la mejor porosidad tienen un tamaño de que promedia de 6 a 12 cm en el diámetro o más grandes (WEF, 1995).

En el compostaje de lodos residuales municipales se aconseja que la mezcla se haga con materiales ricos en celulosa y ligninas, la madera y el material vegetal cumplen con estas características, y teóricamente dan una relación C/N correcta. Pero en casos donde se hace la mezcla con trozos de madera muy grandes, el carbono que contiene no es fácilmente asimilable por los microorganismos, debido a su resistencia, a la biodegradación y al tamaño de las partículas; esta situación provoca fuertes desprendimientos de amoníaco y la transformación incompleta de la materia. Y al contrario, en casos donde se usa el aserrín u otros restos carbonados de menor tamaño de partícula se logra un equilibrio en el contenido de agua y la relación C/N, pero se presentan problemas porque disminuye la porosidad y no hay suficiente aireación, lo que ocasiona problemas de anaerobiosis.

En el mezclado el volteo del material juega un papel muy importante, debido a que con esta operación no solo se logra la aireación y por ende la aportación de oxígeno para el metabolismo de los microorganismos, sino también la reducción del tamaño de las partículas, homogenización del material y la redistribución de los microorganismos, la humedad y los nutrientes, a la vez que se exponen nuevas superficies al ataque microbiano (Soliva y Huerta, 2004).

De acuerdo a lo anterior se recomienda realizar una mezcla para el tratamiento de compostaje que contenga los siguientes componentes:

Mezcla: lodo + acondicionador + enmienda

Lodo:

Después de los tratamientos aplicados a las aguas residuales, al lodo que resulta debe hacerse un análisis o evaluación de acuerdo a lo que establecen las normas oficiales, que podría consistir en un muestreo y caracterización de lodos, Análisis de CRETIB, cromatografía, espectroscopía fluorescente de rayos X, análisis microbiológicos, entre otros. (Oropeza, 2006). Estas pruebas pueden variar según los requerimientos de las normas de cada país, según el tipo de lodo que se tenga, y de acuerdo a los recursos con que se cuenten. Con los resultados obtenidos de los análisis mencionados se identifica si el lodo es un residuo peligroso o no peligroso y en base a esto se definen las alternativas de tratamiento que se aplicarán (Oropeza, 2006). Si los resultados indican que el lodo es un residuo no peligroso se puede aplicar como alternativa de tratamiento el composteo siendo esta una alternativa sustentable si se realiza de manera correcta de acuerdo a los procedimientos técnicos investigados para obtener un buen resultado final y poder ser dispuestos finalmente como biosólidos según lo que establecen las normas.

De acuerdo a la composición de las aguas residuales domesticas, algunos autores indican que la composición de los lodos generados en el tratamiento de éstas tienen características similares a las que se presentan en la Tabla 7:

**Tabla 7. Caracterización y composición de lodos**

<i>Parámetros</i>	<i>Lodos primarios</i>	<i>Lodos secundarios (mezcla)</i>	<i>Lodos digeridos</i>
pH	5.5-6.5	6.5-7.5	6.8-7.6
Contenido de agua (%)	92-96	97.5-98	94-97
ssv (%ss)	70-80	80-90	55-65
Grasas (%ss)	12-14	3-5	4-12
Proteínas (%ss)	4-14	20-30	10-20
Carbohidratos (%ss)	8-10	6-8	5-8
Nitrógeno (%ss)	2-5	1-6	3-7
Fósforo (%ss)	0.5-1.5	1.5-2.5	0.5-1.5
Bacterias patógenas (NMP/100ml)	10 <sup>3</sup> -10 <sup>5</sup>	100-1000	10-100
Metales pesados (%ss) (Zn, Cu, Pb)	0.2-2	0.2-2	0.2-2

Fuente: Hernández M. A, 1992

### Acondicionador:

El material orgánico adicionado a los lodos para garantizar una buena relación carbono nitrógeno, aportar estructura y porosidad al lodo residual, tener una mejor aireación y aumentar los sólidos en la mezcla. Uno de los objetivos más importantes de usar un acondicionador en el proceso de compostaje de lodos es proporcionar una fuente de carbono adicional que aporte energía a los microorganismos termofílicos y mejore la textura y porosidad del lodo necesarias para la aireación. El material acondicionador debe tener la capacidad suficiente para absorber la humedad y ser rico en carbono. Según el contenido de carbono del tipo de material acondicionador que se disponga, la relación recomendada para un lodo deshidratado con un porcentaje del 20% de sólidos debe ser de 1:1 a 4:1 (Acondicionador:Lodo) (Cruz O. A. 2013).

Sin embargo para determinar la proporción adecuada es posible utilizar métodos matemáticos que permiten calcular una relación teórica mediante la aplicación de ecuaciones para hallar el porcentaje de humedad y la razón C/N de la mezcla, a partir de relaciones establecidas entre variables como el porcentaje de humedad, la masa, el porcentaje de carbono, y el porcentaje de nitrógeno del material. Se obtienen mejores resultados en el proceso de compostaje de lodos si el diseño de las pilas se realiza de modo que la mezcla de lodo y los materiales acondicionadores cumplan con los valores de humedad y relación C/N en los rangos que presenta la literatura (WEF, 1995).

Antes de realizar el procedimiento que concierne el mezclado, se debe preparar el material que servirá como acondicionador. Este material para la composta, se tritura manual o mecánicamente de preferencia en fragmentos de 10-15 cm. Se toma normalmente como unidad de tiempo la semana para amontonar material en una misma pila, antes que empiece la fase termofílica o de higienización, y así evitar la re-contaminación del material con material fresco. Otro aspecto importante aquí es la mezcla de material para alcanzar una relación C/N adecuada, el rango ideal de esta relación para comenzar el compostaje es de 25:1 a 35:1 (FAO 2013), o según los resultados de pruebas experimentales previas.

La Cornell State University, en Estados Unidos, en su Website The Cornell Composting, The Science and Engineering of Composting, plantea una metodología para calcular el porcentaje de humedad de la mezcla y la relación C/N, mediante la aplicación de las siguientes ecuaciones (Cornell, 2001):

Ecuación 1. Humedad de la mezcla (%): G

$$G = \frac{\sum(M_i \times Q_i)}{\sum Q_i}$$

Dónde: M<sub>i</sub>: Contenido de humedad del material i (%)  
Q<sub>i</sub>: Masa o peso húmedo del material i

Ecuación 2. Relación Carbono Nitrógeno C/N: R

$$R = \frac{\sum Q_i \times C_i (100 - M_i)}{\sum Q_i \times N_i (100 - M_i)}$$

Dónde:  
Q<sub>i</sub>: Masa o peso húmedo del material i  
C<sub>i</sub>: Contenido de C del material i (%)  
N<sub>i</sub>: Contenido de N del material i (%)  
M<sub>i</sub>: Contenido de humedad del material i (%)

Para la determinación de los contenidos de C, N, y humedad, existen metodologías especiales que deben ser realizadas en laboratorio donde se cuenten con todos los elementos como equipos, herramientas, reactivos, entre otros; además se deben tener los permisos y certificaciones exigidos según normas y deben ser realizados por personal capacitado para ello. Para los alcances de este trabajo no se ahonda en esta parte debido a que no siempre las PTAR o las plantas de compostaje cuentan con este tipo de laboratorios, y en la mayoría de los casos estas mediciones se realizan en laboratorios externos dedicados a la prestación de ese tipo de servicios.

Debido a lo anterior, es recomendable realiza una prueba anual piloto en la práctica con diferentes relaciones de lodo y material acondicionador a fin de obtener la mejor relación que de la mejor eficiencia de composteo a tiempos y temperaturas óptimas.

Otra metodología para determinar las cantidades de los materiales que se deben adicionar a la mezcla, es presentada por (Turovsky 2006), el cual propone que para tener excelentes resultados la mezcla de lodos con materiales de relleno y reciclados debe ser apropiada, se requiere tener un balance óptimo de la masa, humedad, pH, temperatura, nutrientes y aire.

### **2.5.3. Composteo, digestión en pilas**

El proceso de compostaje se realiza en una serie de pasos que consisten; primero hacer la mezcla del material con el acondicionador previamente triturado y posteriormente se pasan a las líneas de compostaje donde a través de la conformación de pilas se da la digestión aerobia, permaneciendo allí por un periodo de tiempo dependiendo del tipo de sustrato y de la metodología de compostaje utilizada, y durante ese periodo se realizan una serie de operaciones que son básicas para un correcto desarrollo, como el volteo, la aireación, adición de agua cuando se disminuye la humedad, y en algunos casos se requiere adición de elementos nutritivos, que aceleran la estabilización (Moeller C., y otros 2008).

Se recomienda que en este proceso las unidades de compostaje deben ser independientes, no se debe adicionar material a una pila que ya este conformada. Es de suma importancia llevar el registro de los datos más relevantes en la evolución del proceso, por ejemplo la fecha de conformación, la relación C/N de entrada, la temperatura del material al ingreso al sistema, temperatura del ambiente, el contenido de humedad; también se puede tener en cuenta datos como humedad relativa y precipitación.

El material que entra al proceso de digestión debe ser acumulado con anterioridad en una misma pila, antes que empiece la fase termofílica o de higienización, con el fin de no adicionar material nuevo mientras estén ocurriendo estas fases para evitar la contaminación por la inserción de sustrato fresco (FAO 2013).

Dado que el compostaje se puede definir como un proceso dirigido y controlado de mineralización y pre-humificación de la materia orgánica, a través de un conjunto de técnicas que permiten el manejo de las variables del proceso; y que tienen como objetivo la obtención de un biofertilizante de características físico-químicas, biológicas y microbiológicas predeterminadas, conocido como compost o composta. Este proceso controlado se denomina compostaje aerotérmico o termoaeróbico (Sztern MGA y Pravia 1999).

El compostaje aeróbico que es el que se aplica en el composteo de lodos, se caracteriza por el predominio de los metabolismos respiratorios aerobios y por la alternancia de etapas mesotérmicas con etapas termogénicas, y con la participación de microorganismos mesófilos y termófilos. Las elevadas temperaturas alcanzadas, son consecuencia de la relación superficie/volumen de las pilas o camellones y de la actividad metabólica de los diferentes grupos fisiológicos participantes en el proceso. Durante la evolución del proceso se produce una sucesión natural de

poblaciones de microorganismos que difieren en sus características nutricionales (quimioheterotrofos y quimioautotrofos), entre los que se establecen efectos sintróficos y nutrición cruzada (Colomer M. y Gallardo I. 2007).

En las pilas donde se da la digestión que favorece la transformación de la materia orgánica por los microorganismos, se destacan dos zonas importantes: la zona central o núcleo, y la zona cortical o corteza. La primera es la que sufre los cambios térmicos más evidentes, el núcleo actúa como una zona inductora sobre la corteza, aunque todos los procesos que se dan en el núcleo no alcanzan la totalidad del volumen de la corteza. La segunda es la que rodea al núcleo y su espesor depende de la compactación y textura de los materiales utilizados (Sztern MGA y Pravia 1999).

### Etapas durante la digestión

Durante el composteo para lograr un producto estable es necesario que ocurran las siguientes etapas que dependen de las temperaturas alcanzadas en el núcleo de las pilas de compostaje (Sztern MGA y Pravia 1999):

- Etapa de latencia (arranque)

Corresponde a la etapa inicial, considerada desde la conformación de la pila hasta que se evidencian incrementos de temperatura, con respecto a la temperatura del material inicial. Esta etapa es notoria cuando el material ingresa fresco al compostaje, pero si el material tiene ya un tiempo de acopio puede pasar inadvertida. La duración de esta etapa es muy variable, dependiendo de numerosos factores. Si el balance C/N, el pH y la concentración parcial de Oxígeno son correctos, entonces la temperatura ambiente y fundamentalmente la carga de biomasa microbiana que contiene el material, son los dos factores que definen la duración de esta etapa. Con temperatura ambiente entre los 10 y 12 °C, en pilas adecuadamente conformadas, esta etapa puede durar de 24 a 72 hs.

- Etapa mesotérmica 1 (10-40°C):

En esta etapa, se destacan las fermentaciones facultativas de la microflora mesófila, en concomitancia con oxidaciones aeróbicas (respiración aeróbica). Mientras se mantienen las condiciones de aerobiosis actúan Euactinomicetos (aerobios estrictos), de importancia por su capacidad de producir antibióticos. Se dan también procesos de nitrificación y oxidación de compuestos reducidos de Azufre, Fósforo, etc. La participación de hongos se da al inicio de esta etapa y al final del proceso, en áreas muy específicas de los camellones de compostaje. La etapa mesotérmica es particularmente sensible al binomio óptimo humedad-aireación. La actividad metabólica incrementa paulatinamente la temperatura. La

falta de disipación del calor produce un incremento aún mayor y favorece el desarrollo de la microflora termófila que se encuentra en estado latente en los residuos. La duración de esta etapa es variable, depende también de numerosos factores.

- Etapa termogénica (40-75°C):

La microflora mesófila es sustituida por la termófila debido a la acción de Bacilos y Actinomicetos termófilos, entre los que también se establecen relaciones del tipo sintróficas. Normalmente en esta etapa, se eliminan todos los mesófilos patógenos, hongos, esporas, semillas y elementos biológicos indeseables. Si la compactación y ventilación son adecuadas, se producen visibles emanaciones de vapor de agua. El CO<sub>2</sub> se produce en volúmenes importantes que difunden desde el núcleo a la corteza. Este gas, juega un papel fundamental en el control de larvas de insectos. La corteza y más en aquellos materiales ricos en proteínas, es una zona donde se produce la puesta de insectos. La concentración de CO<sub>2</sub> alcanzada resulta letal para las larvas. Conforme el ambiente se hace anaerobio (lapso muy corto), los grupos termófilos intervinientes, entran en fase de muerte. Como esta etapa es de gran interés para la higienización del material, es conveniente su prolongación hasta el agotamiento de materia orgánica y nutrientes.

- Etapa mesotérmica 2:

Con el agotamiento de los nutrientes, y la desaparición de los termófilos, comienza el descenso de la temperatura. Cuando la misma se sitúa aproximadamente a temperaturas iguales o inferiores a los 40°C se desarrollan nuevamente los microorganismos mesófilos que utilizarán como nutrientes los materiales más resistentes a la biodegradación, tales como la celulosa y lignina restante en las pilas. Esta etapa se la conoce generalmente como etapa de maduración. Su duración depende de numerosos factores. La temperatura descenderá paulatinamente hasta presentarse en valores muy cercanos a la temperatura ambiente. En estos momentos se dice que el material presenta estabilidad biológica y se da por culminado el proceso.

Las etapas mencionadas, no se cumplen en la totalidad de la masa en compostaje, es necesario mezclar de forma tal que el material que se presenta en la corteza pase a formar parte del núcleo. Estas remociones y reconfiguraciones de las pilas se realizan en momentos puntuales del proceso, y permiten además airear el material, lo que provoca que la secuencia de etapas descrita se presente por lo general más de una vez.

Desde el punto de vista microbiológico la finalización del proceso de compostaje se tipifica por la ausencia de actividad metabólica. Las poblaciones microbianas se

presentan en fase de muerte por agotamiento de sustrato y nutrientes. La biomasa puede permanecer constante por un cierto período aún cuando la gran mayoría de la población se haya hecho no viable. Las características descritas corresponden a un compost en condición de estabilidad. Esta condición se diagnostica a través de diversos parámetros. Algunos de ellos, se pueden determinar en campo (temperatura, color, olor), otras determinaciones se deben realizar en laboratorio (Sztern MGA y Pravia 1999).

#### Actividades de operación durante la etapa de digestión en el composteo

Las siguientes actividades deben realizarse obligatoriamente durante la etapa de digestión, con esto se puede garantizar que se concluya correctamente la fase de enfriamiento y maduración:

- Aireación y homogenización de la masa de compostaje

Este proceso tiene como objetivo favorecer los metabolismos aerobios y procurar que el proceso se lleve a cabo de manera homogénea en toda la masa de compostaje. Esta operación se puede hacer de manera manual o mecánica, siempre debe procurarse que en los movimientos de las pilas, el material perteneciente al núcleo de compostaje pase a formar parte de la corteza y éste del núcleo (Sztern MGA y Pravia 1999).

La cantidad de aire requerido para el proceso de compostaje es aproximadamente 15 a 20 m<sup>3</sup>/h por cada tonelada métrica de material orgánico. Se requiere más aire cuando la temperatura aumenta para mantenerla por debajo de los 70°C. Si la temperatura alcanza los 70°C, la cantidad de microorganismos decrece y el compostaje se detiene. El nivel de dióxido de carbono no debe exceder 8% y el oxígeno debe ser de 5 a 15% en la pila.

El amoníaco ( $NH_3$ ) generado durante la descomposición de orgánicos es volatilizado. Un gramo de orgánicos necesita 2 gramos de oxígeno para su descomposición. Sin embargo, durante los primeros días del proceso, a medida que la temperatura aumenta, la demanda de oxígeno puede ser mayor. Esto puede hacer crecer la demanda de oxígeno a entre 3 y 6 gramos por cada gramo de orgánicos. Cuando la humedad en la pila incrementa debido a la producción de agua en la reacción de compostaje, la demanda de aire incrementa también, pero incrementar el aire puede causar un descenso en la temperatura y esto, a su vez, hacer decrecer la tasa de descomposición (Turovsky 2006).

Durante la descomposición de orgánicos, el calor se perderá a través de la superficie de la pila tal que:

Ecuación 3. Pérdida de calor en el proceso de compostaje:  $Q_1$

$$Q_1 = k (T_c - T_a) \quad (3)$$

Donde,

$Q_1$  : es la pérdida de calor.

$k$  : es un coeficiente de intercambio de calor.

$T_c$ : es la temperatura de la masa de compostaje.

$T_a$  : es la temperatura ambiente fuera de la pila.

