



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
FACULTAD DE PLANEACIÓN URBANA Y REGIONAL
LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES

TESIS

**COMPOSTAJE EN TAMBOR ROTATORIO PARA LA REVALORIZACIÓN DE
LADOS RESIDUALES**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

PRESENTA:

JESÚS GARCÍA GONZÁLEZ

DIRECTORA DE TESIS

DRA. En Q. MARÍA DEL CARMEN JIMÉNEZ MOLEÓN

CODIRECTOR:

D. En C.A. JOSÉ CABALLERO VIÑAS

TOLUCA, MÉXICO

JUNIO, 2017

ÍNDICE

CAPÍTULO 1.- ANTECEDENTES.	10
1.1.- Contaminación del agua.	11
1.2.- Compostaje.	15
1.2.1.- Condiciones requeridas para el compostaje.	17
A) Humedad.	17
B) Aireación.	17
C) Relación Carbono/Nitrógeno.	17
D) Tamaño de partícula.	18
1.3.- Compostaje de Lodos residuales.	18
1.3.1.- Técnicas de compostaje.	19
A) Compostaje en pilas estáticas.	19
B) Compostaje en tambor rotatorio.	22
1.4.-Análisis estadístico de datos	27
A) Coeficiente de Correlación de Pearson de Determinación R^2	27
B) Análisis de varianza ANOVA	28
CAPÍTULO 2.- JUSTIFICACIÓN CONTEXTUAL Y CIENTÍFICA.	29
2.1.- Justificación contextual.	29
2.2.- Justificación científica.	31
CAPÍTULO 3.- HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.	32
3.1.- Hipótesis.	32

3.2.- Objetivos.	32
3.2.1.- Objetivo general.	32
3.2.2.- Objetivos específicos.	32
CAPÍTULO 4.- METODOLOGÍA.	33
4.1.- Colecta y acondicionamiento de sustratos.	34
A) Lodos.	34
B) Recortes de Jardín.	34
4.2.- Construcción del tambor rotatorio.	34
4.3.- Elaboración de la mezcla.	37
4.4.- Transporte y almacenamiento de muestras.	37
4.5.- Caracterización.	38
4.5.1.- Fitotoxicidad	38
4.5.2.- Macronutrientes.	39
4.5.3.- Metales pesados.	42
4.5.4.- Microbiológicos.	42
4.6.-Seguimiento del proceso.	43
4.8.- Análisis estadístico de datos.	43
CAPÍTULO 5.- RESULTADOS Y CONCLUSIONES.	44
5.1.- Caracterización de la mezcla inicial.	44
5.1.1.- Nutrientes K y P.	44

5.1.2.- Metales pesados en la mezcla inicial.	45
5.1.3.- Caracterización microbiológica de la mezcla inicial.	46
5.1.4.- Índice de germinación en la mezcla inicial.	47
5.2.- Seguimiento del proceso de compostaje en el tambor rotatorio.	49
5.3.- Caracterización de la composta obtenida del compostaje en tambor rotatorio.	51
5.3.1.- K y P en la composta obtenida del tambor rotatorio.	52
5.3.2.- Metales pesados en la composta obtenida del tambor.	53
5.3.3.- Caracterización microbiológica de la composta obtenida del tambor rotatorio.	54
5.3.4.- IG en la composta obtenida del tambor rotatorio.	55
5.4.- Etapa de pulimiento en pilas estáticas.	57
5.4.1.- K y P en la etapa de pulimiento.	58
5.4.2.- Metales pesados en la etapa de pulimiento.	59
5.4.3.- Caracterización microbiológica en la etapa de pulimiento.	60
5.4.4.- IG en la etapa de pulimiento.	61
5.5.- Interrelación de parámetros.	63
CAPITULO 6.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	67
6.1.- Conclusiones.	67
6.2.- Recomendaciones.	67
Anexo 1.- Cálculos.	70

Anexo 2.- Análisis ANOVA.	85
Anexo 3.- Clasificación de biosólidos	86
7.- BIBLIOGRAFÍA.	88

Índice de tablas

Tabla 1.1 Sistemas de tratamiento empleados en México durante 2014.	13
Tabla 1.2 Casos de compostaje en pilas estáticas, usando los lodos de la PTAR del Centro Comercial “Galerías Metepec”.	20 – 21
Tabla 1.3 Casos de compostaje en tambor rotatorio.	24 – 25
Tabla 4.1 Partes del tambor rotatorio.	36
Tabla 4.2 Parámetros analizados y métodos usados para la caracterización.	38
Tabla 5.1 Caracterización NTK, COT, C/N, Humedad, pH, conductividad eléctrica.	44
Tabla 5.2 P y K en la mezcla inicial.	45
Tabla 5.3 Metales pesados en la mezcla inicial.	46
Tabla 5.4 Determinación de contaminantes microbiológicos en la mezcla inicial.	47
Tabla 5.5 IG de la mezcla inicial.	48
Tabla 5.6 Caracterización de la composta a la salida del tambor rotatorio, en los parámetros pH, conductividad, COT, NTK, Humedad.	51
Tabla 5.7 K y P después del compostaje en tambor rotatorio.	52
Tabla 5.8 Contenidos de metales pesados en la composta obtenida del tambor rotatorio (p.s.).	53
Tabla 5.9 Caracterización microbiológica de la composta obtenida en el tambor	54

rotatorio.	
Tabla 5.10 IG en la composta a su salida del tambor rotatorio.	55
Tabla 5.11 NTK, COT, C/N, humedad, pH y conductividad eléctrica de la etapa de pulimiento.	57
Tabla 5.12 Contenidos de K y P en la etapa de pulimiento.	58
Tabla 5.13 Metales pesados en la etapa de pulimiento p.s.	60
Tabla 5.14 Clasificación microbiológica en la etapa de pulimiento.	61
Tabla 5.15 IG en la etapa de pulimiento.	62
Tabla 5.16 Coeficiente de correlación de Pearson y de determinación R² para la semilla de lechuga.	63
Tabla 5.17 Coeficiente de correlación de Pearson y de determinación R² para la semilla de rábano.	64