- Control de la temperatura

La cantidad de aireación o volteo de las pilas depende de cada caso en particular, una forma adecuada de saber el momento para realizar el volteo es mediante el control de la temperatura. Las aireaciones excesivas son perjudiciales así como los riegos en exceso. La temperatura debe tomarse en el centro del camellón, considerando la longitud del camellón, se recomienda tomar la temperatura en dos puntos equidistantes y tomar el valor promedio aritmético entre los dos puntos (Sztern MGA y Pravia 1999), (Colomer M. y Gallardo I. 2007).

- Control de humedad

Se puede hacer la llamada “técnica del puño cerrado”, que consiste en introducir la mano en la pila, sacar un puñado de material y abrir la mano. El material debe quedar apelmazado pero sin escurrir agua. Si corre agua, se debe voltear y/o añadir material secante (aserrín o paja). Si el material queda suelto en la mano, entonces se debe añadir agua y/o añadir material fresco (material vegetal) (FAO 2013). Esta técnica práctica y detallada se indica a continuación (Colomer M. y Gallardo I. 2007).

1. Se toma una muestra de material con la mano
2. Se cierra la mano y se aprieta fuertemente el mismo.
3. Si con esta operación, se verifica que sale un hilo de agua continuo del material, entonces se puede establecer o asumir que el material contiene más de un 40% de humedad.

4. Si no se produce un hilo continuo de agua y el material gotea intermitentemente, se puede establecer que su contenido en humedad es cercano al 40%.
5. Si el material no gotea y cuando se abre el puño de la mano permanece moldeado, se estima que la humedad se presenta entre un 20 y 30%.
6. Finalmente, si se abre el puño y el material se disgrega, se asume que el material contiene una humedad inferior al 20%.

Es importante tener en cuenta que los contenidos de humedad durante el proceso de composteo, donde se da la descomposición de materia orgánica por la actividad biológica de los microorganismos, debe estar en un rango entre el 50 y 60%, cuando se encuentran valores muy por fuera de este rango se deben aplicar las medidas recomendadas para estabilizar la humedad. Cuando está muy húmedo debe adicionarse material vegetal fresco, y cuando está muy seco, debe adicionarse agua.

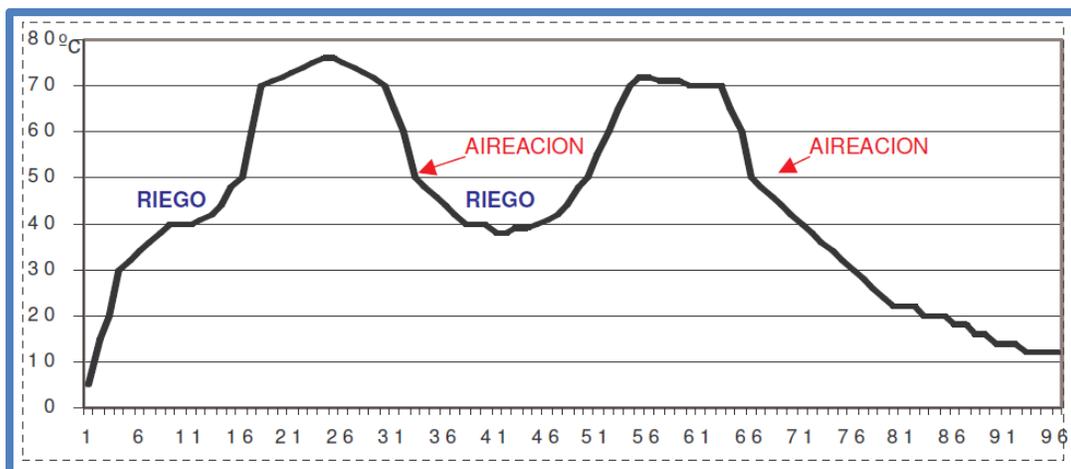
En procesos muy tecnificados donde se cuenta con instalaciones como laboratorios, y equipos para medición de parámetros, la humedad puede determinarse a través de metodologías estandarizadas que permiten obtener resultados muy exactos, tener un mayor control y por ende mejores resultados del proceso.

- Control de aireación y riego por temperatura

Se recomienda realizar las aireaciones cuando comienza a decrecer la temperatura, luego de haber alcanzado su valor máximo en etapa termogénica, (ver la Ilustración 4).

Inmediatamente al agotamiento de materiales la temperatura experimenta un descenso, y paulatinamente vuelve a subir hasta completar una nueva etapa termogénica. Si el material ha sido preparado y los camellones se han homogeneizado adecuadamente en el proceso de aireación, es frecuente que solo se presenten no más de dos etapas termogénicas. Si hay necesidad de riego es conveniente hacerlo en las etapas mesotérmicas. El riego debe ser lo más disperso posible, para no producir cambios bruscos en la temperatura. Este procedimiento de aireación y riego por control de temperatura, es una alternativa que tiene sus fundamentos en los grupos fisiológicos que intervienen, en los tipos de

metabolismos y en los productos de estos metabolismos (Sztern MGA y Pravia 1999).



Fuente: (Sztern MGA y Pravia 1999)

Ilustración 4. Control de temperatura y aireación de pilas

La Ilustración 4 presenta la evolución de la temperatura versus el tiempo de compostaje en días.

- Control de pH

Hay dos modalidades de medida, una directamente en la pila y otra en un extracto de la composta. Para la medida del pH en la pila, si el compost está húmedo pero no encharcado, se puede insertar una tira indicadora de pH en el compost. Se deja reposar durante unos minutos para absorber el agua, y se lee el pH mediante la comparación del color. Si se va a realizar la medida del pH en solución acuosa se toman varias muestras del compost y se colocan en recipientes con agua (volumen/volumen 1:5). Se agita y se toma la lectura, con potenciómetro, si no con tira indicadora (FAO 2013).

- Comprobación del final del proceso de compostaje (en fase de maduración):

Para comprobar que el compost ha entrado en fase de maduración, el material, aun húmedo no aumenta de temperatura nuevamente a pesar de que se realice el volteo (La temperatura se estabiliza a la temperatura ambiental). Si se tiene acceso a un laboratorio se puede realizar una prueba de respiración o de autocalentamiento (FAO 2013), o bien medir la concentración inicial y final de los SVT (Sólidos Volátiles Totales) estos en la composta cruda y estabilizada.

#### **2.5.4. Curado**

El área designada para el curado y almacenamiento debe ser acomodada para producir un material acorde con la regulación y suficientemente estable para los requerimientos del mercado. El tamaño máximo del material apilado para curado y almacenamiento depende de varios factores, que incluyen la porosidad del material, el contenido de humedad, la aireación de las pilas y condiciones regulatorias locales. Éstos varían usualmente entre 2.5 y 3.0 metros y están limitados por el alcance de la cargadora. Las áreas de curado y almacenamiento deben ser diseñada con superficies relativamente impermeables como concreto o asfalto y la escorrentía debe ser controlada y tratada. Las condiciones climáticas locales y el contenido de humedad deseado en el producto final determinan si el material debe ser o no cubierto (WEF 1995).

El curado puede ser practicado en sistemas de aireación forzada o en sistemas pasivos sin ventilación asistida. Muchas plantas de compostaje practican un curado de 30 días o más para producir un compost estable (WEF 1995), esto, si se va a comercializar.

El propósito del curado en las plantas de pilas estáticas es proveer tiempo adicional para que el producto compostado complete su estabilización antes de su distribución y uso. Las pilas de curado de 2.1 metros o menos deben ser usadas para prevenir el desarrollo de condiciones anaeróbicas en ellas. El curado aireado en sistemas pasivos es usado para prevenir la generación de olores durante el proceso manteniendo un ambiente aeróbico.

El grado de madurez del compost afectará su utilidad como abono del suelo o para macetas. La presencia de materias inorgánicas inestables en compost inmaduros ocasiona problemas con el crecimiento de las plantas por deficiencia de oxígeno, inmovilización de nitrógeno o toxicidad del amoníaco; igualmente, cuando son almacenados en condiciones anaeróbicas, pueden acumularse alcoholes, metano o ácido acético producido en el compost, con los riesgos consecuentes por combustión espontánea. Similarmente, el compost inmaduro puede contener suficiente material orgánico soluble para soportar el crecimiento de patógenos (WEF 1995).

### **2.5.5. Control de lixiviados**

Estos residuos líquidos generados durante el composteo deben ser recolectados por lo que para su control se incorporan instalaciones en muchas operaciones de compostaje, particularmente para plantas medianas y grandes. Si el área está situada dentro de una planta de tratamiento de agua, la recolección y transporte del lixiviado al área de tratamiento de la planta puede ser posible permitiendo un control in situ; de otro modo, se deben tomar las provisiones correspondientes para la disposición final del mismo. Es importante proveer una pendiente adecuada para el drenaje; se ha encontrado que pendientes entre 2.0 y 2.5% funcionan bien para las operaciones de compostaje (WEF 1995). Dependiendo de las características del material a compostar, los lixiviados pueden o no ser aprovechables, por lo que se necesita verificar su calidad.

### **2.5.6. Monitoreo del proceso: Principales parámetros del proceso de composteo**

El monitoreo de una pila estática o camellón usualmente incluye los parámetros básicos de humedad, temperatura, pH, concentración de nutrientes, porosidad y suministro de oxígeno. En la Tabla 8 se encuentra esquematizadas las características del compost que afectan la calidad del producto y deben ser monitoreadas junto con las frecuencias recomendadas. Los requerimientos de los usuarios del compost y los usuarios deben ser considerados cuando se establece un programa de monitoreo.

La medición de patógenos se puede determinar a partir de muestras del centro de las pilas, usando el indicador de Coliformes Fecales. Se recomienda medir esporádicamente la concentración de *Salmonella* y Fagos MS-2, los procedimientos para realizar estas mediciones corresponden a los indicados en Standard Methods (APHA, 1998).

Adicionalmente al monitoreo de la efectividad del compostaje, el monitoreo operacional de olores debe incluir como mínimo el uso de tubos indicadores de químicos específicos por colorimetría, incluyendo amoníaco y sulfitos orgánicos. La ventilación continua y los sistemas de monitoreo de la temperatura no son muy costosos y han probado su utilidad durante eventos de olor.

Tabla 8. Frecuencias de monitoreo típicas de las características de los biosólidos compostados

Parámetro	Procesamiento de la planta toneladas métricas / a			
	0-290	290-1500	1500-15000	>15000
Tipo de acondicionador, tamaño	Diario			Diario
Densidad de relleno	Trimestral			Semanal
Reducción de sólidos volátiles	Trimestral			Semanal
Contenido de humedad	Mensual	Mensual	Semanal	Semanal
Coliformes fecales y salmonella	Anual	Trimestral	Bimestral	Mensual
Metales / tóxicos	Anual	Trimestral	Bimestral	Mensual
Concentración de nutrientes	Anual			Semanal
Sales solubles	Anual			Semanal
Olor / Color	Diario			Diario
pH	Trimestral	Mensual	Mensual	Diario
Tamaño de partículas	Mensual			Semanal
Temperatura	Diario	Diario	Diario	Diario
Textura	Mensual			Semanal
Consistencia de producto	Diario			Diario
Tasa de respiración	Trimestral			Semanal
Estado de oxidación	Trimestral			Semanal
Tamaño de partículas	Diario			Semanal
Inactivación de semillas de malezas	Anual			Mensual
Fitotoxicidad	Anual			Semanal

Fuente: (WEF 1995)

#### 2.5.6.1. Humedad

Los lodos deben tener un contenido de humedad apropiado para que tenga las condiciones necesarias que requiere un tratamiento final como el composteo. Normalmente después del tratamiento de aguas residuales estos salen con altos porcentajes de humedad, por lo que requieren la aplicación de postratamientos para disminuir los altos niveles de humedad. Sin embargo el lodo no puede estar seco completamente, éste requiere un cierto grado de humedad ya que, según (Soliva y Huerta 2004), el agua es esencial para favorecer la migración y colonización microbiana apropiada para cada fase del proceso, así como para la difusión de los

residuos metabólicos. Para poder alcanzar y mantener un buen equilibrio con el contenido de aire, los contenidos de agua recomendados varían en función de los materiales a tratar y sus características físicas.

La descomposición de la materia orgánica depende de la humedad. El contenido de humedad óptima es de 50 a 60 %. El contenido de humedad es también importante para la integridad estructural y la porosidad suficiente en la pila de composteo. Si la mezcla de composta inicial tiene más del 60% de humedad la estructura integral correcta no se ha alcanzado y la mezcla no tendrá una adecuada descomposición.

Menos del 40% de humedad puede limitar la velocidad de descomposición, más del 60% hace que no se logre una integridad estructural adecuada y que la mezcla no se descomponga adecuadamente. Los lodos deshidratados municipales usualmente tienen 65 a 82% de humedad, dependiendo del equipo de deshidratación utilizado, por lo cual es necesario mezclar el lodo con material de relleno seco (Turovsky 2006).

Para medir los porcentajes de humedad en las pilas se recomienda obtener muestras homogéneas de cuatro puntos diferentes. La determinación del porcentaje de humedad se puede realizar por secado a 105°C hasta obtener peso constante. Al respecto, para asegurar el buen funcionamiento del proceso de composteo, este parámetro puede medirse diariamente con la técnica del puño y semanalmente con una técnica estandarizada.

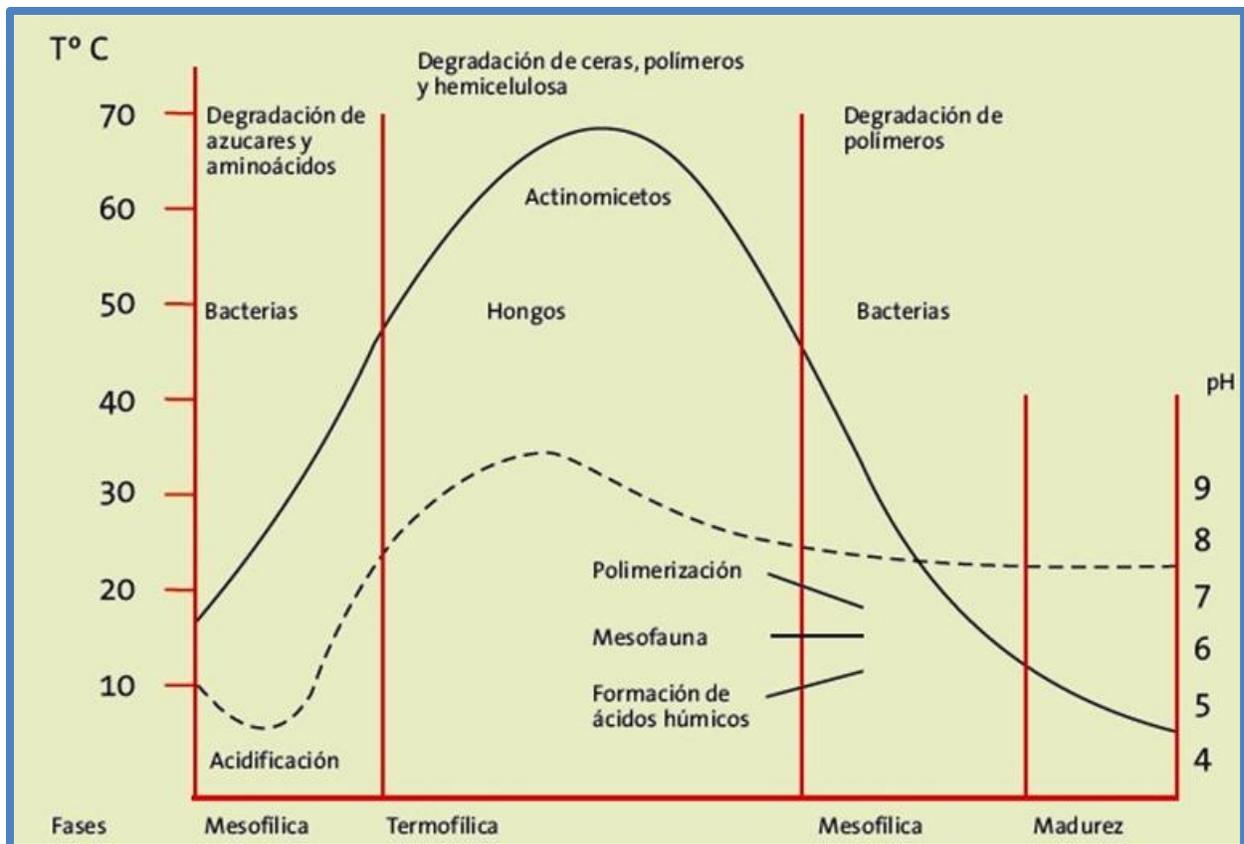
#### **2.5.6.2. Temperatura**

En el compostaje de lodos la temperatura es un factor que indica la evolución del proceso de compostaje, la variación de la temperatura da indicios de la actividad microbiana y es uno de los factores determinantes de la estabilidad de la materia orgánica. Este parámetro es uno de los más importantes cuando se está realizando un tratamiento final a los lodos, porque de este depende que el proceso evolucione y se llegue a obtener el resultado final deseado.

Para asegurar la adecuada eliminación de organismos patógenos, la temperatura en las áreas más frías de la pila debe alcanzar a menos 55°C durante tres días consecutivos; ésta se encuentran normalmente en las puntas, particularmente en el extremo cercano al escape de gas y en la base de la pila.

El día que la pila es construida, típicamente se encuentra a temperatura ambiente; durante los primeros cinco días debe subir a más de 50°C; la aireación debe ser ajustada diariamente para mantener temperaturas en el rango óptimo de 55 a 60°C. Cuando los criterios de reducción de patógenos hayan sido satisfechos, la temperatura puede ser sostenida entre 45 y 65°C.

Cuando los microorganismos presentes en la mezcla cuentan con las condiciones adecuadas éstos se reproducen y aparece una sucesiva diversidad microbiana (mesófila y termófila) con múltiples funciones y actividades sinérgicas. Al incrementarse la actividad biológica se genera calor que es retenido provocando un incremento en la temperatura (ver Ilustración 5). La fase termogénica permite maximizar la higienización propiciando: la prevención del crecimiento y diseminación de patógenos durante el compostaje, la destrucción de los patógenos inicialmente presentes, y la producción de un producto final no recolonizable por patógenos (Soliva y Huerta 2004)



Fuente: (Álvarez 2008)

Ilustración 5. Evolución de la temperatura durante el proceso de maduración

Temperatura: \_\_\_\_\_

pH: - - - - -

Según Turosvsky, 2006, para lograr la mayor eficiencia en la operación, el proceso de compostaje depende de temperaturas entre 50 y 65°C, pero no sobre 70°C. Para alcanzar los mejores resultados, la temperatura debería ser mantenida entre 50 y 55°C los primeros días y entre 55 y 60°C en el tiempo subsiguiente. Factores como el contenido de humedad, las tasas de aireación, el tamaño y la forma de la pila, las condiciones atmosféricas y los nutrientes influyen la distribución de la temperatura en la pila de compostaje.

La temperatura de la pila puede ser controlada vigilando el tiempo en que el escape de gas está operando. Varios puntos de monitoreo pueden ser usados en pilas estáticas; al menos un punto está en el frente, uno en el medio y otro en la punta trasera de cada pila; monitoreando estos tres puntos diariamente un operador puede resolver los problemas y controlar el proceso de compostaje completo. La temperatura debe monitorearse diariamente desde el inicio del proceso de composteo hasta que termine, cuando ya este parámetro se estabilice.

Se puede medir utilizando un termómetro de vara. La temperatura interna de la pila corresponde a la medición en el centro de ésta. También suele usarse termómetros con carátula tipo vástago. Dependiendo de la altura de la pila, se determina la profundidad para colocar el termómetro. Lo ideal es que sea en la parte más central de la pila.

La variación de la temperatura está muy relacionada con la aireación que se proporcione a la mezcla. La aireación produce un enfriamiento del material y favorece la renovación del aire y la evaporación; a la vez incrementa la actividad de los microorganismos y por tanto el desprendimiento de energía, pero también se puede provocar una excesiva pérdida de humedad y afectar el comportamiento del proceso ya que en exceso se puede presentar una disminución de la temperatura. La aireación además de aportar oxígeno, tiene la función de disipar la energía calorífica a través del calor latente de vaporización del agua. Para mantener la temperatura dentro de los niveles aconsejables se requiere más volumen de aire que para mantener el nivel de oxígeno necesario para un proceso aeróbico.

En el proceso debe evitarse la generación de calor y elevación excesiva de la temperatura para que no se de la autolimitación microbiana. El aumento de la temperatura en exceso podría disminuir el ritmo de la transformación del material, esto ocurre cuando se trata material muy energético y degradable y/o cuando se tratan grandes cantidades (Soliva y Huerta 2004).

Para mantener la temperatura más o menos estable se pueden cubrir las pilas con el material ya compostado, con material inactivo como hule de color negro, o con ramas. Tener cuidado si la zona es lluviosa, en este caso se requerirá tener techado

#### **2.5.6.3. pH**

El pH de la mezcla de compostaje puede generalmente estar en el rango 6 a 9. El rango óptimo de pH para el mayor crecimiento de bacterias es entre 6 y 7.5 y entre 5.5 y 8 para hongos. Aunque el pH en la pila varía a lo largo del periodo de compostaje, este es esencialmente autoregurable. Es difícil alterar el pH para el óptimo crecimiento biológico (Turovsky 2006).

Podría decirse, de una manera general, que el pH inicial de la mezcla no tiene que ser un impedimento para el proceso; pero si es verdad que un valor extremo, aparte de indicar algún problema en el origen del residuo, puede limitar el tipo de actividad biológica y por tanto influir en el desarrollo (velocidad, tipo de reacciones) del proceso. Puede ser más problemático un pH extremo en la zona básica, debido a que, además de afectar al tipo de microorganismos, afecta a los equilibrios ácido base que influyen en la conservación del nitrógeno (Soliva y Huerta 2004).

Para medir el pH se recomienda seleccionar cuatro puntos de la pila para tomar las muestras, y posteriormente mezclarlas para obtener una muestra homogénea. A dicha muestra, por cada 10 g de muestra se debe agregar 50 ml de agua destilada, se mezcla y se deja reposar por 10 minutos, luego se mide el pH utilizando los equipos con que se cuente, podría ser con método electrométrico (Castillo, Mena y Alcota 2002).

#### **2.5.6.4. Concentración de nutrientes**

El Carbono y el Nitrógeno son requeridos como fuentes de energía para el crecimiento de microorganismos. Aproximadamente 30 partes de peso de carbono biodegradable es usado por microorganismos por cada parte de nitrógeno. Por lo tanto, la proporción más adecuada de Carbono-Nitrógeno en la composición de la mezcla es 25:1 a 35:1 de peso. Proporciones menores incrementan la pérdida de nitrógeno por volatilización de amoníaco, resultando en la pérdida de valores nutritivos de la composta y la emisión de olor a amoníaco. Valores mayores

conducen progresivamente a un tiempo mayor de compostaje y el material orgánico remanente activa bien la etapa de curado (Turovsky 2006).

Algunos agentes aumentadores de volumen y enmiendas proveen el carbono suplementario y ambas mejoran el balance de energía y la relación carbono nitrógeno. En virutas de madera solo una pequeña capa de madera está disponible como carbono. El carbono en las enmiendas como el aserrín está más fácilmente disponible (Turovsky 2006).

Para algunos lodos residuales que tienen baja relación C/N, es conveniente adicionar algunos materiales ricos en nutrientes y materia orgánica, con alta proporción C/N, con lo que se favorece el proceso de compostaje, requiriéndose menor tiempo de arranque y menor tiempo para alcanzar su estabilización.

Cruz O. A., 2013, indica que los lodos residuales tienen una relación Carbono – Nitrógeno (C/N) de aproximadamente 10:1, por lo que se requiere, para mejorar el proceso de composteo, mantener esta relación entre 30:1 a 40:1, para ello se utiliza ya sea un material acondicionador o bien un agente de enriquecimiento (estiércol de animales, preferentemente). Las mejores relaciones tienen que obtenerse durante la práctica del composteo, ya que cada lodo residual presenta calidades diferentes según la composición del agua residual de donde provienen y del proceso usado para el tratamiento del agua.

#### **2.5.6.5. Porosidad**

Para el compostaje de lodos es necesario que se tengan espacios vacíos por donde penetre y circule el aire, de manera que se creen condiciones apropiadas para que los microorganismos aerobios presentes en las pilas de compostaje realicen su función. En estos casos se ha visto que de un 35 a 45% del volumen de la pila debe estar compuesto por pequeños espacios abiertos.

Debe haber un equilibrio entre el tamaño del material acondicionador, el contenido de agua de la mezcla y el tamaño de la pila, con esto se logrará una buena estabilización del lodo (Cruz O. A. 2013).

#### **2.5.6.6. Suministro de oxígeno**

Debido a que el proceso de compostaje de lodos se realiza en condiciones aerobias, el aporte de oxígeno tiene gran importancia ya que el tipo de metabolismo dominante es el aerobio. El oxígeno puede ser suministrado por difusión pasiva o por convección, favorecida por las diferentes temperaturas inducidas por la actividad microbiana. El oxígeno que consume la actividad microbiana para su metabolismo debe ser recuperado y para ello es necesario forzar la entrada de aire a la matriz o asegurar unas adecuadas características físicas de la misma (Soliva y Huerta 2004).

Para garantizar la continua incorporación de oxígeno en el composteo se deben aplicar ciertas técnicas que permiten la aireación de la mezcla y con ello la adición de oxígeno en la matriz. La técnica más sencilla y aplicada es la del volteo, el cual beneficia el proceso no solo por la introducción de oxígeno para el metabolismo de los microorganismos sino también por otros factores involucrados en el proceso.

Dentro de los factores importantes que ayudan en el control de los niveles de oxígeno, se encuentra el tipo de materiales con que se realiza la mezcla de lodo, ya que es posible conseguir una mezcla autoaireante usando materiales que propicien una buena proporción de poros y una estructura física que permita la entrada de oxígeno para que los microorganismos cumplan su función.

La concentración de oxígeno en la masa de la composta puede mantenerse entre 5 y 15 % del volumen del gas. Aunque en el proceso de la hilera la concentración de oxígeno menor a 0.05% ha sido observado sin síntomas anaeróbicos, un mínimo de 5% es generalmente lo requerido para condiciones aeróbicas. Las concentraciones de oxígeno mayores que el 15% resultarían en un descenso de la temperatura por mayor flujo de aire. El oxígeno debería llegar a todas las partes de los materiales de la composta para óptimos resultados (Turovsky 2006).

El contenido de oxígeno debe exceder 5% en todos los puntos para evitar condiciones anaeróbicas y generación de olores. Éste no tiene que ser medido diariamente. Mediante el seguimiento regular del oxígeno y la temperatura el proceso puede ser monitoreado más de cerca y los ajustes en la tasa de aireación ejecutados para asegurar un buen desempeño (WEF 1995).

### **2.5.7. Secado y cribado, almacenamiento y distribución**

- Secado

El secado en hileras es medido mediante el monitoreo de los sólidos totales. Las hileras deben contener una concentración inicial de sólidos del 40% y una concentración final promedio de entre 55 y 60%. El material no debe exceder 60% de sólidos porque será demasiado seco y habrá generación de polvo cuando la pila sea volteada, removida del campo y localizada en una pila. Si el material es demasiado húmedo (menos del 55% de sólidos), será difícil de cribar y empacar antes de su distribución y comercialización (WEF 1995).

En pilas estáticas aireadas, el secado se logra sólo mezclando el material, así se logra la pérdida de buena parte de la humedad. El secado puede mejorarse mediante la ventilación forzada y manteniendo el almacenamiento del material bajo cubierta para proteger el material compostado de la lluvia. La humedad continuará disminuyendo a medida que el material sea poco a poco estabilizado y reapilado (WEF 1995).

- Cribado, cernido o Tamizado

Para lograr un compost apto para su aplicación agronómica, sea en forma manual o mecánica, el mismo debe presentar una granulometría adecuada y homogénea y estar libre de elementos orgánicos o inorgánicos putrescibles que dificulten su aplicación. Hay muchas alternativas técnicas para el refinado del compost: separación balística, centrífuga, o cribado (granulométrica). La experiencia indica que la separación granulométrica por cribado es la menos costosa de instrumentar, y la que ha dado mejores resultados. Las cribas, pueden ser vibratorias o de rotación. En particular las rotatorias, presentan un mejor rendimiento cuando se trata de procesar volúmenes importantes. El tamaño de la malla de la criba dependerá de la granulometría que se desea obtener, no obstante para utilización agrícola se recomiendan mallas de  $1 \times 1 \text{ cm}^2$ . (Colomer M. y Gallardo I. 2007).

Una vez se ha comprobado que la composta está madura, se realiza un tamizado del material con el fin de eliminar los elementos gruesos y otros residuos gruesos. El tamaño del tamiz comúnmente es de 1.6 cm (FAO 2013).

Al realizar el proceso de cernido o cribado, se requiere que la humedad del compost sea inferior al 20%. Estos procesos deben hacerse obligatoriamente bajo techo para no correr riesgos de que se humedezca. Es conveniente que en el área

de acopio el material sea extendido en capas no superiores a los 30cm para favorecer la pérdida de humedad y alcanzar más rápidamente la humedad requerida, y cuando se tenga la humedad recomendada ya el compost estará listo para su refinado o cribado. (Colomer M. y Gallardo I. 2007).

Después del cribado, se genera un rechazo que puede ser del orden del 5 al 20% dependiendo del material que se usó como acondicionador y estructurante, y de la granulometría que se desee obtener. El rechazo puede ser incorporado nuevamente al sistema de compostaje si se trata de material orgánico resistente a la biodegradación. (Colomer M. y Gallardo I. 2007). En algunos sistemas se usan otros materiales en la mezcla para generar porosidad, y puede ser reciclado durante varios procesos, es decir, pueden ser reutilizados muchas veces, como por ejemplo la gravilla de tezontle y los neumáticos triturados.

En el cribado de pilas estáticas se tiene como fin reciclar la mayor cantidad posible de material de relleno (para reducir el costo y la cantidad de nuevo material requerido) y para producir un compost cribado que sea uniforme y tenga un tamaño de partículas deseable para el consumidor final. Las cribas con aberturas de 10 milímetros son las más comúnmente usadas aunque los requerimientos del consumidor final puedan ser mayores o menores. Los dos controles usados en el proceso de cribado son el contenido de sólidos en el producto y la velocidad de alimentación de la criba. Un contenido de sólidos entre 55 y 60% es recomendado para ser cribado en proceso de compostaje (WEF 1995).

El cribado para producir fertilizante requiere de una criba de 6 milímetros aproximadamente. Usuarios de compost para horticultura requieren típicamente un tamaño máximo de 12 milímetros. Para recuperación de suelos y agricultura en general se aceptan tamaños más grandes. Los dispositivos usados típicamente para el cribado del compost incluyen cribas rotatorias, cribas estáticas, cribas de cama vibratoria y trommels. Entre los factores a considerar para seleccionar la criba están la cantidad de material, la eficiencia de separación de la criba a diferentes contenidos de humedad en el compost, la flexibilidad para el cambio de tamaño de la criba para hacer frente a diferentes materiales de relleno y requerimientos del cliente y la facilidad de limpieza (WEF 1995).

- Almacenamiento, acopio y empaque

Finalizado el proceso de Compostaje y la refinación del mismo, es conveniente acopiar bajo techo. Si no se dispone de la infraestructura necesaria, una alternativa es cubrir los acopios con materiales impermeables (por ejemplo, film de polietileno). El Compost expuesto a la intemperie, pierde rápidamente valores de sus nutrientes esenciales, por lavado y lixiviación. En referencia al empackado, son muchas las alternativas hoy disponibles que aseguran el mantenimiento de la calidad del producto. Se debe evitar, el empleo para el empackado de cualquier tipo de bolsa o recipiente que haya contenido agrotóxicos o cualquier otra sustancia química (Sztern MGA y Pravia 1999).

Las plantas de compostaje necesitan proveer almacenamiento para biosólidos, nuevos agentes de relleno, agentes de relleno reciclados y compost final. El almacenamiento de biosólidos debe ser provisto sólo si es necesario para las operaciones de deshidratación antes del mezclado, aunque típicamente no se usa en la práctica más de un día de almacenamiento. El almacenamiento de material de relleno nuevo y reciclado es requerido típicamente para mantener una operación constante. Adicionalmente, puede proveerse almacenamiento para el producto del compost in situ. La demanda de compost usualmente es cíclica y depende de las temporadas agrícolas; dependiendo de las condiciones del mercado local y las condiciones climáticas, los productos del compost podrán estar almacenados durante 3 a 6 meses (WEF 1995).

## **2.6. Tipos de composteo y dimensionamiento de instalaciones de compostaje**

En los sistemas de compostaje existen varias formas de realizar el proceso, que varían según la disponibilidad de espacio y las condiciones del sitio donde se realiza. Independientemente del tipo de sistema que se elija el objetivo siempre es el mismo y si se realizan los controles de parámetros y las operaciones esenciales requeridas se pueden obtener resultados óptimos para dar una disposición final a los lodos residuales. Los sistemas de compostaje se pueden clasificar de varias formas según las características de funcionamiento, los elementos en que se realiza, la estructura física del espacio donde se depositan y las condiciones de operación.

Una de las clasificaciones puede ser la que los agrupa de acuerdo a los procesos de operación, en esta clasificación se tienen dos grupos: Sistemas estáticos y Sistemas

dinámicos. Cada grupo se subdivide en varios sistemas según el contenedor o forma de disponer el material (Moeller C., y otros 2008):

- Sistemas estáticos
  - ✓ Pilas estáticas
  - ✓ Reactor cilíndrico
  - ✓ Reactor rectangular
  - ✓ Túnel
  
- Sistemas dinámicos
  - ✓ Pilas aireadas
  - ✓ Reactor rectangular
  - ✓ Reactor circular
  - ✓ Reactor cilíndrico-horizontal

Otra clasificación para los sistemas de compostaje difiere de la anterior ya que en esta se clasifican según la forma como se dispone los materiales, ya sea en forma de pila o en contenedores: Sistemas en pilas de compostaje y Sistemas en reactores, aireados con sistemas de mezclado, respectivamente. Los sistemas en pilas de compostaje se denominan así debido a que la masa de material de compostaje se dispone en forma de pila, en estructuras que se realizan con una morfología y dimensiones determinadas (Colomer M. y Gallardo I. 2007):

- Sistemas en pilas de compostaje: Según el método de aireación utilizada este sistemas se subdivide en:
  - ✓ Sistemas en Pilas Móviles: La aireación y homogenización se realiza por movimiento de las pilas.
  
  - ✓ Sistemas de Camellones o Parvas Estáticas: La aireación se realiza mediante instalaciones fijas, en las áreas de compostaje (métodos Beltsville y Rutgers), que permiten realizar una aireación forzada sin necesidad de movilizar las parvas.
  
- Sistemas en Reactores: en este sistema los procesos de compostaje se hacen en instalaciones que pueden ser estáticas o dinámica, y se conocen como reactores. Los reactores son estructuras generalmente metálicas: cilíndricas o rectangulares, en las que se controlan los parámetros como humedad y aireación, procurando

que permanezcan relativamente constantes. Algunas plantas los controlan a través de un ordenador. Los reactores móviles permiten la mezcla continua de los materiales a través de dispositivos mecánicos, logrando un proceso homogéneo en toda la masa del compostaje. En éstos se aceleran las etapas iniciales del proceso, cuando se terminan las etapas activas biológicamente, el material se retira del reactor para ser llevado a la etapa de maduración. Estos sistemas son siempre sistemas industriales, se usan para cantidades grandes de volumen que requieren reducida superficie, se usan comúnmente para el compostaje de residuos sólidos urbanos (Colomer M. y Gallardo I. 2007).

En algunos países estos sistemas se conocen como *In- vessel process*. El proceso consiste en un sistema adjunto cualquiera vertical u horizontal donde una mezcla de biosólidos, agentes de carga, aumentadores de volumen, o enmiendas reaccionan en un ambiente controlado. Estos procesos son operados por volteo mecánico, estructuras fijas y flujo de aire. Los sistemas típicos incluyen sistemas verticales, sistemas de camas, flujo enchufado y sistemas de tambores giratorios (WEF 1995).