Índice de figuras

Figura 1.1 Fases del compostaje (Cooperband, 2007).	16
Figura 1.2 Compostaje en pilas estáticas.	19
Figura 1.3 Tambor rotatorio.	23
Figura 4.1 Metodología.	33
Figura 5.1 Evolución de los parámetros: A) pH, B) temperatura y C) humedad, durante el compostaje en el tambor rotatorio.	49
Figura 5.2 Comportamiento de los parámetros COT, NTK y C/N durante el compostaje.	58
Figura 5.3 K y P durante el compostaje.	59
Figura 5.4 IG durante el compostaje.	62
Figura 5.5 Gráfica del coeficiente de correlación de Pearson para el IG en la semilla de lechuga.	64
Figura 5.6 Coeficiente de correlación de Pearson del IG medido en la semilla de rábano.	65

Resumen

La contaminación del recurso agua se ha incrementado durante los últimos años, generando la necesidad de emplear técnicas eficientes para su tratamiento (Franco, 2004). En México, actualmente, las técnicas más usadas son lodos activados y lagunas facultativas (CONAGUA, 2015); ambas producen lodos residuales, considerados como biosólidos, debido a sus altos contenidos de microorganismos y Materia Orgánica (MO) (DOF, 2004). Los lodos activados representan un problema ambiental, porque requiere de un tratamiento para su estabilización fisicoquímica y microbiológica. La técnica más innovadora y barata para la estabilización de los lodos es el compostaje (Álvarez, 2009). En esta tesis, los lodos residuales de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de “Galerías Metepec” fueron composteados con pasto fresco, en tambor rotatorio, para comparar los resultados con los reportados en las pilas estáticas de García (2015), y evaluar el efecto del reactor en la mezcla lodos – pasto. La mezcla inicial presentó las siguientes características: Nitrógeno Total Kjeldhal (NTK) $30,165 \pm 800$, Carbono Orgánico Total (COT) $419,600 \pm 10,300$, potencial de Hidrogeno (pH) 7.1 ± 0.3 , conductividad eléctrica (CE) $7,414 \pm 120 \mu\text{S/cm}$, Potasio (K) $12,420 \pm 1200$, Fósforo (P) $15,700 \pm 600$, coliformes fecales 3.4×10^7 NMP/g, índice de germinación (IG) lechuga $64.4\% \pm 2.1$, rábano $93\% \pm 1.4$. La mezcla se realizó de acuerdo con la metodología manejada por García (2015) y Caballero (2014). La mezcla se mantuvo durante 30 días en el tambor rotatorio; el rango de rotación fue de 3 minutos cada 24 horas. Durante el compostaje se presentó una alta producción de Amoniaco (NH_3) que influyó sobre los parámetros NTK, CE, pH y coliformes fecales. Al finalizar el proceso en el tambor rotatorio, la composta mostró mejoras frente a la producida en las pilas estáticas, de acuerdo con el IG. García (2015) reportó una disminución en este parámetro, 1.21% para la semilla de lechuga y 10% para la de rábano, mientras que en esta investigación se registro un incremento de 21.5% y 4% respectivamente, mostrando una pérdida de fitotoxicidad, además los contenidos de coliformes fecales disminuyeron en 2 unidades exponenciales, y en las pilas estáticas solo 1 unidad exponencial. Finalmente se decidió plantear una etapa de pulimiento en pilas estáticas, para evaluar los beneficios de un compostaje tambor – pilas, observando que los factores beneficiados con esta etapa fueron el NTK 20.1%(↓) final, CE 46.2%(↓), P 28.5% (↑), e IG 32.7%(↑) lechuga y 7%(↑) rábano. De acuerdo con la Normatividad y con Varnero *et al.* (2007), el comportamiento de la mezcla lodos – pasto durante el compostaje mostro mostro una alta eliminación de sustancias nocivas y una mejora en su potencial agronómico.

Abstract

Pollution of water resource was incremented during last years, generating the necessity to use efficient techniques on his treatment (Franco, 2004). In Mexico, actually, the most used techniques are activated sludge and facultative ponds (CONAGUA, 2015); both produce sewage sludge: considered as biosolid, because of their high contents of microorganisms and Organic Matter (MO). Sewage sludge represents an environmental problem, because they require a treatment to their microbiologic and physicochemical stabilization. The most innovated and cheapest technique to the stabilization of sludge is composting (Álvarez, 2009). On this thesis, sewage sludge of “Galerias Metepec” Sewage Water Treatment Plant was composted with fresh grass, on rotary drum, to compare results with reported on the static piles of Garcia (2015), and evaluate the effect of reactor on the sludge – grass mix. Mix showed this characteristics: Total Kjeldhadl Nitrogen (TKN) $30,165 \pm 800$, Total Organic Carbon (TOC) $419,600 \pm 10,300$, Hydrogen potential (pH) 7.1 ± 0.3 , electrical conductivity (EC) $7,414 \pm 120 \mu\text{S/cm}$, Potassium (K) $12,420 \pm 1200$, Phosphorus (P) $15,700 \pm 600$, fecal coliforms 3.4×10^7 , Germination Index GI lettuce $64.4\% \pm 2.1$, radish $93\% \pm 1.4$. Mix was made according with Garcia (2015) and Caballero (2014) methodology. Mix was retaining for 30 days on rotary drum; rate of rotation was 3 minutes every 24 hours. On Composting observe a high production of Ammonia (NH_3) that influenced on KTN, CE, PH and fecal coliforms parameters. At end of process on rotary drum, compost shows improvements in front of produced en static piles, according with GI. Garcia (2015) reports a decrease on this parameter, 1.2% on lettuce seed and 10% to radish, while on this investigation register an increase of 21.5% and 4% respectively, showing a leak of phytotoxicity, too fecal coliforms contents decrease on 2 exponential units, and on static piles decrease on 1 exponential unit. At end of process on rotary drum, compost shows improvements in front of produced on static piles on parameters GI, 21%(\uparrow) lettuce and 4%(\uparrow) radish; on piles 1.21%(\downarrow) lettuce and 10%(\downarrow) radish; fecal coliforms decrease two exponential units on drum and only 1 exponential unit with piles. Finally we decide rise a polish stage on static piles to evaluate the benefits of a drum – piles composting, and the benefits were observed on TKN 20.1%(\downarrow) final, EC 46.2%(\downarrow), P 28.5% (\uparrow), and GI 32.7%(\uparrow) lettuce and 7%(\uparrow) rapine. According with Normative and Varnero *et al* (2007), behavior of sludge – grass mix during compost shows a high elimination of harmful substances and an improvement on here agronomic potential.