Los sistemas in-vessel potencialmente ofrecen un producto más estable y consistente que los otros utilizando un menor espacio y ofreciendo una mejor contención y control de olores. Estos sistemas son, típicamente, procesos multietapas: la primera etapa ocurre en un reactor, llamado birreactor (que puede tener flujos de pistones horizontales o verticales o ser de agitación), en donde el material permanece entre 10 a 21 días (WEF 1995). Este tipo de reactores requiere contar con sensores de temperatura, sistema de medición de gases, sitios para toma de muestra y colecta de lixiviados.

### **2.6.1. Camellones o pilas de composteo**

El sistema de camellones o pilas es el menos complejo y consiste en situar la mezcla de lodos o biosólidos y los materiales de relleno en filas largas que son removidas usando equipo móvil. Existen dos tipos de camellones utilizados: el método común y el aireado que difieren en cuanto al método de aireación; el método común recibe su aireación mediante ventilación natural a través de un movimiento y difusión del aire conveniente, mientras que el aireado construye las hileras sobre un sistema de aireación mecánica mediante bombas que sirven de complemento a la aireación natural. El segundo método requiere menor extensión de terrenos, control de

olores, secado y mejores procesos de control y desempeño durante condiciones climáticas adversas pero sus requerimientos de capital son mayores. Involucra mezcla de biosólidos con un agente aumentador de volumen y apilar la mezcla en pilas largas aproximadamente 1.5 a 2 m de altura y de 2 a 3 m de ancho. La aireación es proporcionada por las vueltas periódicas de las pilas (WEF 1995).

#### Dimensionamiento de la instalación de compostaje

De acuerdo con un estudio realizado en México para el composteo de lodos residuales, cuya producción es menor a 10 ton de lodo húmedo/día, se encontró que el tiempo requerido para estabilizar el lodo fue de 21 días, por lo que el área requerida para realizar el composteo puede calcularse considerando un espacio suficiente para formar un promedio de 21 pilas que incluyen: (lodo + material acondicionador + agente enriquecedor), más el área requerida para maniobras. A las pilas de control de olor se les debe incrementar aproximadamente el 10% del área de cada pila de composteo. El cálculo del área de las pilas se hace de la siguiente forma:

$$\text{Área} = 1.1 (\text{Volumen de 21 días: } (R+1) / \text{Altura de la pila})$$

$$R = \text{Volumen de material acondicionador} + \text{Volumen de lodo} + \text{Agente enriquecedor}$$

Al área resultante se le debe aumentar de 12 a 15 m<sup>2</sup> para maniobras. Cuando se requiere tener área de curado se calcula para la producción de composta de 30 días, el cálculo se efectúa de la misma forma que el área de composteo. También se debe considerar el área para las operaciones de cribado y almacenamiento, esta depende de las condiciones como opera la planta (Cruz O. A. 2013).

Se debe considerar la cantidad de lodo desaguado diario (base seca, éstos con un 70 - 80% de humedad), la cantidad de agente acondicionador para dar porosidad (por ejemplo residuos vegetales como varas o cortezas, o de madera triturados), y la cantidad de material enriquecedor (por ejemplo el estiércol de animales) para aumentar la relación C/N y favorecer el composteo y/o acortar el tiempo de estabilización.

Según Sztern MGA & Pravia, 1999, para realizar el diseño de las instalaciones requeridas en el sistema de compostaje por pilas y la estructuración de las pilas, primero es necesario cuantificar los volúmenes que serán dispuestos para

compostar (volumen de lodo + volumen de material acondicionador + volumen de agentes enriquecedores), y la frecuencia de ingreso de los mismos. Con esta información es posible calcular la necesidad de área de compostaje y determinar la Unidad de Compostaje que la define como la masa de residuos que permiten la conformación de una pila y que ingresará al sistema como una unidad independiente del resto.

La unidad de compostaje se debe manejar con medidas volumétricas y para ello se requiere determinar parámetros como densidad, volumen y masa, de los materiales que se incorporarán en la mezcla: (lodo + material acondicionador + agente enriquecedor), para lo cual se usa la ecuación (4) (Miliarium. Ingeniería Civil y Medio Ambiente 2014).

Ecuación 4. Relación densidad, masa y volumen

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \left(\frac{\text{Ton}}{\text{m}^3}\right) \quad (4)$$

Donde,

- $\rho$ : Densidad del material (ton/m<sup>3</sup>)
- m: masa del material (ton)
- V: Volumen del material (m<sup>3</sup>)

Por lo tanto, se determina como Unidad de Compostaje una masa en toneladas con un respectivo volumen expresado en m<sup>3</sup>, de acuerdo a la generación mensual de material y a la densidad que este tenga (Colomer M. y Gallardo I. 2007).

Barrios, 2009; indica que en la relación del volumen de lodos respecto a la sequedad, a mayor deshidratación de los lodos menor volumen se obtiene, esta relación se representa mediante la siguiente ecuación (5):

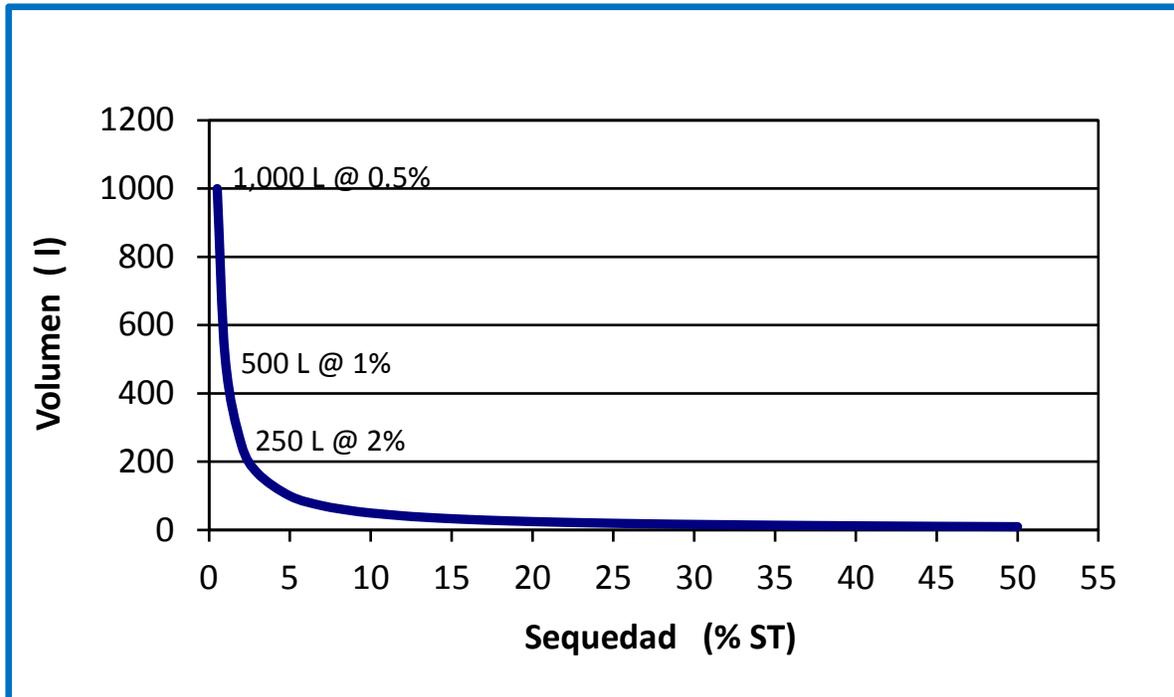
Ecuación 5. Relación volumen y sequedad

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{ST_2}{ST_1} \quad (5)$$

Donde,

- V<sub>1</sub>: Volumen inicial de lodo (sin deshidratar)
- ST<sub>1</sub>: Porcentaje de sólidos totales en el lodo antes de deshidratación
- V<sub>2</sub>: Volumen final de lodo (después del proceso de deshidratación)
- ST<sub>2</sub>: Porcentaje de sólidos totales en el lodo después de deshidratación

En la Ilustración 6 se muestra el comportamiento de la gráfica que representa el volumen respecto a la sequedad en los lodos:



Fuente: (Barrrios P. 2009)

Ilustración 6. Relación del volumen con la sequedad

Se considera que el 1% ST es equivalente a 10g de sólidos secos/l de lodo residual.

Conociendo el volumen inicial de lodos que se generan en la PTAR y su contenido de humedad, y definiendo a qué porcentaje de humedad se debe llegar después del proceso de deshidratación, se puede calcular el volumen final de lodos que estaría disponible para el proceso de composteo, aplicando la ecuación 6.

Ecuación 6. Volumen final después de deshidratación:  $V_1$

$$V_2 = V_1 \frac{ST_1}{ST_2} \quad (6)$$

Para diseñar la pila de compostaje no se aconseja que sea de pequeños volúmenes, porque esto genera fluctuaciones muy bruscas de temperatura, a menos que se tomen las medidas necesarias para conservar el proceso, dentro de los parámetros de control óptimos. No se recomienda tampoco que la base inferior de las pilas sea

inferior a 2m. Se debe tomar como altura la mitad de la base, con el objetivo de obtener una buena relación superficie/volumen.

Para determinar las dimensiones de una unidad de compostaje. Se hace el siguiente procedimiento (Sztern MGA y Pravia 1999):

Dimensión de la base: B (m)

Altura de la pila estaría dada por la siguiente ecuación (7):

Ecuación 7. Altura de la pila: A (m)

$$A = \frac{B}{2} \text{ (m)} \quad (7)$$

El área transversal de la pila se calcula usando la ecuación (8):

Ecuación 8. Área transversal de la pila:  $A_{tp}$  ( $m^2$ )

$$A_{tp} = \left[ \frac{B(m) \times A(m)}{2} \right] \text{ (m}^2\text{)} \quad (8)$$

El volumen de la pila por metro lineal se termina con la ecuación (9):

Ecuación 9. Volumen de la pila por metro lineal:  $V_p$  ( $m^3$ )

$$V_p = \left[ \frac{B(m) \times A(m)}{2} \right] \times 1m \text{ (m}^3\text{)} \quad (9)$$

El volumen total de material para compostar, que incluye lodo más el material acondicionar, más el agente enriquecedor, se denominará:  $V_t$  ( $m^3$ )

Ecuación 10. Volumen total de material a compostar:  $V_t$  ( $m^3$ )

$$V_t = (V_{\text{lodo}} + V_{\text{acond.}} + V_{\text{agente enriq.}}) \text{ (m}^3\text{)} \quad (10)$$

- $V_t$ : Suma de todos los materiales requeridos para el compostaje. ( $m^3$ )  
 $V_{\text{lodo}} = V_2$ : Volumen de lodo deshidratado dispuesto para compostar. ( $m^3$ )  
 $V_{\text{acond.}}$ : Volumen de material acondicionador incluido en la mezcla. ( $m^3$ )  
 $V_{\text{agente enriq.}}$ : Volumen de agente enriquecedor incluido en la mezcla. ( $m^3$ )

Cruz O. A., 2013, indica que debido a que el lodo después de haber sido sometido al proceso de deshidratación su estructura queda como una pasta (Ver Ilustración 7), por lo que obligatoriamente debe mezclarse con un material acondicionador (por ejemplo trozos pequeños de madera) que le brinde porosidad y con agentes o enmiendas enriquecedoras que equilibren la relación C/N (materia orgánica y nutrientes, por ejemplo estiércol de caballo), para que se pueda dar un buen proceso de compostaje en un tiempo de aproximadamente 30 días. Con esto se asegura más fácilmente el control de parámetros como temperatura, humedad, oxígeno y mantener una mezcla homogénea.



Fuente: (Cruz O. A. 2013)

Ilustración 7. Lodo deshidratado con un 70 % de humedad, con apariencia de pasta

Se recomienda que antes de hacer la instalación definitiva para compostar los lodos, se deben hacer pruebas previas a escala pequeña, para determinar parámetros óptimos, las proporciones del lodo y los materiales adicionados en la mezcla, para obtener composta eficientemente estabilizada.

Para determinar el volumen total a compostar se recomienda que en la mezcla se adicione un porcentaje de lodo entre el 40 y el 60%, y el resto distribuido entre material acondicionador y agente enriquecedor o enmienda, como se muestra a continuación:

- Lodo: 40 - 60%
- Acondicionador: 30 - 40%

- Agente enriquecedor o enmienda: 1 - 10%

La longitud de una unidad de composta,  $L$  (m), se calcula a partir de la ecuación (11):

Ecuación 11. Longitud de una unidad de composta:  $L$  (m)

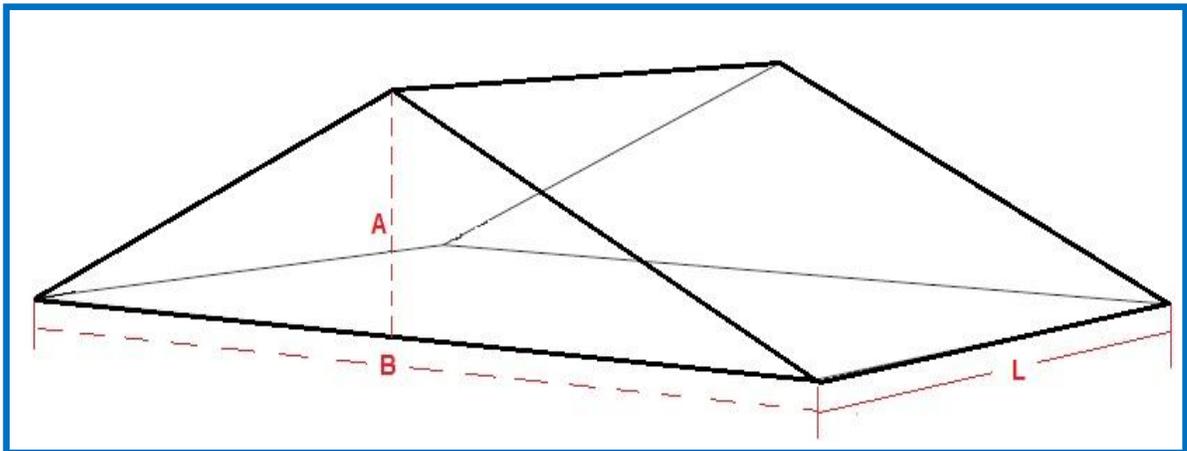
$$L = \frac{V_t \text{ (m}^3\text{)}}{A_{tp} \text{ (m}^2\text{)}} \quad (\text{m}) \quad (11)$$

El área de la base de una pila para el compostaje del material,  $A_{bp}$  (m), se determina mediante la ecuación (12).

Ecuación 12. Área de la base de una pila para compostar:  $A_{bp}$  (m)

$$A_{bp} = B \times L \text{ (m)} \quad (12)$$

A continuación en la Ilustración 8 se muestra un esquema de cómo podría quedar una pila con sus respectivas dimensiones.



Fuente: (Colomer M. y Gallardo I. 2007)  
Ilustración 8. Esquema general de una pila de compostaje.

Para el diseño de las pilas de compostaje también se debe considerar un parámetro importante denominado tiempo de compostaje ( $T_c$ ), para el compostaje se recomienda un tiempo de digestión de 30 días, este corresponde al tiempo transcurrido desde la conformación de una pila hasta la obtención del compost estable. El tiempo de compostaje varía según las características de los residuos a compostar, las condiciones climatológicas (temperatura ambiente, % de humedad

relativa, etc.); manejo fisicoquímico; manejo microbiológico y características del producto final que se desea obtener (Colomer M. y Gallardo I. 2007) .

De acuerdo a los volúmenes de lodo generados en la PTAR se debe decidir cada cuanto se realizarán las pilas para el composteo, con el fin de tener una dimensiones apropiadas de tal manera que las pilas no sean muy pequeñas y tampoco muy grandes, y que se permita la realización de las maniobras en las operaciones.

El área requerida para el proceso de compostaje del material generado será igual a  $n$  veces ( $n$ : número de pilas durante el tiempo de compostaje) el área de la base para el compostaje del material generado:  $A_{bp}$  (m). Por lo tanto el área total para las pilas de compostaje se calcula mediante la ecuación (13).

Ecuación 13. Área total para las pilas de compostaje de lodos:  $A_{tc}$  (m)

$$A_{tc} = n \times A_{bp} \quad (m) \quad (13)$$

Donde:  $A_{tc}$ : Área total para instalación de las pilas de compostaje  
 $n$ : Número de pilas durante el tiempo de compostaje  
 $A_{bp}$ : Área de la base de una pila

Si las pilas se realizan cada tres días, y se elige un tiempo de compostaje corresponde a 30 días de acuerdo al tipo de material que se usará en la mezcla, en total se harían 10 pilas al mes.

#### Área de maniobras (pasillos)

Se debe considerar también el espacio necesario entre pilas que se conocen como pasillos. Este espacio es necesario para manejar los camellones o pilas estáticas. Las dimensiones del mismo estarán sujetas a la forma en que se realicen las operaciones de remoción y aireación. Si la operación es manual, el ancho del pasillo puede situarse en el entorno de 2 a 2,5 m (Sztern MGA y Pravia 1999). Si la aireación es mecánica el área de pasillos depende del tipo de equipos que se estén utilicen para esta operación.

Cuando la operación es mecanizada y se usan equipos como pala cargadora, tractor con pala, entre otros, los pasillos deben tener el ancho suficiente para que la máquina pueda empalar perpendicularmente los camellones. Se recomienda que si la operación se realiza con tractor con pala, o con una máquina diseñada para el volteo de pilas de compostaje, el ancho del pasillo debe ser igual o mayor a 4m (Colomer M. y Gallardo I. 2007).

Se podría definir a partir de la ecuación (14) para calcular el número de pasillos de la siguiente manera:

Ecuación 14. Número de pasillos entre pilas de composteo:  $N_p$

$$N_p = (\# \text{ de pilas} - 1) \quad (14)$$

$N_p$ : Número de pasillos entre pilas

Aparte de los pasillos entre las pilas o camellones, se debe disponer un pasillo adicional al final del último camellón, el cual debe tener el mismo área de los pasillos entre pilas más un área igual a la mitad del área de base de una pila, ésta área permite maniobrar con amplitud (Sztern MGA y Pravia 1999).

El área necesaria para pasillos se define cómo se muestra en la ecuación (15):

Ecuación 15. Área total de pasillos entre pilas:  $A_{tpas-p}$  ( $m^2$ )

$$A_{tpas-p} = [L (m) \times A_p (m) \times N_p] \quad (m^2) \quad (15)$$

L: Longitud de la Unidad de Compostaje.

$A_p$ : Ancho de pasillo recomendado para maniobrar = 4m

El Número total de pasillos estaría determinado por la ecuación (16), considerando el pasillo adicional para maniobras en las operaciones:

Ecuación 16. Número total de pasillos en el sistema de composteo:  $N_{tp}$

$$N_{tp} = N_p + 1 \quad (16)$$

Es decir que el número total de pasillos recomendados para un sistema de composteo, debe estar conformado por el número de pasillos entre pilas más un pasillo adicional para maniobrar las máquinas y equipos con mayor facilidad que tendrá un área mayor que los demás pasillos, aumentada en la mitad del área de base de una pila.

El área del pasillo adicional corresponde al área del pasillo entre filas más la mitad de área de una pila y sería calculada con la ecuación (17):

Ecuación 17. Área del pasillo adicional:  $A_{pa}$

$$A_{pa} = A_{pas-p} + \frac{A_b}{2} \quad (m^2) \quad (17)$$

Por lo tanto el área total para el sistema de composteo está determinada por la suma del área ocupada por las pilas, más el área disponible para los pasillos entre pilas, más el área del pasillo adicional; se calcula entonces mediante la Ecuación 18:

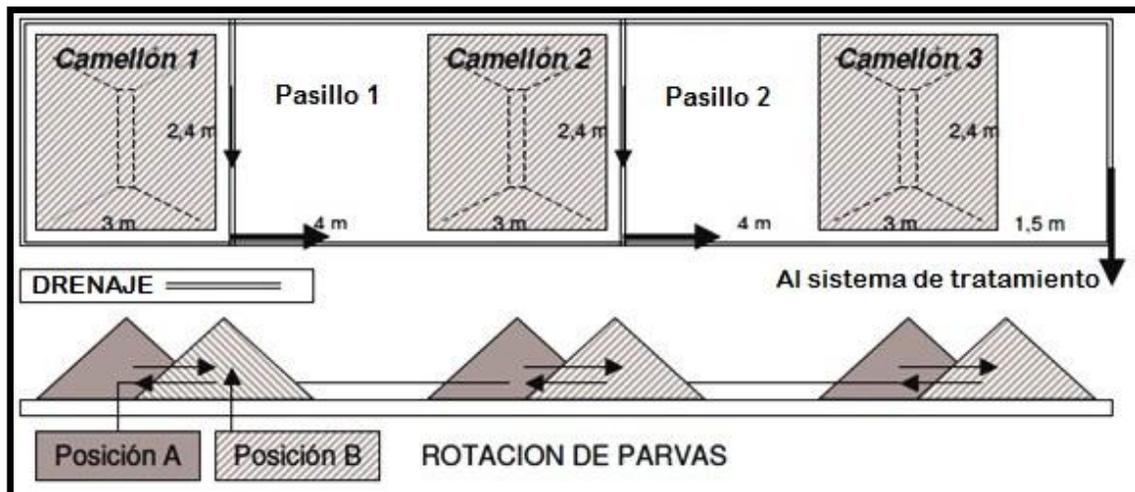
Ecuación 18. Área total del sistema de composteo:  $A_{tsc}$

$$A_{tsc} = [A_{tc} + A_{pas-p.} + A_{pa}] \quad (m^2) \quad (18)$$

Las anteriores ecuaciones fueron definidas en base a la teoría encontrada en la literatura consultada.

Cuando se tiene una disponibilidad continua de material para el compostaje, se recomienda la aplicación del *Sistema Asíncrono* que consiste en hacer una rotación del material, es decir que cuando llega material nuevo, sale material compostado, así al liberarse un área por el material que ya está listo, se hace una rotación de las pilas, y esa área que se libera es ocupada por nuevo material.

El compost estabilizado se retira y el espacio queda disponible para recibir un nuevo camellón, estableciéndose un ciclo productivo periódico a partir del momento en que la primera pila ya ha sido estabilizada (el primer camellón que se realizó), y así sucesivamente. (Colomer M. y Gallardo I. 2007). En la siguiente **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se muestra una de las posibles distribuciones (lay-out) del sistema de compostaje que más se utiliza:



Fuente: (Sztern MGA y Pravia 1999)

Ilustración 9. Esquema de una posible distribución, con rotación

### **2.6.2. Pila estática**

Consiste en la mezcla de lodos o biosólidos con un agente aumentador de volumen y/o agente enriquecedor (agentes estructurante como residuos vegetales, tezontle, trozos de madera) y se coloca la muestra sobre una tubería perforada, a través del cual el flujo de aire mantenga niveles deseados de oxígeno y temperatura (WEF 1995). Esta forma de composteo se denomina de compostaje rápido, en este caso debido a que utiliza aireación forzada, se reducen los tiempos de composteo. Este tipo de composteo es usual para lodos residuales o biosólidos generados de plantas de tratamiento preferentemente medianas y grandes.

Entre las ventajas que tiene el sistema de pilas estáticas aireadas se encuentra que es competitivo económicamente con respecto a otros sistemas; permite manejar una amplia gama de características de los lodos o biosólidos; requiere menos capital que los sistemas in-vessel; es flexible para manejar variaciones diarias en la cantidad y calidad de los biosólidos; permite un buen manejo de olores debido a que la pila es mantenida en condiciones aeróbicas permanentemente; provee un grado alto de destrucción de patógenos y una buena estabilidad del producto; puede ser construido al aire libre o bajo techo. Entre las desventajas se cuenta que el requerimiento de terreno es mayor que en los sistemas in-vessel; existen potenciales problemas con el manejo de olores si el sistema no es diseñado y operado adecuadamente; el sistema está afectado por variaciones climatológicas a menos que las locaciones estén cubiertas o encerradas (WEF 1995).

Para su dimensionamiento se sigue el mismo procedimiento ya indicado con anterioridad.

Es posible acelerar el proceso de composteo mediante diversas estrategias de arranque, así por ejemplo, se puede usar activadores o agentes enriquecedores, o bien inocular microorganismos activos específicos.

## **3. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA TRATAR LOS LODOS RESIDUALES DE C.U.**

De acuerdo a la anterior revisión realizada se plantea una propuesta metodológica considerando las escasas experiencias para el tratamiento de lodos realizadas en México y en otros países donde hay mayor desarrollo tecnológico. En esta propuesta se busca poder aplicar un proceso práctico y eficiente, como una alternativa sustentable que

minimice los problemas de impacto ambiental generados por las descargas de los lodos residuales en el drenaje municipal; y aprovechando los recursos de que dispone la Universidad Nacional Autónoma de México en la Ciudad Universidad, para que sea económica y haciendo aportes que beneficien a toda la comunidad en general.

La UNAM en su Ciudad Universitaria cuenta con la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Cerro del Agua, ubicada en el cruce entre el Circuito Escolar y la avenida Cerro del Agua. Se diseñó a fines de los años 1970's y comenzó a operar en 1982; en sus inicios la planta estuvo diseñada para tratar 40 litros por segundo; sin embargo, nunca logró ese rendimiento debido a los sistemas utilizados, como el de lodo activado, ahora en desuso. Se construyó con 3 procesos biológicos: Lodos activados, Discos biológicos rotatorios, y Filtro percolador. Sus objetivos han sido tratar aguas residuales de Ciudad Universitaria, reutilizar el agua para su uso en el riego de áreas verdes y apoyar a las actividades de docencia e investigación.

El tren de tratamiento original con el cual empezó a operar la planta estuvo conformado por:

- ✓ Lodos activados
- ✓ Medidor Parshall y desarenador
- ✓ Biodiscos
- ✓ Filtro percolador
- ✓ Sedimentadores o clarificadores
- ✓ Cárcamo de lodos

La planta ha pasado por varios procesos de transformación, y han sido modificadas las condiciones para la operación. Se han eliminando algunos componentes originales como los tratamientos biológicos de biodiscos rotatorios y filtro percolador, el desarenador, los canales Parshall y los filtros de arena; y se modificó el proceso de aireación de los lodos activados siendo ahora realizado por difusión de burbuja fina, logrando una mayor retención de oxígeno en el reactor. Con los cambios en la forma de operar, actualmente se cuenta con el siguiente tren de tratamiento:

- ✓ Pretratamiento: Uso de rejillas metálicas para la eliminación de materiales gruesos y de gran tamaño. Uso de un desarenador de vórtice para remover arenas.
- ✓ Tratamiento secundario: Proceso biológico de lodos activados, mejoramiento de aireadores e instalación de biomembrana de ultrafiltración.
- ✓ Tratamiento terciario: Desinfección con gas cloro.

Los lodos generados actualmente no están teniendo ningún tipo de tratamiento, su disposición final consiste en ser vertidos al drenaje de la ciudad de México.

Como propuesta de manejo para los lodos generados en la planta, se plantea la posibilidad de aplicarles una técnica de deshidratación para alcanzar menores contenidos de humedad, y posteriormente llevarlos a un proceso de compostaje aprovechando las instalaciones y los recursos con que cuenta la Planta de Compostaje de la UNAM.

### **3.1. Cantidad, calidad de lodos y tren de tratamiento**

#### Lodos generados en PTAR CU

De acuerdo a los últimos datos suministrados por los operarios de la PTAR Cerro del Agua, cuando se opera la planta en condiciones normales (épocas de no lluvias) se generan un promedio de 15m<sup>3</sup> de lodo acuoso por día, con un porcentaje de humedad de aproximadamente 99.2%, una cantidad de sólidos de 8 g/l, es decir 120 kg/día de sólidos secos. Los lodos son depositados en un tanque y posteriormente son vertidos al drenaje de la ciudad.

Es importante tener presente que durante las épocas de lluvia se suspenden las actividades de la PTAR Cerro del Agua, debido a que su objetivo es suministrar agua para el riego de los campos verdes de la universidad, pero durante estas épocas no es necesario el consumo del agua tratada en la planta. Por lo tanto durante estas épocas no opera la planta y no se generan lodos.

#### Calidad de lodos

Respecto a la calidad de los lodos generados en la PTAR Cerro del Agua, se debe considerar que éstos son generados del tratamiento secundario, por lo cual no son afectados con componentes químicos como coagulantes y/o floculadores.

Dado que estos lodos no representan interés alguno en la actualidad, no se les realiza análisis de calidad con mucha frecuencia. El último análisis realizado fue en mayo del año 2013, y según los resultados obtenidos la mayoría de los parámetros medidos no se encontraron por encima de los límites máximos permisibles de acuerdo a lo que establece la Norma Oficial Mexicana NOM004-SEMARNAT-2004.

Los lodos que se generan de la PTAR Cerro del Agua son producto de la purga del tanque membrana, y los últimos análisis realizados por un laboratorio externo a la universidad, arrojaron los siguientes resultados mostrados en las Tabla 9, Tabla 10 y Tabla 11:

**Tabla 9. Resultados de metales lodos PTAR CU**

Parámetro	Resultado	Límites máximos permisibles excelente**	Límites máximos permisibles bueno*	Unidades**	Método
Arsénico	<0.20	41	75	mg/kg	NOM-004-SEMARNAT-2002
Cadmio	<10.00	39	85	mg/kg	NOM-004-SEMARNAT-2002
Cobre	302.74	1500	4300	mg/kg	NOM-004-SEMARNAT-2002
Cromo	<12.50	1200	3000	mg/kg	NOM-004- SEMARNAT-2002
Mercurio	<2.00	17	57	mg/kg	NOM-004- SEMARNAT-2002
Níquel	<12.50	420	420	mg/kg	NOM-004- SEMARNAT-2002
Plomo	<9.00	300	840	mg/kg	NOM-004- SEMARNAT-2002
Zinc	961.79	2800	7500	mg/kg	NOM-004- SEMARNAT-2002

**Tabla 10. Resultados de análisis fisicoquímicos lodos PTAR CU**

Parámetro	Resultado	Límites máximos permisibles**	Unidades**	Método
TEAO	2.80	N.A.	(mg/g)h	STANDARD METHODS 2710 B
Sólidos volátiles	5128.46	N.A.	mg/kg	STANDARD METHODS 2710 G
Sólidos totales	6861.18	N.A.	mg/kg	STANDARD METHODS 2710 G

TEAO: Tasa Específica de Absorción de Oxígeno

**Tabla 11. Resultados de análisis microbiológicos lodos PTAR CU**

Parámetro	Resultado	Límites máximos permisibles Clase A**	Límites máximos permisibles Clase B**	Límites máximos permisibles Clase C**	Unidades**	Método
Coliformes fecales	1 100 000	<1000	<1000	<2 000 000	NMP/g	NOM-004-SEMARNAT-2002
Salmonella ssp	<3	<3	<3	<300	NMP/g	NOM-004-SEMARNAT-2002
Huevos de Helminto	<1	<1	<10	<35	NH/g	NOM-004-SEMARNAT-2002

\*\*Base Seca.

Según los análisis de laboratorio presentados en las tablas 8, 9 y 10, los lodos generados en la PTAR Cerro del Agua tienen características que los puede definir como

un lodo de buena calidad que no presentarían inconvenientes para ser tratados mediante un proceso de compostaje por pilas. Ya que los parámetros presentados en las tablas cumplen con los parámetros establecidos por la norma NOM-004-SEMARNAT-2002 como límites máximos permisibles de un lodo tipo Excelente, pero presentan un alto contenido de microorganismos patógenos y alta concentración de materia orgánica con alto potencial putrescible, lo que los hace riesgosos para usarlos sin tratamiento.

De la tabla 10, se encontró que el lodo presenta una Tasa Específica de Absorción de Oxígeno (TEAO) de 2.80 mg/g/h, lo que indica que este lodo no es un residuo estable puesto que supera el valor requerido de menor o igual a 1.5 mg/g/h, indicado en la Norma NOM-004-SEMARNAT-2002, por lo que su disposición sin tratamiento sería un foco de atracción de vectores propagadores de enfermedades infecciosas.

Al respecto, al revisar los datos obtenidos en la tabla 10, se observa que el contenido de coliformes fecales corresponde a un lodo clase C. Por lo tanto, un lodo con esas características se define como un lodo tipo Excelente clase C, el cual según la norma NOM-004-SEMARNAT 2002, en la tabla puede ser destinado para usos forestales, mejoramiento de suelos, y usos agrícolas; sin embargo por el exceso de CF Coliformes Fecales, que se encuentra en concentraciones de  $1 \times 10^6$  NMP/100ml, esto representa un riesgo potencial para el ambiente y la salud. Además por el contenido de SVT que representa el 75% de los ST, lo que indica que es posible aplicar proceso biológico para la estabilización de la materia orgánica y generar un lodo estable e inocuo, que pueda ser usado sin riesgo sanitario.

Lo anterior indica que si a los lodos que genera la PTAR Cerro del Agua, se someten a un tratamiento final de compostaje, los resultados óptimos respecto a la calidad del lodo se pueden lograr fácilmente, pudiéndose alcanzar un lodo tipo Excelente de clase A. Y de acuerdo a lo que establece la norma, sus aplicaciones se podrían hacer para usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación, y para las aplicaciones que se establecen para los lodos clase B y C, que serían usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación, usos forestales, mejoramiento de suelos y usos agrícolas.

Según la información consultada en literatura, y suministrada en la PTAR, la calidad de los lodos provenientes de la membrana de ultrafiltración es relativamente buena, además se cuenta con el respaldo de un certificado de no peligrosidad.

Dada la carencia de información analítica de los lodos generados en cuanto a sus características físicas y químicas, por su procedencia, se considera que el lodo presenta condiciones apropiadas para tratarse por composteo, estos tendrían un pH neutro y un contenido de nutrientes y materiales traza que permitirían a los microorganismos aerobios degradadores de materia orgánica desarrollarse adecuadamente, más para asegurar que se realicen las reacciones biológicas en el composteo se utilizará un sustrato enriquecedor de materia orgánica y nutrientes como es el estiércol de caballo y cerdo, previo conocimiento de que no contiene sustancias tóxicas.

#### Tren de tratamiento para los lodos

Para llevar a cabo un tratamiento de los lodos y darles una disposición final sustentable que cumpla con las características de calidad orgánica y microbiológica requeridas, se propone aplicar a los lodos generados un tren de tratamiento que no implique grandes inversiones económicas ni disponibilidad de espacio, ya que se busca que la alternativa planteada sea lo más económica posible, minimice un problema ambiental y genere beneficios sociales.

Para poder disminuir el contenido de humedad de los lodos y llevarlos al composteo, se debe estudiar la posibilidad de comprar un Filtro Prensa para la PTAR Cerro del Agua, y así poderle realizar el proceso de deshidratación a los lodos que genera, aprovechando las ventajas que tiene este mecanismo ya que su tamaño no es muy grande y no requiere mucho espacio para su operación.

En otro caso, evaluar la posibilidad de poder aprovechar el filtro prensa con que cuenta la Planta de Tratamiento de Aguas de Ciencias Políticas para realizar la deshidratación de los lodos.

Considerando lo anteriormente expuesto, el tren de tratamiento propuesto para el manejo de lodos en la PTAR Cerro del Agua estaría conformado por los siguientes procesos:

1. Recolección de lodos: Este proceso se seguiría haciendo como se hace hasta el momento, aprovechando el tanque o cárcamo que se tiene destinado para este fin, y que los lodos pasan directamente desde la membrana de ultrafiltración hacia el cárcamo de lodos.