1.- Antecedentes

La población mundial ha crecido de manera acelerada durante los últimos 50 años, pues en 1900 existían 1,500 millones de habitantes en el planeta, que para 1950 solo habían incrementado a 2,500 millones, sin embargo a partir de esta década el crecimiento poblacional presentó una dinámica más significativa, llegando hasta 6,896 millones en la primera década del siglo XXI (Naím, 2010). Como resultado del acelerado crecimiento de la población, el medio natural se ha visto afectado en todo el planeta debido a que, con la obtención de insumos que facilitan la supervivencia humana, se ha propiciado la sobreexplotación de recursos y la pérdida de la calidad ambiental que, sumadas al modo de producción industrial actual, derivan en una severa problemática de degradación de los recursos naturales, lo que al final, incide de manera negativa en la vida del ser humano y en la conservación de su entorno (Aledo., *et al.*, 2010).

A partir de que la contaminación, degradación y pérdida de la calidad ambiental empezaron a ser un factor de riesgo para la supervivencia de la población mundial, se ha buscado frenar o regular el impacto devastador, que las problemáticas originadas en el medio natural puedan generarle al ser humano. Así, durante la década de los setenta se planteó una ideología de conciencia ambiental, que se vio fortalecida en 1987 por la ONU (mediante el informe Burtland para el medio ambiente), y que recibió la denominación general de Desarrollo Sustentable: *“el desarrollo que asegura la satisfacción de las necesidades actuales sin comprometer la disponibilidad de los recursos para que las poblaciones futuras puedan satisfacer las suyas”* (FAO, 2011).

Desde un sentido estricto, un sistema sustentable es cerrado, es decir, aquel en el que no existen fugas ni salidas de materia o energía, y en el que todas las entradas son aprovechadas a su máximo potencial, además de que los materiales que podrían ser desechados son adaptados a otros procesos (Meira, 2008).

En los últimos años, se ha introducido el modelo de desarrollo sustentable en los ámbitos social, ambiental y económico, para evitar que la emisión de residuos propicie nuevos problemas o agudice los ya existentes, facilitado de esta manera la apertura de nuevos mercados y tecnologías de materiales reutilizados o reciclados, lo que genera mayor eficiencia en los procesos, mayor tiempo de vida útil de los materiales y una disminución en el gasto de materia y energía (Meira, 2008). La percepción de la sustentabilidad se ha adaptado a diversos ámbitos, así pues, uno de sus principales objetivos es la minimización, el reuso y la recuperación de la calidad de los subproductos generados en diversas actividades comerciales, pues juega un papel muy importante para que el ser humano logre disminuir el impacto que estos propician sobre el medio natural y la población.

De acuerdo con la normatividad, los subproductos generados en las actividades humanas pueden catalogarse en dos grandes grupos: residuos sólidos urbanos, los cuales comprenden una gama de productos orgánicos e inorgánicos que pueden ser reciclados o reutilizados sin tratamientos previos, y residuos peligrosos, que son aquellos en los que se debe obtener una estabilización fisicoquímica y microbiológica, antes de revalorizarse como insumos en otros procesos, debido al impacto que pueden generar sobre el ambiente y la población, el cual está ligado a su origen, pues resulta fundamental conocer su composición, para establecer una técnica de tratamiento eficiente de acuerdo con el subproducto. Al reutilizar o revalorizar los residuos se logra que la actividad que les ha dado origen sea ambientalmente eficiente, pues se minimiza su impacto negativo sobre el suelo, agua o aire, lo que es de vital importancia, ya que la normatividad regula la producción, disposición, reutilización y/o vertido de residuos. El tratamiento y reutilización de los “residuos” se ha empleado en diversos procesos para lograr que la contaminación de los recursos suelo, aire y agua, a la que dan lugar las actividades de la población humana, disminuya.

1.1.- Contaminación del agua

La calidad de los recursos naturales, entre ellos el agua, se ha deteriorado, debido al manejo que se le ha dado, así como al acelerado crecimiento de la población humana mundial. Diariamente se producen 2 millones de toneladas de aguas residuales a nivel mundial, generando un problema de demanda y contaminación del recurso (FAO, 2011). Durante el siglo XX algunas ciudades e industrias del primer mundo empezaron a reconocer que la contaminación del agua generaba problemas sanitarios y ambientales, e iniciaron la búsqueda de alternativas de solución viables, económicas y eficientes que ayudaran a restaurar la calidad del agua (Franco, 2004).

Como resultado del interés por darle una solución a la problemática de la contaminación del agua, se inició con la construcción de instalaciones de depuración. En primer lugar se introdujo la fosa séptica (a principios del siglo XX), como técnica para el tratamiento de aguas residuales domésticas, seguido por la implementación del sistema de cloración de aguas (durante la segunda década del siglo XX) que tenía la finalidad de lograr la eliminación de los agentes patógenos presentes en el agua residual, pues de acuerdo con las observaciones realizadas por Robert Koch, en 1881, con la aplicación de hipoclorito se podían eliminar grandes contenidos de bacterias presentes en el agua.

Para la segunda mitad del siglo XX, se dio la implementación de las lagunas de estabilización en las que se realizaban procesos tanto aerobios como anaerobios, con ayuda de algas y bacterias, con la finalidad de degradar la materia disuelta, a través de microorganismos presentes en el agua residual. Para la sexta década del siglo XX se presentó la implementación de sistema del de lodos activados

(Acuña, 2008); que es un sistema de tratamiento aerobio, en el que un cultivo de microorganismos en suspensión, oxida la materia orgánica presente en el agua residual. A la par del sistema de lodos activados surgieron otros métodos, como los filtros biológicos o el Taque Imhoff, por citar algunos, que no llegaron a sustituir al sistema de lodos activados (Franco, 2004); pero que han sido alternativas de tratamiento, que se han adaptado dependiendo de las características tanto del origen del agua a tratar, como el costo de instalación y funcionamiento.

En la actualidad, las instalaciones donde se realiza el tratamiento de los recursos hídricos sanitarios son las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), siendo su finalidad restablecer la calidad del agua para que posteriormente sea reutilizada o descargada en cuerpos de agua superficiales, una vez que se cumpla con la normatividad correspondiente, para que el impacto sobre el ambiente o la población sea mínimo.

En México, a principios de 2015, se dieron a conocer cifras correspondientes a los procesos de tratamiento de aguas residuales y las PTAR que los aplicaron durante 2014, a través del inventario de plantas de tratamiento de CONAGUA. En la tabla 1.1 se observan la información recolectada por la CONAGUA (2015).

Tabla 1.1 Sistemas de tratamiento empleados en México.

Proceso	Plantas		Caudal tratado	
	No.	%	L/s	%
Aerobio	6	0.26	17.9	0.02
Anaerobio	67	2.93	515.9	0.49
Biológico	24	1.05	467.9	0.44
Discos biológicos o biódiscos	13	0.57	466.5	0.44
Dual	16	0.7	5,747.5	5.43
Filtros biológicos o rociadores percoladores	38	1.66	5,469	5.16
Fosa séptica	95	4.15	113.6	0.11
Fosa séptica + Filtro biológico	23	1.01	21.9	0.49
Fosa séptica - Wetland	84	3.67	119.2	0.24
Humedales (Wetland)	70	3.06	517.1	1.51
Lagunas aireadas	33	1.44	7,336.4	6.93
Lagunas de estabilización	722	31.57	14,231	13.43
Lodos activados	699	30.56	60,725.4	57.32
Primario avanzado	11	0.48	4,455	4.21
Primario o sedimentación	21	0.92	1,600.4	1.44
Rafa + Filtro biológico	32	1.4	249	0.14
Rafa o Wasb	141	6.17	1,520.7	0.11
Rafa, Wasb + humedal	20	0.87	148.8	0.03
Reactor enzimático	60	2.62	115.6	0.01
Sedimentación + Wetland	18	0.79	28.2	0.03
Tanque Imhoff	52	2.27	348.5	0.33
Tanque imhoff + Filtro biológico	14	0.61	31.9	0.03
Tanque imhoff + Wetland	1	0.04	5.0	0.01
Terciario	6	0.26	202.1	0.19
Tanque de oxidación	17	0.74	1,458.5	1.38
Otro	4	0.17	22.0	0.02
Total nacional	2,287	100	105,934.9	100

Fuente: CONAGUA (2015)

En la tabla 1.1 se observa que durante el 2014 en el país se contaba con 2,287 plantas en operación, en las que se trataba un caudal de 105,934.9 L/s, siendo los sistemas de lagunas de estabilización y los lodos activados los que más PTAR emplearon durante este período, al contar con 31.57% (lagunas de estabilización) y 30.56% (lodos activados), del total las PTAR en México, sin embargo, los lodos activados fueron el sistema con el que se trató la mayor parte del caudal a nivel nacional

con un 57.32%, mientras que en segundo lugar se ubicó el sistema de lagunas de estabilización con apenas 13.43% del total nacional.

El principal residuo que genera el tratamiento de aguas son los lodos residuales, son definidos de acuerdo con la NOM-004-SEMARNAT- 2002 (DOF, 2002); como sólidos con un contenido variable de humedad, que provienen del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, y que no han sido sometidos a un proceso de estabilización fisicoquímica y microbiológica, por lo que pueden generar problemas en la salud de la población, propensa a infecciones en vías respiratorias al secarse, y ser arrastrados por el viento, o en vía digestiva al tener contacto con fango sin las medidas higiénicas adecuadas (Alonso., *et al.*, 2011); debido a los contenidos de microorganismos patógenos que pueden presentar, como lo son: *Leptospira interrogans*, *Eischerichia coli*, *Clostridium perfringens*, *Actinomyces*, *Bacillus anthracis*, y *Legionella ssp*, entre otros (Barrios, 2009); esto vuelve necesario que los lodos residuales reciban un tratamiento previo a su disposición final (DOF, 2002).