2. Bombeo de lodos hacia el Filtro Prensa: Se requiere diseñar el sistema de conducción de los lodos para ser ingresados al filtro prensa y poder realizar la deshidratación. Para esta operación es posible ubicar el filtro prensa a un lado del cárcamo de bombeo de lodos.
3. Recolección de lodos deshidratados: Se debe acumular la cantidad de lodos deshidratados, considerando que se hace una reducción de volumen y que su nivel de humedad se ha disminuido. Es necesario analizar la posibilidad de recolectarlos diariamente, o durante un periodo de tiempo que no afecte el normal funcionamiento de la PTAR.
4. Transporte de lodos deshidratados hacia la Planta de Compostaje de la UNAM: Mediante gestiones administrativa y acuerdos entre directivos, se puede diseñar una logística para realizar esta actividad, teniendo presente que la universidad cuenta con vehículos destinados para el traslado de material vegetal desde todas las zonas verdes de la universidad hacia la Planta de Compostaje.
5. Aplicación del proceso de compostaje: Las operaciones que requiere este proceso estarían a cargo y serían realizadas por el personal de la Planta de Compostaje de la universidad.
6. Disposición del lodo compostado: Para mejorar la estructura de los suelos y aportar nutrientes en las zonas verdes de la universidad.

### **3.2. Selección del sitio**

La alternativa para el manejo de los lodos residuales generados en la PTAR Cerro del Agua, que consiste en llevar los lodos residuales previamente deshidratados a un proceso de composteo, se pensó inicialmente considerando que la Universidad tiene una Planta de Compostaje en sus instalaciones, en la cual se procesa la mayor parte del material vegetal que se genera en sus zonas verdes, para ser incorporado nuevamente como abono orgánico y mejorador de suelos de la misma universidad.

La Planta de Compostaje de la UNAM se creó desde el año 1986 como una solución a los problemas ocasionados por la abundante producción de materia orgánica que se genera en las áreas verdes del campus de la ciudad universitaria. Esta planta se creó como un subprograma del Programa de Manejo Adecuado de las Áreas Verdes con el fin de darle un uso alternativo a los desechos orgánicos de los jardines que tiene la universidad. Para ello la planta cuenta con equipos, maquinaria, y personal apto para hacer eficiente el manejo de la materia orgánica.

Está ubicada en CU sobre la avenida Imán en la puerta #3, tiene un área total de 3,600 m<sup>2</sup> y procesa un promedio de 25 m<sup>3</sup>/día de residuos orgánicos generados en 200 ha de áreas verdes con que cuenta la Ciudad Universitaria. El proceso comienza con la recolección del material, después se tritura con el uso de maquinas trituradoras, luego se mezcla y se distribuye en filas, cada fila tiene una medidas aproximadas de 25m de largo, 4m de ancho y 2m de alto. Posteriormente se procesa de manera aerobia removiendo varias veces los residuos para airear y acelerar la actividad de los microorganismos hasta convertir el material en composta. Con este proceso la Universidad obtiene cada mes un promedio de 150 m<sup>3</sup> de abono orgánico, el cual es utilizado para el mantenimiento de las áreas verdes del campus.

Para la recolección de la materia orgánica que se genera en los jardines y áreas verdes se cuenta con 4 estaciones de recolección correspondientes a igual número de contenedores que tienen la capacidad de almacenar un promedio de 4 m<sup>3</sup>/día.

El material orgánico que se procesa actualmente en la planta está compuesto en su gran mayoría por hojas secas (hojarasca), triturado de madera y pasto. Diariamente se recolecta un promedio de 25m<sup>3</sup> de material orgánico y la producción es de aproximadamente 5 m<sup>3</sup> de composta al día (lo que equivale a la cuarta parte de lo que ingresa), los cuales son distribuidos por todas las áreas verdes de la universidad para el mejoramiento de los suelos y el aporte de nutrientes a largo plazo. El material orgánico procesado tarda entre 4 y 6 meses para convertirse en abono orgánico y ser incorporado nuevamente para nutrir los suelos y pastos del campus.

El proceso de compostaje realizado en la planta se hace por la descomposición de la materia orgánica mediante un proceso aerobio, en el cual la presencia de oxígeno acelera la desintegración de la materia a través de la actividad biológica microbiana. Inicialmente el material se tritura para luego ser acumulado en pilas que son aireadas frecuentemente (por volteo con un cargador frontal Bobcats) y se mantienen en esas condiciones hasta alcanzar la temperatura requerida superior a los 60°C. Para llevar a cabo los procesos la planta cuenta con las siguientes máquinas o equipos:

- ✓ 3 máquinas trituradoras (sólo una funciona)
- ✓ 2 minicargadores Bobcats (sólo uno funciona)
- ✓ 1 Pipa para agregar agua a las pilas
- ✓ 1 Leñadora (Troza los troncos en partes más pequeñas para poderlas introducir en una trituradora de troncos)

De acuerdo a las características de la planta de compostaje y a los procedimientos aplicados a la materia orgánica, se evidencia que la planta tiene condiciones en cuanto a espacio, maquinaria, equipos y operarios para hacer un procedimiento similar a los lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales, siempre y cuando se garantice el ingreso de los lodos con las condiciones de humedad y estabilización apropiadas, para facilitar el transporte y retardar los problemas por la presencia de materia orgánica y microorganismos patógenos.

### **3.2.1. Selección del material acondicionador y agentes de enriquecimiento nutritivo (enmiendas)**

Como material acondicionador requerido para realizar la mezcla y poder incorporar al proceso de compostaje de lodos las características como porosidad y soporte para facilitar la aireación y con ello la presencia de oxígeno, enmienda (agentes de enriquecimiento nutritivo) o para favorecer la aportación de nutrientes, como ya fue explicado ampliamente en el marco teórico, se propone adicionar al lodo los siguientes materiales:

#### **1. Material vegetal:**

Formado por triturado de madera con diámetros de 5 a 10 cm. Este material está disponible en la universidad y es una de las principales materias primas usadas en la Planta de Compostaje, por lo cual se dispone de suficiente cantidad para hacer la mezcla con el lodo.

#### **2. Estiércol de caballo y de cerdos (agentes de enriquecimiento nutritivo):**

Se realizó la consulta en la Facultad de Medicina y Zootecnia de la UNAM, sobre la disposición final que se le da a los residuos generados por los caballos y cerdos que se tienen en dicha facultad, y se obtuvo la siguiente información:

En el Departamento de Medicina, Cirugía y Zootecnia para Equinos, cuentan con una cantidad de alrededor de 18 caballos, la cual varía dependiendo de las actividades académicas programadas. De estos caballos se recolecta diariamente una cantidad no medida de estiércol mezclada con aserrín que es depositada en un contenedor donde también se deposita material vegetal. El material acumulado en dicho contenedor es recogido varias veces a la semana por una persona particular a quien se le paga \$1.200 + IVA, por cada viaje que hace para llevarse los residuos en su

carro para un lugar externo a la universidad. En promedio se realizan 13 viajes al mes, lo que equivale a un valor pagado de \$15.600 + IVA, es decir, \$18.096 mensuales por llevarse el material fuera de la UNAM.

Se consultó al Director Administrativo del Departamento sobre la posibilidad de incorporar estos residuos a un proyecto de compostaje de lodos generados en la PTAR Cerro del Agua, aprovechando que la universidad cuenta con una planta de compostaje, y se mostró interesado ya que esto disminuiría gastos económicos para la facultad.

Dado que en el Departamento de Medicina, Cirugía y Zootecnia para Equinos, no se calculan los volúmenes de estiércol de caballos que salen diariamente, y considerando la cantidad de caballos promedio que tienen, se podría estimar que:

- Según literatura, la generación de estiércol por caballo adulto es de aproximadamente entre 14 y 16 kg/día. En promedio serían 15kg/día.
- La cantidad de caballos adultos que se tienen en la facultad es entre 10 y 18, varía según las actividades académicas programadas.

Considerando la cantidad de caballos más crítica que sería de 10 animales, cuando se generaría menos estiércol, se estima que la cantidad de estiércol generada al día es:

$$15 \text{ kg/día/caballo} \times 10 \text{ caballos} = 150 \text{ Kg/día}$$

Por lo tanto la cantidad de estiércol que se tendría disponible para ser adicionado como un agente enriquecedor a la mezcla de lodo sería de mínimo 150Kg/día. A este valor se le debe sumar el aserrín y el material vegetal con que se mezcla el estiércol de caballos en las caballerizas para una mejor operación de recogida.

En el Departamento de Medicina y Zootecnia de Cerdos, también se hizo la consulta y se encontró que actualmente tienen 10 cerdos, conformados por 5 cerdas adultas y 5 lechones. Según la información suministrada, la cantidad de cerdos varía igualmente dependiendo de las actividades académicas programadas, pero la cantidad máxima que ha llegado a tener es de 16 a 18 cerdos. Respecto al excremento de cerdos informaron que éste residuo es lavado y vertido al drenaje de la universidad. Según datos suministrados por un profesor de dicha facultad, la cantidad promedio de excremento de los cerdos que se tienen, generada en un día

es de 30 kg. También se consultó sobre la posibilidad de incorporar estos residuos a un proyecto de compostaje e igualmente mostraron interés y disposición.

Considerando la cantidad de estiércol que se genera en un día con 5 cerdas adultas y 5 lechones, la cantidad de estiércol generado al mes es:

$$30 \text{ kg/día} \times 30 \text{ días/mes} = 900 \text{ Kg/mes}$$

### **3.3. Etapas de composteo de lodos**

Las etapas que se plantean para el composteo de los lodos generados en la PTAR Cerro del Agua, se basan en las que según la literatura consultada son las básicas para que el proceso se efectúe correctamente. Se proponen las siguientes etapas para aplicarlas a partir del momento en que los lodos llegan a la Planta de Compostaje con los niveles de contenido de humedad, y su certificado de no peligrosidad.

- Espesado
- Mezclado de lodos con material acondicionador y con agentes de enriquecimiento
- Composteo: digestión en pilas
- Maduración, cribado y secado (opcional si se va a comercializar y generar una patente)

Cada una de estas etapas estaría conformada por una serie de procesos y operaciones que tiene un orden lógico y que han sido aplicadas para el composteo de lodos en México y en otros países de acuerdo a la literatura consultada.

#### **3.3.1. Espesado y mezclado (lodos acondicionados)**

La operación de espesado se hará en la PTAR de CU, una vez que se instale el filtro prensa y se obtendrá un lodo con un contenido de humedad del 80%. De ahí será transportado hacia la Planta de Compostaje e iniciará su mezclado.

Se propone que, una vez que lleguen los lodos a la planta de compostaje con un contenido de humedad de aproximadamente 80% se procederá al mezclado del lodo con los materiales acondicionadores y los agentes de enriquecimiento. Pero antes de realizar la mezcla de lodos con los demás materiales sugeridos para darles estructura y porosidad, es necesario realizar primero la preparación de esos

materiales (residuos de troncos vegetales), ya que deben ser triturados para obtener partículas de mejor tamaño. Según la revisión bibliográfica realizada, la recomendación en base a otras experiencias es que las partículas del material acondicionador deben tener un tamaño entre 10 y 12 cm de diámetro. Posteriormente se debe adicionar el agente enriquecedor o material de enmienda que corresponde al estiércol de caballo y de cerdo como enmiendas que favorecerán la disponibilidad de nutrientes para el metabolismo de los microorganismos y la adición de carbono para equilibrar la relación carbono nitrógeno (C/N).

La mezcla quedaría definida como sigue:

1. Lodo al 80% de humedad
2. Trozos de vegetales (madera en varas o viruta) de 10 a 12 cm de diámetro (triturado)
3. Estiércol de caballo y/o cerdo, previamente se reduce su humedad (al 70 - 80%)

El siguiente esquema de la mezcla para composteo presenta algunas de sus características:

1) Lodo residual  $\longrightarrow$  Sustrato.

2) Acondicionador o material de soporte  
(Ej. Trozos de madera, aserrín, viruta)

3) Agente enriquecedor (o llamado en otros países: enmienda)

Es posible la aplicación de alguna de las metodologías existentes para calcular el porcentaje de humedad de la mezcla, la relación C/N en la mezcla de acuerdo a las composiciones del lodo y los materiales, y las proporciones de la mezcla a utilizar mediante balances de masa. O bien tomar muestras del material mezclado y determinar su humedad, su contenido de nitrógeno total y contenido de materia orgánica medida como DQO o carbono orgánico total.

#### Preparación del material acondicionador:

Los materiales disponibles en la universidad que se pueden incorporar en el proceso de mezclado sería el material vegetal, proveniente de la materia prima con que

opera la planta de compostaje de la universidad. Esta materia prima está conformada por hojarasca, triturado de madera y pasto. La mayor parte del material proviene de árboles como Eucaliptos, Fresnos, Tepozan, Pirul, Truenos, Pinos, Encinos, Jacaranda Y Grevillea, entre otros.

El material de residuos de madera primero debe pasar por las máquinas trituradoras con que cuenta la planta de compostaje, para disminuir el tamaño de las partículas y lograr que durante el proceso de composteo haya mayor superficie de contacto en la mezcla favoreciendo la actividad biológica de los microorganismos. En las siguientes Ilustración 10 e Ilustración 11 se muestra la máquina trituradora que hay en la Planta de Compostaje de la UNAM.



**Ilustración 10. Proceso de triturado de material vegetal en Planta de Compostaje UNAM**



**Ilustración 11. Máquina trituradora de la Planta de Compostaje de la UNAM**

La madera triturada que se podría incorporar para el composteo de lodos, es en su gran mayoría obtenida de troncos de árboles caídos o provenientes de podas. Los troncos de mayor tamaño son triturados con una trituradora grande que alquila la planta de compostaje una vez al año. En la planta de compostaje se acumulan todos los troncos grandes de árboles caídos o talados en la universidad durante un año, y anualmente se realiza la actividad de trituración durante una semana que es el tiempo por el cual se alquila la máquina para triturarlos.

En un área separada de la zona de pilas de composteo, la planta cuenta con una leñadora donde se trozan los troncos de menor tamaño que se encuentran almacenados después del proceso de trituración de troncos grandes con la máquina alquilada. Estos troncos más pequeños se introducen en la leñadora para obtener

trozos de menor tamaño que puedan ser triturados en la máquina trituradora. Este proceso se puede observaren en las siguientes Ilustración 12 e Ilustración 13.

La viruta de madera que se obtiene en esta área es una buena alternativa como material acondicionador para el composteo de los lodos, como ya se menciona varias veces en el marco teórico este tipo de material tiene características físico químicas muy convenientes para el proceso de descomposición por la actividad microbiana, y para generar porosidad y favorecer la aireación y entrada de oxígeno a la mezcla.



**Ilustración 12. Trozos de troncos almacenados.  
Planta de Compostaje UNAM**



**Ilustración 13. Trituración de troncos pequeños en leñadora. Planta de Compostaje UNAM**

### Proporciones en la mezcla

Las cantidades de material acondicionador, enmienda o agentes de carga que se deben adicionar a la mezcla para el compostaje del lodo dependen de variables como la humedad de la mezcla y la relación carbono nitrógeno (C/N) en la mezcla y en cada uno de los materiales a utilizar.

Según (Turovsky 2006) la relación Carbono-Nitrógeno en los lodos de aguas residuales esta generalmente en el rango 20:1 a 40:1; por lo tanto, lodos con relaciones menores de 25:1 requieren carbono adicional biodegradable para activar el crecimiento microbiano. Este autor sugiere que el rango óptimo de la relación carbono-a-nitrógeno en la mezcla de compostaje de lodos debe estar entre 25:1 a 35:1.

Estudios realizados en México en relación al composteo de lodos de tipo municipal, indican que para un lodo desaguado con 20% de sólidos secos (80% de humedad), se encuentra que las relaciones de lodo y material acondicionador (como aportadores de carbono) es de 1:1 a 4:1. Este material acondicionador como los residuos vegetales aporta estructura y porosidad al lodo, ya que este con la humedad del 80%, es una pasta ligeramente compacta que sin el uso del acondicionador no se permitiría la transferencia de oxígeno necesario para llevar a cabo el proceso de compostaje.

Además de darle porosidad a la mezcla, como ya se dijo facilita la aireación, aumenta la relación C:N y aumenta los sólidos.

### ***3.3.2. Partes que forman el composteo en pilas estáticas o camellones (hileras) y cálculo de la dimensiones de las pilas y áreas de maniobras requeridas***

La propuesta para compostar los lodos de la PTAR Cerro del Agua consiste en que, al igual que se procesa el material vegetal que llega a la planta de compostaje en pilas, se destine un área exclusivamente para compostar los lodos también mediante sistemas de composteo en pilas.

La planta de compostaje cuenta con un área de 3,600 m<sup>2</sup> que no están siendo ocupados en su totalidad, según visita realizada a dicha planta se observó que hay áreas disponibles que podrían ser acondicionadas para la instalación de un proyecto de compostaje de lodos. El área que se tiene destinada para las pilas tiene un piso de cemento para el control de los lixiviados y evitar que se infiltren y puedan contaminar las aguas subterráneas, sin embargo el material vegetal que se procesa primero permanece extendido en otra zona donde se disminuye la humedad por evaporación; después es pasado a unas hileras de pilas donde inicia el proceso de composteo. En las siguientes Ilustración 14 e Ilustración 15 se muestra la disposición del material cuando llega a la planta y la conformación de las pilas para compostar el material vegetal generado en CU.



**Ilustración 14. Disposición de material vegetal al llegar. Planta de Compostaje UNAM**



**Ilustración 15. Conformación de pilas por etapa de maduración. Planta de Compostaje UNAM**

Para el composteo de los lodos, en esta etapa se debe hacer la conformación de pilas con el material mezclado, y se deben adaptar las condiciones con que se cuenta para que se pueda realizar el proceso adecuadamente. Para ello es necesario que el personal que opera la planta realice las actividades de volteo de pilas y estimación de parámetros como humedad y temperatura, con el fin de poder garantizar las condiciones de aireación y mezcla de materiales.