Debido al impacto de los lodos sobre el ambiente y la población, se han buscado que las alternativas para su disposición, conlleven su estabilización, y reutilización. De acuerdo con la literatura las principales actividades en que se incorporan los lodos residuales son:

- 1) Disposición de lodos en rellenos sanitarios: Durante la década de los 80, el 90% de los lodos residuales generados por las PTAR a nivel nacional eran dispuestos en rellenos sanitarios (Martinez., *et al.*, 2013). Sin embargo, de acuerdo con Mendoza y Rojas (2011) durante las últimas 3 décadas se ha generado un incremento de más de 100% en la producción de fangos, por lo que se han buscado implementar técnicas que faciliten reintegrarlos en actividades secundarias, minimizando su impacto sobre el ambiente y la población humana, en vez de darles una disposición final. Debe tomarse en cuenta que el manejo de los lodos esta normado por la NOM-004-SEMARNAT-2002 (DOF, 2002), donde se establecen los límites para su estabilización fisicoquímica y biológica.
- 2) Recuperación de energía (eléctrica o calorífica) y generación de combustibles: Se realiza promoviendo la degradación anaerobia de los lodos. Por ejemplo: Durante 2013 Japón, realizó la degradación anaerobia de lodos, generando como metabolito principal el metano, que fue usado en la cogeneración de energía eléctrica para edificios gubernamentales, esto se llevó a cabo por medio de 300 digestores municipales, que fueron montados por el gobierno federal, donde se trataron los lodos de las PTAR públicas, el biogás producido presentó un valor calorífico de 17,313 kJ/kg en peso seco, y se generó en una proporción de

0.09 ml/g de fangos, resultando en una alternativa sustentable para su tratamiento (Araí., *et al.*, 2013).

- 3) **Uso Agrícola y Recuperación de suelos:** Durante la década de los 90's los lodos residuales eran usados para enmendar suelos agrícolas, en muchas ocasiones sin una estabilización previa (Martínez., *et al.*, 2013). La aplicación de los fangos en esta actividad se debe a sus altos contenidos de nutrientes como: Carbono, Nitrógeno, Fósforo y Potasio, sin embargo, debido a su composición fisicoquímica y microbiológica la normatividad establece límites de aplicación (DOF, 2002); por lo que es necesario realizar un proceso de estabilización previo a su aplicación en suelos, siendo el compostaje la técnica más usada. En el siguiente apartado se profundizará en esta actividad.

1.2.- Compostaje

La producción de compostas tiene sus orígenes en la aparición de vida en el planeta, ya que la naturaleza la genera espontáneamente, al degradar compuestos orgánicos, así, a través de los años, los agricultores de diferentes culturas han emulado este comportamiento. En la Asia antigua, los chinos composteaban los residuos de sus jardines, campos agrícolas e incluso heces fecales; mientras que, en Europa, los romanos apilaban sus residuos en las afueras de la ciudad y posteriormente realizaban composta con ellos (Vento, 2008). En la actualidad, las aplicaciones más habituales del compostaje son el tratamiento de residuos de jardín y cocina, residuos sólidos municipales y lodos de las PTAR (Silva., *et al.*, 2009).

El proceso de compostaje se define como la degradación biológica de la materia orgánica, bajo condiciones que permiten alcanzar altas temperaturas, como consecuencia de la producción biológica de calor, generando un producto final estable en sus características fisicoquímicas y libre de patógenos, y que, aplicado en suelos, produce beneficios por la cantidad de nutrientes disponibles que contiene (Ferrini y Saebo, 2006).

De acuerdo con lo descrito por Cooperband (2007), durante el compostaje, la degradación oxidativa se caracteriza por presentar 4 fases (figura 1.1), las cuales se diferencian entre ellas por los cambios de temperatura y pH, que influyen en la actividad microbiológica, y que benefician la degradación de los sustratos.

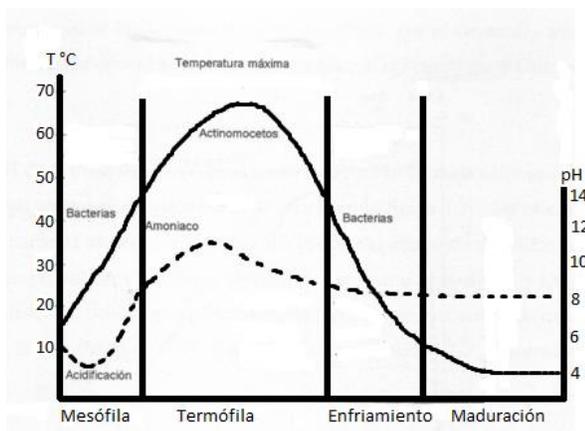


Figura 1.1 Fases del compostaje (Cooperband, 2007).

- Fase Mesófila inicial: En esta fase se descomponen los compuestos fácilmente degradables (azúcares, lípidos y grasas), por la acción de bacterias. La temperatura se encuentra entre 5 y 40° C, el pH puede ubicarse por debajo de la neutralidad e incluso presentar una leve tendencia ácida debido a la producción de ácidos orgánicos (figura 1.1) (Martínez., *et al.*, 2013).
- Fase Termófila: Durante esta fase se presenta un incremento en la temperatura de la composta, registrando un rango de entre 40 – 70 °C como resultado de la alta actividad oxidativa de los microorganismos, principalmente bacterias y actinomicetos, que descomponen los materiales celulósicos, ceras y polímeros en compuestos inorgánicos, CO₂, H₂O, y fitotoxinas, como el Amoniac (Cariello., *et al.*, 2007). Debido a la producción de estas sustancias pH suele ubicarse en el rango de la basicidad (Martínez., *et al.*, 2013).
- Fase de enfriamiento: Caracterizada por un descenso de la temperatura, disminución de la velocidad de degradación y recolonización del sustrato por microorganismos mesófilos que realizan la degradación de polímeros (como almidón o celulosa). El pH empieza a presentar tendencias la neutralidad (figura 1.1).
- Fase de maduración: La NTEA-006-SMA-RS-2006 (DOF, 2006) establece que una composta madura debe presentar un pH de entre 6 – 8, pues la acción microbiológica es muy baja, por lo que la temperatura es muy estable, el producto se apila por un promedio de 30 – 60 días, en los que se incrementa la humificación de la MO y la movilización de nutrientes, gracias a la actividad de los actinomicetos, que predominan durante esta etapa (Martínez., *et al.*, 2013).

1.2.1.- Condiciones Requeridas para el compostaje

A) Humedad

La humedad en la composta está vinculada a las concentraciones de agua que esta contiene, pues facilita la movilización de nutrientes, para que los microorganismos puedan consumirlos y realizar sus procesos metabólicos. El rango en el que debe ubicarse este parámetro, durante el compostaje es entre 40% y 65% de acuerdo con lo propuesto por Martínez., *et al.* (2013); Kalamdhad., *et al.* (2009); y Cooperband (2007); ya que, con contenidos menores, se inhibe la actividad microbiana; mientras que con contenido mayores, el oxígeno disponible para las bacterias es poco, lo que evita que puedan digerir los sustratos, provocando malos olores y anaerobiosis.

B) Aireación

El compostaje es un proceso aerobio, donde a mayor actividad metabólica de los microorganismos, mayor demanda de Oxígeno. El consumo del Oxígeno es directamente proporcional a la actividad microbiana, como la actividad microbiana lo es a la temperatura, por lo que el O₂ consumido también lo es a la temperatura, debido a esto, su demanda varía durante el compostaje (Navarro, 2008). Cooperband (2007), propone que lo ideal es mantener este factor por arriba del 10% en todo momento, debe tomarse en cuenta que durante la fase termófila el consumo de este gas se incrementa, mientras que en las fases de enfriamiento y maduración, la demanda disminuye. Para evitar que se presente anaerobiosis, por bajas concentraciones de OD, se realizan volteos periódicos a la composta, aunque, de acuerdo Kalamdhad., *et al.* (2009) cuando los volteos son excesivos (>3 veces diarios) se dificulta la conservación de la temperatura, especialmente en la fase Termófila (Kalamdhad., *et al.*, 2009).

C) Relación Carbono/Nitrógeno

La relación C/N expresa las unidades de Carbono por las unidades de Nitrógeno presentes en algún material. En la masa a compostear, es necesario tomar en cuenta que este factor decrece según avanza el proceso de compostaje, debido al consumo microbiológico del Carbono, frente al consumo de Nitrógeno (Álvarez, 2009). El balance que se considera más adecuado para la supervivencia de los microorganismos se encuentra entre 20:1 – 40:1, de acuerdo con Kalamdhad y Kumar (2014); Martínez., *et al.* (2013); Rodríguez., *et al.* (2010); Kalamdhad., *et al.* (2009); y Cooperband (2007); sin embargo, cuando la C/N es menor a este rango el proceso, solo se retrasa, mientras se presenta la autorregulación de este factor, al liberar Nitrógeno en forma de Amoniac (Jiménez., *et al.*, 2016; Tello., *et al.*, 2014; Cariello., *et al.*, 2007).

De los nutrientes requeridos durante el compostaje, Carbono y Nitrógeno son de los más importantes, pues, frecuentemente resultan tener el carácter de factor limitante (Álvarez, 2009). El Carbono es la fuente de la energía metabólica microbiana y aproximadamente el 30% de su masa celular, mientras que el Nitrógeno es un componente de las proteínas y la biomasa de las bacterias, por lo que requieren tanto del Nitrógeno como del Carbono para su rápido desarrollo (Daza y González, 2008).

D) Tamaño de partícula

Autores como González (2013), Navarro (2008), y Cooperband (2007), recomiendan un tamaño de partícula de entre 3 a 13 mm, ya que durante el compostaje los microorganismos actúan degradando la masa composteada desde la superficie, además en este rango se optimiza el espacio poroso, para el movimiento de gases y lixiviados, beneficiando la acción biológica (Daza y González, 2008).

1.3.- Compostaje de lodos residuales

Hoy en día en las PTAR, se ha buscado desarrollar soluciones sustentables para disponer de los lodos residuales y eliminar el impacto ambiental, social y económico que su disposición final puede generar, siendo el compostaje una de las técnicas más empleadas, debido a que los costos de implementación y manejo son relativamente bajos, además ha demostrado ser una técnica que facilitó obtener la estabilización fisicoquímica y microbiológica de los lodos en otras investigaciones, (Kalamdhad., et al., 2009; Kalamdhad y Kumar 2009).

Al compostear los lodos se les agregan un nuevo valor como insumo para enmiendas de suelos, a esto se le cataloga como revalorización, la cual genera beneficios en diversos ámbitos, así pues, en el contexto ecológico, esta acción facilita la disminución de la contaminación ambiental, al disminuir las cantidades de lodos que son desechados sin ser estabilizados, de esta manera evita la reproducción y propagación de plagas y agentes patógenos, además beneficia la recuperación de nutrientes en suelos como, Carbono, Nitrógeno, Potasio, Fósforo, con lo que se beneficia el crecimiento y desarrollo de las especies vegetales (Martínez., et al., 2013).

En el aspecto socioeconómico, de acuerdo con Álvarez (2009) el compostaje de lodos residuales minimiza los gastos técnicos de disposición final, como los hornos usados para la incineración, al requerir de pequeños espacios e infraestructura casi nula para su implementación, además asegura la estabilización en los contenidos fisicoquímicos y microbiológicos de los fangos, neutralizando de esta manera el riesgo sobre la salud de la población, finalmente, la composta obtenida puede ser aplicada como enmienda para jardineras o comercializada como abono orgánico agrícola, mejorando

la calidad de vida de los trabajadores de la PTAR, que verán incrementado el gasto familiar (Silva., *et al.*, 2009).