Actualmente en la planta de compostaje se realiza el volteo de pilas mediante el uso de un cargador frontal Bocats, esta actividad se hace cada tres días en todas las pilas que están en etapa de composteo, con el fin de controlar la temperatura para mantenerla en un rango entre 60 y 70°C, ya que si se aumenta a más de 82°C se propicia la eliminación de bacterias y microorganismos y la liberación de compuestos nitrogenados que afectan el proceso y generan olores indeseables. Según información del director de la planta se tiene planeado comprar un volteador para hacer dicha actividad más eficiente.

En las siguientes Ilustración 16 e Ilustración 17 se observa cómo se realiza la actividad de volteo en las pilas de material vegetal que se compostea en la planta de la UNAM.



**Ilustración 16. Volteo de pilas de material vegetal compostado. Planta de Compostaje UNAM**



**Ilustración 17. Control de temperatura mediante volteo de pilas. Planta de Compostaje UNAM**

Si se incorpora a los procesos de la Planta de Compostaje e la UNAM el lodo residual generado en la PTAR Cerro del Agua, el volteo de las pilas de lodo también se podría realizar con el cargador frontal que se tiene en la planta de compostaje, aunque se espera que para cuando se pueda ejecutar esta propuesta ya se cuente con más y mejores máquinas y equipos para tecnificar más los procesos y obtener mejores resultados del producto final.

#### Dimensiones de las pilas para composteo de lodos y áreas de maniobras requeridas

Para calcular las cantidades y las dimensiones de las pilas para el composteo de lodos se recomienda aplicar la metodología sugerida por (Sztern MGA y Pravia 1999) y la metodología aplicada expuesta en (Miliarium. Ingeniería Civil y Medio Ambiente 2014), en las cuales se debe conocer el volumen mensual de lodos deshidratados que serían compostados en la planta de compostaje, y sugiere que la base de las pilas no debe ser menor a 2m, y que la altura de cada pila debe ser la mitad de la base para garantizar una buena relación superficie/volumen.

Se conoce que actualmente cuando la PTAR Cerro del Agua está operando de manera normal se generan un promedio de  $15\text{m}^3$  de lodos residual al día, con una humedad de aproximadamente 99.2% y 0.8% de sólidos secos que equivalen a 120kg lodo seco/día. De acuerdo a lo que indica Barrrios P., 2009, se considera que el 1% de ST (sólidos totales) es equivalente a 10g de sólidos secos/l de lodo, es decir  $10\text{Kg}/\text{m}^3$ .

Se estima que adquiriendo un filtro prensa para deshidratar los lodos se pueden alcanzar niveles de humedad del 80%, es decir que se obtendría un 20% de sólidos totales. Dado que se conoce el volumen inicial de lodos generados en la PTAR de CU con su contenido de humedad y el contenido de humedad que se podría alcanzar después de la deshidratación, es posible calcular el volumen final después de la deshidratación. Para ello se aplica ecuación (6):

$$V_2 = V_1 \frac{ST_1}{ST_2} \quad (6)$$

Donde,

$V_2$ : Volumen final de lodo (después del proceso de deshidratación)

$ST_1$ : Porcentaje de sólidos totales en el lodo antes de deshidratación

$V_1$ : Volumen inicial de lodo (sin deshidratar)

$ST_2$ : Porcentaje de sólidos totales en el lodo después de deshidratación

$$V_2 = 15 \frac{m^3}{día} \times \frac{0.8\%}{20\%}, \quad V_2 = 0.6 \frac{m^3}{día}$$

Lo anterior indica que después de deshidratar los lodos generados en la PTAR de CU, el volumen final que quedará para ser compostado por día es de  $0.6 \text{ m}^3$ . Según la literatura se tiene que la densidad del lodo es de aproximadamente  $1.05 \text{ t/m}^3$ . Por lo tanto aplicando la Ecuación 4, se tiene la masa del lodo generado diario en la PTAR para llevar a ser compostado:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad m = \rho V \quad \left( \frac{\text{Ton}}{\text{m}^3} \right) \quad (4)$$

$$m = 1.05 \left( \frac{\text{ton}}{\text{m}^3} \right) \times 0.6 \text{m}^3, \quad m = 0.63 \text{ ton}$$

La masa diaria de lodo deshidratado que resultaría para ser compostado sería de 0.63 ton. Se propone que se realicen pilas cada tres días, y que el tiempo de compostaje sea de 30 días, es decir que se realizarían un total de 10 pilas al mes. Por lo tanto el volumen y la masa total de lodo que ingresará en cada pila sería:

$$V_{\text{lodo/pila}} = 0.6 \text{m}^3 \times 3 = 1.8 \text{m}^3$$

$$V_{\text{lodo/pila}} = 0.63\text{ton} \times 3 = 1.89\text{ton}$$

Se propone realizar una mezcla de lodo con material acondicionador y agente enriquecedor, con las siguientes proporciones:

*Mezcla = Lodo + material acondicionador + enmienda*

- Lodo: 60%
- Acondicionador: 30%
- Agente enriquecedor o enmienda: 10%

Estas proporciones pueden variar de acuerdo a la disponibilidad de materiales que haya, en rangos entre 40 y 60% para lodos, entre 30 y 40% para material acondicionador, y entre 1 y 10% para el agente enriquecedor o enmienda.

Considerante que para cada pila se tendrá un volumen de aproximadamente 1.8m<sup>3</sup> y que este volumen corresponde al 60% de la mezcla, las distribuciones de materiales quedarían como se muestra en la Tabla 12:

**Tabla 12. Volúmenes utilizados en la mezcla para compostar lodos**

Material para mezcla/pila	Volumen (m <sup>3</sup> )	Masa (ton)	Densidad (t/m <sup>3</sup> )
Lodo deshidratado	1.8	1.89	1.05
Acondicionador	0.9	0.63	0.7
Agente enriquecedor	0.3	0.24	0.8
<b>Mezcla total a compostar en cada pila</b>	<b>3</b>	<b>2.76</b>	

Se realiza el cálculo considerando como material acondicionador solamente pequeños trozos de madera, y como agente enriquecedor solamente estiércol de caballo previamente analizado y determinado que no presenta características tóxicas ni perjudiciales que puedan afectar el proceso de compostaje de lodos. La densidad del estiércol de caballo es de 0.8 t/m<sup>3</sup> (Saña y Soliva 2006). Para determinar la densidad de la madera, se hizo un promedio de las densidades de las maderas más comunes (Atencia 2003).

De acuerdo a los cálculos presentados en la Tabla 12 , el volumen total que sería usado en cada pila corresponde al acumulado de lodo deshidratado generado en

tres días, más la mezcla del material acondicionador y del agente enriquecedor o enmienda. Por lo tanto se tiene:

$$V_t = 3m^3$$

Para el diseño de las pilas se podría atender las recomendaciones según la bibliografía compostado, haciendo que la base de las pilas no sea menor a 2m y que la altura sea la mitad de la base, siendo así entonces se propone que la base de las pilas sea de 2m y la altura de 1m. Para fines prácticos, la experiencia ha mostrado que para el diseño de las pilas, se debe considerar el ancho y la altura recomendados por la literatura técnica para un composteo eficiente, y el largo de la misma va a depender, hasta cierto punto, del incremento en la producción del material a compostear, en este caso lodos residuales.

Con la información anterior, y siguiendo la metodología expuesta por (Sztern MGA y Pravia 1999) en el: Manual para la elaboración de compost, bases conceptuales y procedimientos; se procede a hacer una propuesta de diseño para la conformación de pilas para el composteo de lodos aplicando las ecuaciones desde la 7 hasta la 18, mencionadas con anterioridad.

Volumen de mezcla para compostar:  $V_t = 3m^3$

Base de pilas:  $B = 2m$

Altura de pilas  $A = B/2 = 1m$

Área transversal de la pila:  $((B \times A)/2) = 1 m^2$

Volumen de la pila por metro lineal =  $1m^2 \times 1m = 1m^3$

Longitud de la unidad de composteo:

$$L = \frac{V_t \frac{(m^3)}{(m^2)}}{A_{tp}} \quad (m) \quad (24)$$

$V_t$ : Volumen total a compostar por pila (mezcla completa: incluye lodo deshidratado, material acondicionador y agente enriquecedor)

$A_{tp}$ : Área transversal e la pila =  $((B \times A)/2)$

$$L = 3 \text{ m}^3 / 1 \text{ m}^2 = 3 \text{ (m)}$$

Área de la base de la pila es de:

$$A_{bp} = B \times L = 2 \text{ m} \times 3 \text{ m} = 6 \text{ m}^2$$

Considerando el tiempo que se podría tardar el composteo de los lodos: de 20 a 30 días (1 mes), y realizando los cálculos con el dato más crítico que sería de 30 días, se tiene entonces que el área total para el proceso de composteo sería de:

Si se realiza una pila de composteo cada tres días, el área total para el proceso de composteo de lodos sería:  $A_{bp} \times n$ , siendo  $n$  el número de pilas realizadas durante 30 días que se tarda el proceso ( $n=10$ ):

$$A_{tc} = 6 \text{ m}^2 \times 10 = 60 \text{ m}^2$$

Para definir el número de pilas, considerando que el tiempo de composteo sería de 30 días, el total de pilas serían 10 (considerando que se realiza una pila cada tres días), ya que se realizaría un proceso rotatorio, en el cual cada vez que una pila llega a su etapa final, es retirada del área de composteo para ser trasladada al área de acopio y almacenamiento, y al liberar ese espacio se van corriendo las pilas hasta que queda disponible el primer espacio para empezar el proceso de una nueva pila.

Para calcular el número de pasillos entre filas se aplica la formula de la Ecuación 14, la cual indica lo siguiente:

$$N_p = (\# \text{ de pilas} - 1) = 10 - 1 = 9$$

Adicional a estos pasillos se debe disponer un área para maniobrar por fuera de las pilas la cual debe tener un área igual a la de los pasillos entre pilas más la mitad del área de base una pila.

De acuerdo a otras experiencias publicadas en la literatura consultada, la recomendación es que el ancho de los pasillos entre pilas sea de 4 m, con el fin de poder maniobrar las máquinas y demás equipos y/o herramientas durante las operaciones. Por lo tanto el área total de pasillos entre las hileras o pilas está determinada por la Ecuación 15:

$$A_{tpas-p.} = [L (m) \times A_p (m) \times N_p] (m^2)$$

$$A_{tpas-p.} = [3 (m) \times 4 (m) \times 9] = 108 (m^2)$$

Donde,

L: Longitud de la unidad de compostaje

A<sub>p</sub>: Ancho de pasillo

N<sub>p</sub>: Número de pasillos

Considerando el área del pasillo adicional que debe tener un mayor tamaño que los pasillos entre pilas, se tiene que el área del pasillo adicional es como se muestra en la Ecuación 17:

El área de cada pasillo entre pilas es:  $A_{\text{Ancho de pasillos}} \times L = 4m \times 3m = 12 m^2$

El área del pasillo adicional sería:

$$A_{pa} = A_{\text{pasillo entre pilas}} + \frac{A_{bp}}{2} = 12 m^2 + \frac{6m^2}{2} = 15 m^2$$

El área total del sistema de composteo, destinada para actividades y maniobras durante la operación del proceso de composteo, sería de:

$$A_{tsc} = [A_{tc} + A_{tpas-p.} + A_{pa}] (m^2)$$

$$A_{tsc} = [60m^2 + 108m^2 + 15m^2] = 183 (m^2)$$

La conformación de pilas depende del área y de la geometría que se destine para el proceso de composteo de lodos, es recomendable hacer las pilas en forma de hileras, y ubicarlas según la estructura de la planta, de tal forma que la pila correspondiente a la mezcla inicial quede en la entrada y que se pueda ir realizando la rotación hasta que la pila que corresponde al lodo ya compostado quede al final, cerca del área de acopio y almacenamiento.

En la Tabla 13 se presentan las dimensiones de las pilas y la superficie requerida para el proceso de composteo de los lodos.

**Tabla 13. Dimensiones de las pilas de composteo**

<b>Dimensionamiento de las pilas</b>	
Ancho de base (m)	2
Altura de pila (m)	1
Longitud de pilas (m)	3
Espacio entre pilas (m)	4
Número de días de composteo (días)	30
Pilas formadas al mes (unidades)	10

Se recomienda estimar un área destinada para preparar del material a compostar, y para el cribado y almacenamiento del producto final (Miliarium. Ingeniería Civil y Medio Ambiente 2014). Haciendo una estimación de acuerdo a los volúmenes de mezcla que serán compostados, se obtendrían las siguientes dimensiones presentadas en la Tabla 14:

**Tabla 14. Dimensiones de áreas para preparación y disposición de material.**

<b>Dimensionamiento de las pilas</b>	
Zona de recepción de lodos (m <sup>2</sup> )	2
Zona de almacenamiento y triturado de material acondicionador (m <sup>2</sup> )	3
Zona de almacenamiento de agente enriquecedor o enmienda (m <sup>2</sup> )	2
Zona de curado (en caso de requerirse) (m <sup>2</sup> )	30
Zona de cribado (m <sup>2</sup> )	10
Superficie total para zonas de preparaciones de material y disposición de producto final (m <sup>2</sup> )	47

Considerando las áreas necesarias para realizar todo el proceso de composteo de lodos, el área total requerida sería de aproximadamente:

*Área total para compostaje de lodos: Área total para los sistemas de composteo + Área total para zonas de preparación y disposición de material*

$$\text{Área total para compostaje de lodos} = 183 + 47 = 230 \text{ m}^2$$

### **3.3.3. Maduración, cribado, secado**

Estas actividades son opcionales, a menos que la composta se quiera comercializar, se requerirá darle textura y apariencia adecuada. Según las recomendaciones en la mayoría de la bibliografía consultada, el tiempo apropiado para la maduración del compost es de aproximadamente 30 días. Considerando que en la planta de composteo se cuenta con área suficiente para hacer una instalación adicional, y que además la cantidad de lodo no es muy grande y por ende el producto final tampoco, se recomienda que se realice una pequeña construcción de un espacio con piso en concreto y con techo, destinado para disponer allí el compost después de haber terminado el proceso de composteo que se describió anteriormente.

Como recomendación se sugiere que en el área destinada para la fase final del proceso se pueda hacer la maduración, el cribado, el secado y el almacenamiento del compost, y que al igual como se realiza el proceso de composteo, sería un proceso en serie, que implique inicialmente disponer el compost por un periodo específico, y durante este tiempo se realice una o dos veces a la semana una operación de volteo para airear, así equilibrar la temperatura.

Después del proceso de maduración y curado, se recomienda que el material pase al proceso del cribado para el cual se propone que se haga de manera manual utilizando una cribadora sencilla de 6 a 12 milímetros, ya que en este rango de tamaños es como se requieren los abonos y fertilizantes en la agricultura tradicional de acuerdo a las consultas realizadas. Para el cribado iniciar con un tamiz grande para retirar los sólidos gruesos y posteriormente con el tamiz de menor diámetro para los sólidos finos y dejar una composta uniforme y de buen aspecto visual.

El secado final del material dependerá de las condiciones de humedad con que se termine el proceso, y de la posibilidad de hacer las instalaciones propuestas de tal manera que se cuente con un área segura, que tenga un techo para evitar que el material gane humedad cuando haya lluvias, para esta etapa se recomienda extender el material final en capas no muy gruesas por unos pocos días mientras se empaca para la distribución final. En caso de no contar con los recursos o la disponibilidad para realizar las instalaciones apropiadas, es posible que el producto obtenido se cubran con una lona de hule que sea totalmente impermeable para garantizar que el material permanezca seco en la zona de almacenamiento hasta que se pueda dar su uso final. La composta deberá tener un contenido de humedad menor al 40%.

### **3.3.4. Calidad del lodo composteado**

La calidad del lodo composteado dependerá de la forma como se realicen las operaciones, por lo cual se recomienda que se sigan paso a paso los procedimientos requeridos por cada fase del proceso para alcanzar resultados óptimos de acuerdo al objetivo, desde que se realizan los tratamientos al lodo antes de salir de la PTAR hasta que se almacena el producto final para su distribución, y así garantizar la obtención de un material estabilizado, limpio y seguro para ser aplicado a suelos y cultivos como mejorador de suelos y/o como fertilizante, sin ningún riesgo al ambiente y a la salud.

Se propone que se realicen análisis semestrales o anuales al compost obtenido para verificar que se está cumpliendo con los parámetros de calidad que establece la NOM-004-SEMARNAT-2002, y poder utilizar el producto de manera segura.

Se recomienda que se realicen las pruebas correspondientes a: CRETIB (Código de clasificación de las características que contienen los residuos peligrosos y que significan: Corrosivo, Reactivo, Explosivo, Tóxico, Inflamable y Biológico infeccioso); Así también, si es posible y para asegurar que los lodos compostados no presentan problemas de fitotoxicidad en los cultivos, se podría realizar ensayos fitotóxicos en cultivos agrícolas específicos.

### **3.3.5. Diagrama de flujo del proceso de composteo propuesto para la estabilización de lodos por composteo**

La propuesta realizada para llevar a cabo el composteo de lodos residuales provenientes de la PTAR Cerro del Agua de CU, consiste en la instalación de un sistema de composteo abierto, conformado por pilas estáticas con volteo manual o mecánico. Usando la mezcla de lodos deshidratados con un contenido de humedad del 80%, con trozos de madera de tamaños entre 8 y 10 cm como material acondicionador, y con estiércol de caballo como agente de enriquecimiento o enmienda.