1.3.1- Técnicas de compostaje

Existen cuatro técnicas para llevar a cabo el compostaje: 1) en reactores o contenedores, 2) en pilas estáticas, 3) en pilas o montones dinámicos o, 4) en tambor rotatorio (FAO, 2012). Las técnicas comparadas en esta investigación fueron las siguientes:

A) Compostaje en pilas estáticas

La técnica de compostaje en pila estáticas es la más usada de acuerdo con la literatura, por ser simple y económica en términos de consumo de energía, consiste en disponer los materiales en pilas o montones, que son aireados por convección del medio, por lo que deben realizarse volteos manuales de la mezcla (Álvarez., 2009).

Figura 1.2 Compostaje en pilas estáticas



Fuente: Caballero (2014)

Los lodos de la PTAR del centro comercial “Galerías Metepec” se integraron en las investigaciones de García (2015); Caballero (2014); y Peña (2014), enmendando con los sustratos: pasto, residuos de piña y lirio acuático, estos autores emplearon la técnica de las pilas estáticas para el compostaje. En la tabla 1.2 se observan los resultados reportados en esas tesis.

Tabla 1.2 Casos de compostaje en pilas estáticas, usando los lodos de la PTAR del Centro Comercial “Galerías Metepec”.

Autor	Sustratos	Mezcla inicial	Composta	Resultados
García (2015)	Lodos 65% – pasto seco 35% (T ₁); Lodos 65% – pasto fresco 35% (T ₂). (60 Días de compostaje)	Composta T₁		
		Humedad 59%	Humedad 58%	Humedad 1.6%(↓)
		NTK 24,145 mg/kg	NTK 21,431mg/kg	NTK 11.2%(↓)
		COT 398,400 mg/kg	COT 457, 633 mg/kg	COT 12.9%(↓)
		C/N 21,4	C/N 16,5	C/N 22.8%(↑)
		pH 7.2	pH 5.9	pH 27.2%(↓)
		CE 7730 μS/cm	CE 4019 μS/cm	CE 48%(↓)
		Cu 167 mg/kg	Cu 167 mg/kg	Cu 12.1%(↑)
		Pb 83 mg/kg	Pb 83 mg/kg	Pb 3.6%(↑)
		Zn 185 mg/kg	Zn 185 mg/kg	Zn 7.9%(↑)
		Ni 23 mg/kg	Ni 23 mg/kg	Ni 11.5%(↑)
		Negativo a <i>Salmonella ssp</i>	Negativo a <i>Salmonella ssp</i>	<i>Salmonella ssp</i> ≡
		Helmintos 1 NMP/g	Negativo a helmintos	Helmintos 100%(↓)
		Coliformes fecales 2.2 x 10 ⁵ NMP/g	Coliformes fecales 1.2 x 10 ⁵ NMP/g	Coliformes fecales(↓)
		IG rábano 94.1%	IG rábano 99.38%.	IG Rábano 5.3%(↑)
		IG lechuga 83%	IG lechuga 96.7%	IG lechuga 16.6%(↑)
		Composta T₂		
		Humedad 60%	Humedad 55%	Humedad 8.3%(↓)
		NTK 26,531 mg/kg	NTK 25,525 mg/kg	NTK 15.6%(↑)
		COT 500,100 mg/kg	COT 430,850 mg/kg	COT 18.3%(↑)
		C/N 21,4	C/N 18,8	C/N 10%(↑)
		pH 7.1	pH 6.6	pH 5.7%(↓)
		CE 9040 μS/cm	CE 2521 μS/cm	CE 72%(↓)
		Cu 137 mg/kg	Cu 195 mg/kg	Cu 21.7%(↑)
		Pb 80 mg/kg	Pb 82 mg/kg	Pb 42.6%(↑)
		Zn 185 mg/kg	Zn 202 mg/kg	Zn 16.5%(↑)
		Ni 22 mg/kg	Ni 22 mg/kg	Ni ≡
Negativo a <i>Salmonella ss</i> ,	Negativo a <i>Salmonella ssp</i>	<i>Salmonella ssp</i> ≡		
Helmintos 2 NMP/g	Negativo a helmintos	Helmintos 100%(↓)		
Coliformes fecales 2.9 x 10 ⁶ NMP/g	Coliformes fecales 1.8 x 10 ⁵ NMP/g	Coliformes fecales(↓)		
IG rábano 89.8%	IG rábano 81%	IG en rábano 10%(↓)		
IG lechuga 80.3%	IG lechuga 79%	IG en lechuga 1.6%(↓)		

Continuación de la tabla 1.2 Casos de compostaje en pilas estáticas, usando los lodos de la PTAR del Centro Comercial “Galerías Metepec”.