En la Ilustración 18 se presenta el diagrama del proceso de estabilización de lodos residuales de C.U. UNAM por composteo:

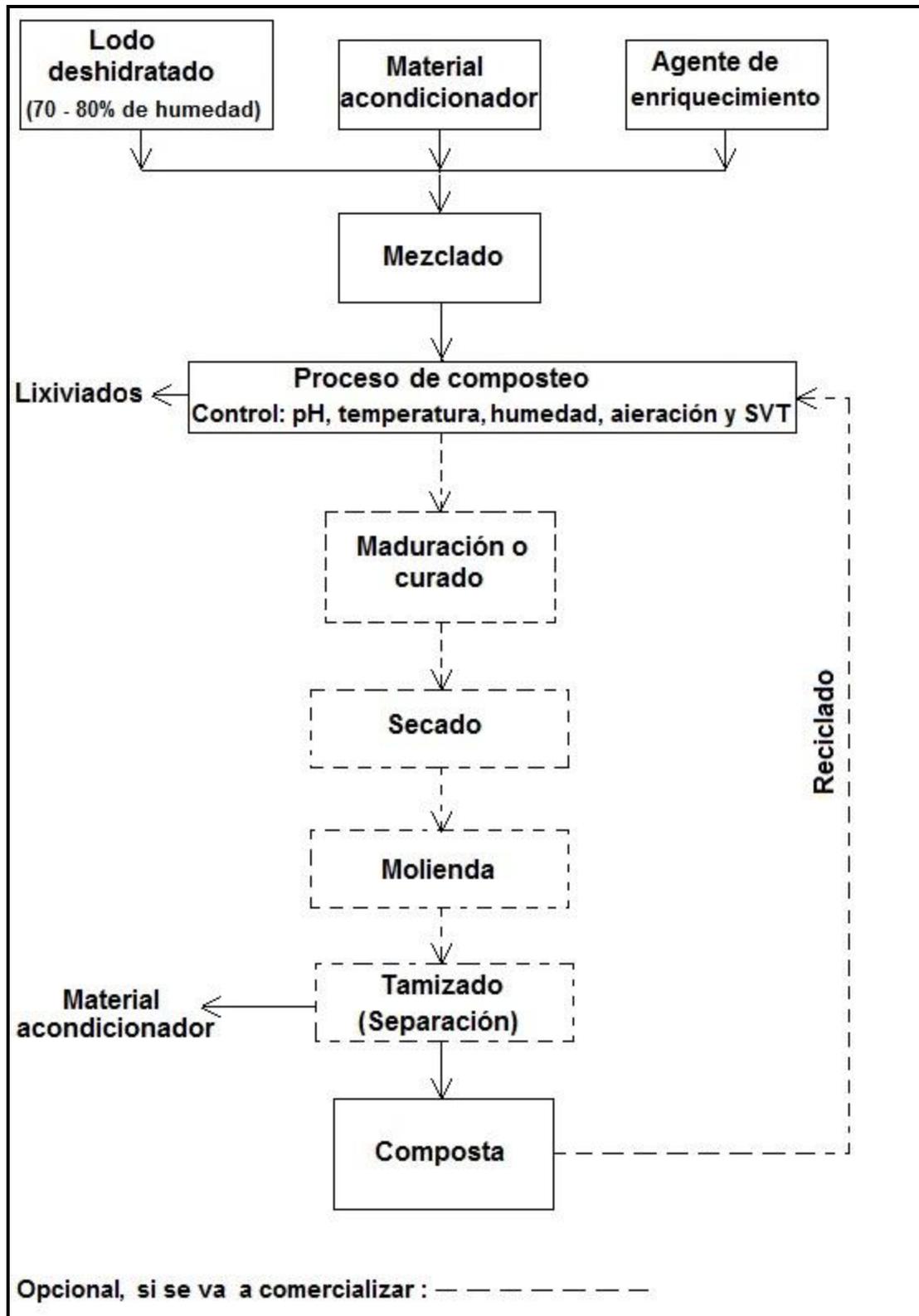


Ilustración 18. Diagrama del proceso de estabilización de lodos de C.U. UNAM por composteo

En el proceso propuesto no se considera realizar maduración o curado ya que se recirculará el material acondicionador, y el compost generado saldrá directamente para ser incorporado en los jardines de los campos de CU, o bien una parte se usará en las pilas como material aislante y así conservar la temperatura y reducir los posibles malos olores. Se recomienda que si se desea la comercialización de la composta, entonces es necesario dejarla más tiempo para que se mejore su textura y se complete su estabilización, luego se debe realizar el proceso de tamizado para tener una composta comercial.

#### **4. PROPUESTA DE APROVECHAMIENTO Y/O DISPOSICIÓN DE LODO COMPOSTEADO**

La razón de realizar un tratamiento final, mediante el composteo, a los lodos residuales generados en la PTAR Cerro del Agua de la UNAM, es poder disminuir el impacto negativo que genera el vertimiento de éstos al drenaje de la ciudad ocasionando una mayor contaminación en las aguas residuales; y a la vez darle un valor a los lodos residuales a través de su transformación, pasando de ser un material contaminante a ser un producto benéfico aprovechable que no requiere mayor inversión económica y que puede ser parte de un proyecto sustentable, es decir, que sea positivo para el aspecto social, económico y ambiental.

Se recomienda entonces que este producto sea valorado y que haga parte de un proyecto de mejoramiento como alternativa sustentable que no implique mayores inversiones y que, al contrario, se pueda incorporar a los procesos que se realizan en la Planta de Compostaje de la UNAM, como valor agregado al material que allí se procesa y que mejore la calidad del compost hecho con material vegetal, incorporando también el estiércol de equinos y cerdos que se genera en la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la universidad, aprovechando que estos residuos son conocidos en la literatura como enriquecedores por sus aportes en nutrientes cuando son tratados para convertirlos en abono.

##### **4.1. *Uso de lodos compostados en CU***

Dado que la universidad cuenta con la Planta de Compostaje para dar un manejo apropiado a los residuos provenientes de las áreas verdes de CU mediante su compostaje y así poderlos incorporar nuevamente a las 200 Ha que tiene la universidad en jardines y zonas verdes, ya convertidos en abono, se propone que

inicialmente el compost obtenido de los lodos residuales de la PTAR Cerro del Agua, también sean incorporado como abono orgánico en los jardines y demás áreas verdes de la universidad para mejorar y fertilizar sus suelos. También es posible incorporar el lodo compostado en las actividades para la fertilización de las plantas del vivero que tiene la universidad en CU.

La propuesta es que el compost obtenido del tratamiento de los lodos de la PTAR, sea parte de los programas de fertilización que tiene la coordinación de áreas verdes de la universidad en su Ciudad Universitaria.

#### **4.2. Comercialización de lodo compostado y generación de patente**

Después de aprobada y aplicada la propuesta de dar como disposición final a los lodos residuales de la PTAR Cerro del Agua, un tratamiento de composteo mediante la aplicación de los procedimientos expuestos en este trabajo, se espera que a mediano plazo (dos o tres años) se haya logrado perfeccionar lo mejor posible el proceso de composteo de lodos obteniendo un producto final completamente estabilizado, de excelente calidad y que pueda ser comercializado en el mercado como abono orgánico de máxima calidad, considerando que también se integre a este tratamiento el manejo de los residuos de equinos y cerdos de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la UNAM.

Se propone que cuando se haya logrado un proceso óptimo y un producto final excelente se gestione la obtención de una patente para lo cual es necesario la revisión de los requerimientos a través del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial, en el cual se requiere procesar una solicitud y someter el proceso y el producto final obtenido, a un examen que evalúa la calidad y una serie de parámetros o variables que lo calificarían como un producto y/o proceso novedoso, diferente, y seguro. Si se lograra esta meta, la universidad podría tener la patente por un periodo de 20 años, y posterior a este tiempo para ser de dominio público.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

La generación de grandes volúmenes de lodos en las plantas de tratamientos de aguas residuales implica un problema ambiental, por lo cual se ha visto, a nivel mundial, la necesidad de darles una disposición final apropiada, debido a que por sus características químicas y físicas, y sus grandes cantidades de volumen, generalmente representan un serio problema que afecta la salud humana y los ecosistemas.

Es pertinente pensar y proponer una solución alternativa y sustentable para el manejo y la disposición de lodos residuales a pequeña escala, lo cual puede resultar un aporte muy significativo visto como un ejemplo que se puede dimensionar para ser implementado en un proyecto de mayor escala.

Dentro de las varias alternativas que existen para darle una disposición final adecuada a los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales, la técnica del compostaje es una de las que mejores resultados podrían tener para la estabilización de la materia orgánica, y la destrucción de microorganismos patógenos que contiene el lodo. Es así como un material sólido inmerso en los lodos pasa de ser un residuo contaminado a ser un residuo aprovechable con valor económico que beneficia al ambiente y a la sociedad, lo que evidencia que el composteo de lodos es una alternativa de manejo sustentable porque sus beneficios integran el factor económico, social y ambiental.

El composteo de lodos residuales debe realizarse aplicando las técnicas de operación como se sugiere, según las diferentes investigaciones consultadas y la experiencia práctica, para garantizar que el proceso se dé en condiciones óptimas, lo que conlleva a obtener un producto final de excelente calidad. Esto es posible lograrlo siempre y cuando se cumpla con las medidas necesarias respecto a los niveles que deben mantenerse en los parámetros que determinan la correcta funcionalidad de los mecanismos de acción dentro del proceso.

La posibilidad de enriquecer el compost obtenido de los lodos residuales con material de enmienda como por ejemplo el estiércol de algunos animales y material vegetal procedente de jardines, puede darle un valor agregado al abono orgánico final considerando que este tipo de enmiendas por sí solas tienen una gran cantidad de nutrientes que a través del proceso de composteo pueden quedar disponibles para ser

asimilados fácilmente por las plantas. Si se logra obtener un compost con altos contenidos de nutrientes como potasio, nitrógeno, carbono, etc., puede ser competitivo con otros fertilizantes químicos que también representan un problema ambiental en el planeta, y contribuir a la disminución del uso de agroquímicos siendo este un reto en muchos países desarrollados y en desarrollo.

La propuesta realizada para darle una disposición final apropiada a los lodos generados en la PTAR Cerro del Agua de CU UNAM, se basó en el análisis de diferentes estudios y experiencias prácticas realizadas en México y en otros países, encontrándose que la metodología del composteo es una de las más utilizadas en el mundo por su bajo costo, su facilidad de aplicación y sus beneficios ambientales y sociales.

Con el estudio de los procesos físicos y químicos que intervienen en la estabilización de lodos residuales a través del compostaje, y conociendo las características de los lodos de la universidad, se pudo determinar que si es viable y conveniente aplicar la técnica del compostaje a dichos lodos, aprovechando la ventaja al tener la planta de compostaje de residuos vegetales de CU, la cual tiene las condiciones de espacio, de equipos y probablemente de operarios para realizar este proceso.

Se planteó una propuesta metodológica que garantiza una disposición final adecuada para los lodos residuales de la PTAR Cerro del Agua, a través de una serie de procedimientos que son factibles por las condiciones físicas y químicas de los lodos, siempre y cuando se realicen las actividades operativas de manera correcta y se disponga de las instalaciones e infraestructura con que cuenta la Planta de Compostaje de la UNAM.

Aplicando la propuesta planteada y siguiendo las indicaciones recomendadas respecto a los procesos operativos para compostar eficientemente los lodos residuales de CU UNAM, es posible que el producto final obtenido pueda ser utilizado en los campos de la universidad y también comercializado, pudiéndose quizás generar una patente.

### **Recomendaciones**

Se requiere empezar a plantear e implementar alternativas sustentables para darle un manejo y una disposición final a los lodos en la mayoría de las plantas de tratamiento de agua residual que hay en el país, en las cuales generalmente los lodos son vertidos a los drenajes municipales. Considerando que la alternativa del composteo de lodos es fácil de

aplicar ya que no requiere grandes inversiones económicas ni de espacio, teniendo en cuenta las diferentes opciones que hay para aplicarla, se plantea ésta como una solución que debería ser implementada como parte integrante del tratamiento de las aguas residuales, puesto que no es coherente querer aprovechar aguas residuales aplicando un tratamiento para volverlas a utilizar, y que el residuo contaminado que se genera de estas vuelva a contaminar las aguas que siguen su cauce aguas abajo.

Gestionar la compra de un filtro prensa para llevar a cabo la deshidratación de los lodos y poderlos incorporar en el sistema de compostaje.

Reparar los equipos que no funcionan en la Planta de Compostaje de la UNAM para poder utilizarlos en el compostaje de lodos sin interferir en las actividades de composta de los residuos vegetales que se realizan en dicha planta.

Asegurar la disponibilidad de una pipa exclusiva para el regado de las pilas de lodos en caso que sea necesario.

Es recomendable generar una norma para compostear lodos residuales y para sus aplicaciones en zonas agrícolas, que estandarice las metodologías existentes.

Es conveniente que antes de llevar a la práctica (escala real) la metodología de composta planteada para lodos, se realice un estudio piloto con lodo más acondicionador (trozos de madera), y con lodo más acondicionador y más agente de enriquecimiento alto en nutrientes y materia orgánica, con el fin de poder determinar condiciones adecuadas de operación y problemas operativos, lo que garantizará la eficiencia del composteo a mayor escala.

Con los resultados de campo a escala pequeña se podrían desarrollar modelos para el proceso de composteo que incluyan los parámetros básicos de diseño, las constantes de biodegradación de los materiales y los tiempos de composteo óptimos, estos modelos podrían servir para optimizar los tamaños de las pilas de composteo y aplicarse a proyectos a mayor escala.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Álvarez, J. *Manual de compostaje para agricultura ecológica*. Andalucía: Albanta creativos s.l, 2008, 1-48.

Atencia, María Elena. *Densidad de maderas ordenadas por nombre común*. Argentina: INT I-CETEMA, 2003, 8.

Barrrios P., José Antonio. *Aspectos Generales del Manejo de Lodos*. México: Instituto de Ingeniería UNAM, 2009, 1-45.

Cabildo-Tenerife. «Plan Territorial Especial de Ordenación de Residuos de Tenerife.» Tenerife. España, 2001.

Castillo, Gabriela, María Pía Mena, y Carola Alcota. «Experiencias Sobre Compostaje de Lodos de Digestión Aerobia y Anaerobia.» Chile, 2002, 8.

Colomer M., Franciso José, y Antonio Gallardo I. *Tratamiento y Gestión de Residuos Sólidos*. Valencia: Limusa, 2007.

Comisión Nacional del Agua. «Agenda del Agua 2030.» Mexico, D F., 2011, 70.

Congreso de los Estados Unidos Mexicanos. *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. México: Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 1988, 126.

Cornell State University. *The Science and Enineering of Composting*. 2001. [www.cfe.cornell.edu/compost/Note.html](http://www.cfe.cornell.edu/compost/Note.html).

Cruz O. A., Arturo. «Composteo de Lodos. Curso: Tratamiento y disposición de lodos residuales municipales, parte 3.» México, 2013, 176.

De la Peña, María Eugenia, Jorge Ducci, y Viridiana Zamora. *Tratamiento de aguas residuales en Mexico*. Mexico, D F.: Banco Interamericano de Desarrollo (BID), 2013.

Eftoda, Grant, y Daryl McCartney. «Determining the Critical Bulking Agent Requirement For Municipal Biosolids Composting.» Editado por University of Manitoba Departament of Civil Engineering. *Compost Science & Utilization* 12, nº 3 (2004): 208-218.

EPA - United States Environmental Protection Agency. *Biosolids Technology Fact Sheet: Use of Composting for Biosolids Management*. Washington, D.C.: EPA, 2002, 10.

FAO. «Manual de compostaje del agricultor.» Santiago de Chile, 2013.

Flotats R., Xavier, Elena Campos P., Jordi Platsi C., Josep Illa A., Francina Solé M., y Albert Magrí A. «Guía de los Tratamientos de las Deyecciones Ganaderas.» Cataluña. España, 2004.

Garrido H, Sofía E, Martín Del Campo, V Esteller, R. Vaca, y J. Lugo. «Metales pesados en suelo tratado con lodo y composta, Toluca.» México, 2008.

Haug, Roger Tim. *Compost Engineering Principles and Practice*. Michigan: Ann Arbor Science, 1980.

Limón, Juan Gualberto. «Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿problema o recurso?» Jalisco, 2013.

Mendivil R., Jenny. «Capítulo 2. TIPO, CARACTERÍSTICAS, MANEJO Y DISPOSICIÓN FINAL DE LODOS.» En *Riesgos a la salud en el manejo de lodos biológicos generados en el tratamiento de aguas residuales*, de Jenny Mendivil R. México, Sonora: Universidad de Sonora, 2009.

Mendoza, Manuel, y Sanchez Vigil. «Evaluación Físico-química y microbiológica de cuatro niveles de lodos ordinarios en la elaboración de compost.» El Salvador, 2012.

Metcalf, y Eddy. *Ingeniería Sanitaria. Tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales*. Barcelona: Labor, S. A., 1985.

Miliarium. Ingeniería Civil y Medio Ambiente. 01 de junio de 2014. [www.miliarium.com](http://www.miliarium.com).

Moeller C., Gabriela, Antonio Ramírez G., Sofía E. Garrido H., y Carlos Díaz D. *Tratamiento, disposición y aprovechamiento de lodos residuales*. México, 2008.

Oropeza G., Norma. «Lodos residuales: estabilización y manejo.» *Caos Conciencia*, 2006: 51-58.

Saña, Josep, y Montserrat Soliva. *Condiciones para el compostaje in situ de deyecciones ganaderas sólidas*. Barcelona. España: Escuela Superior de Agricultura de Barcelona-UPC, 2006.

Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. *Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002*. México: Diario Oficial de la Federación. 17 de julio de 2003, 2002, 18.

Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. *Norma Oficial Mexicana NOM-053-SEMARNAT-1993*. México: Diario Oficial de la Federación. 22 de octubre de 1993, 1993.

Soliva, Montserrat, y Oscar Huerta. *Compostaje de lodos resultantes de la depuración de aguas residuales urbanas*. Barcelona: Escola Superior d'Agricultura de Barcelona. UPC, 2004, 9.

Sztern MGA, Daniel, y Miguel A. Pravia. «Manual para la elaboración de compost, bases conceptuales y procedimientos.» Uruguay, 1999.

Torres L., Patricia, y otros. «Influencia del material de enmienda en el compostaje de lodos de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales - PTAR.» *Revista Ingeniería e Investigación*, Agosto 2005: 53-61.

Turovsky, Israel S. *Wastewater sludge processing*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006.

WEF, Water Environment Federation Technical Practice Committee Control Group. *Biosolids Composting. Special publication*. USA, Alexandria, 1995.