Autor	Sustratos	Mezcla inicial	Composta	Resultados
Caballero (2014)	Lodos 65% – lirio acuático 25% – residuos de piña 10%. (46 Días)	NTK 30,479 mg/kg	NTK 24,800 mg/kg	NTK 18.6%(↓)
		COT 547, 100 mg/kg	COT 452, 100 mg/kg	COT 17.36%(↓)
		C/N 17,8	C/N 18,2	C/N 2.1%(↓)
		pH 6	pH 7	pH 18.2%(↑)
		Negativo a <i>Salmonella ssp</i>	Negativo a <i>Salmonella ssp</i>	<i>Salmonella ssp</i> ≡
		Negativo a helmintos	Negativo helmintos	Helmintos ≡
		Coliformes fecales 4.94 x 10 ⁶ NMP/g	Coliformes fecales 3.03 X 10 ⁷ NMP/g	Coliformes fecales (↑)
		IG rábano 57%	IG rábano 65.07%.	IG en rábano 12.4%(↑)
Peña (2014)	Lodos 75% – lirio acuático 25% (T ₁), Lodos 75%– lirio acuático libre de ácidos volátiles 25% (T ₂). (111 días de compostaje)	Composta T₁		
		NTK 49,200 mg/kg	NTK 33,700 mg/kg,	NTK 42%(↓)
		COT 435, 000 mg/kg	COT 431,500 mg/kg	COT 0.8%(↓)
		C/N 8,84	C/N 12.8	C/N 20.1%(↑)
		Negativo <i>Salmonella ssp</i>	Negativo a <i>Salmonella ssp</i>	<i>Salmonella ssp</i> ≡
		Negativo helmintos	Negativo helmintos	Helmintos ≡
		Coliformes Fecales 4.61 x 10 ⁶ NMP/g	Coliformes fecales 3.1 x 10 ⁵ NMP/g	Coliformes fecales (↓)
		IG lechuga 53%	IG en lechuga 69%.	IG en lechuga 23.1%(↑)
		Composta T₂		
		NTK 47,600 mg/kg	NTK 33,700 mg/kg	NTK 24.4%(↓)
		COT 492, 700 mg/kg	COT 431,100 mg/kg	COT 7.8%(↓)
		C/N 9,03	COT 13,42	C/N 22.9%(↑)
		Negativo <i>Salmonella ssp</i>	Negativo <i>Salmonella ssp</i>	<i>Salmonella ssp</i>
		Negativo helmintos	Negativo helmintos	Helmintos ≡
		Coliformes fecales 4.61 x 10 ⁶ NMP/g	Coliformes fecales 3.0 x 10 ⁵ NMP/g	Coliformes fecales (↓)
		IG lechuga 52%	IG lechuga 72%	IG lechuga 27.7%(↑).

Fuente: Elaboración propia con base en los datos de García (2015), Caballero (2014), Peña (2014), año 2015.

García (2015) realizó 2 compostas en pilas estáticas, de 10 kg, en las que se usó el mismo sustrato como material de enmienda para los lodos, pasto, en 2 presentaciones diferentes, seco – fresco, al finalizar el proceso se observó que el sustrato seco (T_1) representó un consumo mayor de la MO disponible de acuerdo con el consumo del COT y NTK, además, los contenidos de coliformes fecales, metales pesados y el IG demostraron que con esta presentación del pasto presentó las características más apropiadas para la estabilización de los fangos de acuerdo con la NOM-004-SEMARNAT-2002 (DOF., 2002)(tabla 1.2).

Caballero (2014) realizó el compostaje de lodos residuales en una mezcla de 50 litros de volumen, para observar el comportamiento de la mezcla lodos – lirio al adicionarle un material catalizador del proceso, cascara de piña, la cual aportó MO de fácil degradabilidad a la composta, beneficiando el consumo microbiológico, por lo que durante la fase termófila se alcanzaron temperaturas de más de 40°C, beneficiando que el producto obtenido presentara una adecuada estabilización fisicoquímica y microbiológica, de acuerdo con la NOM-004-SEMARNAT-2002 (DOF., 2002).

Peña (2014) realizó el compostaje de lodos residuales bajo dos tratamientos, como control lirio acuático (T_1), y lirio acuático libre de ácidos volátiles (T_2), estadísticamente ($p=0.05$) se encontraron diferencias significativas, por lo que se determinó que T_2 presentó las mejores características, IG más alto, menores concentraciones de coliformes fecales y una mayor actividad microbiológica de acuerdo con el consumo de COT, además, recomendó que el tamaño de pila debe ser mayor a 4 kg, que fue la que ella utilizó durante su investigación, pues esto permitiría conservar la temperatura y de esta manera lograr que se obtengan condiciones termófilas.

B) Compostaje en tambor rotatorio

La técnica del compostaje en tambor rotatorio ha demostrado ser una alternativa que es eficiente el proceso, presentando una estabilización más cercana a la óptima, en un periodo más corto, al facilitar acciones como el volteo de la mezcla, la aireación y la conservación de la humedad y la temperatura, por lo que la aplicación de esta técnica se ha incrementado en los últimos años (Kalamdhad., *et al.*, 2009). En la figura 1.3 se observa la fisonomía del tambor rotatorio, construido y empleado en la presente investigación.

Figura 1.3 Tambor rotatorio



Fuente: Elaboración propia.

Diferentes tipos de materiales (estiércol de búfalo, residuos de destilerías de vino, residuos de comida, residuos de jardineras y aserrín) han sido usados como enmienda de los lodos residuales para el compostaje, mejorando el proceso con la aplicación del tambor rotatorio, en la tabla 1.3 se muestran algunos casos en los que esta técnica facilitó que obtuvieran resultados favorables para la estabilización de fangos.

Tabla 1.3 Casos de compostaje en tambor rotatorio.

Autor	Sustratos y rotación.	Mezcla inicial	Composta	Resultados
Kalamdhad y Singht (2013).	Lodos (60 %) – Estiércol de vaca (30%) – Residuos de jardinera (10%). Rotación: 1 giro completo cada 24 horas. (20 Días de compostaje)	Humedad 62.3%	Humedad 43.23%,	Humedad 30.6 % (↓),
		NTK 10,500 mg/kg	NTK 16,000 mg/kg	NTK 34.3 % (↑),
		COT 297,200 mg/kg	COT 178,400 mg/kg	COT 39.9 % (↓)
		C/N 28,33	C/N 11,19	C/N 28.5 % (↓)
		pH 6.94	pH 7.5	pH 7.4% (↑),
		P 17,100 g/kg	P 32,230 mg/kg	P 52.1% (↑)
		K 23.800 g/kg	K 36,200 g/kg.	K 34.24% (↑)
		Cu 70.5 mg/kg	Cu 91.6 mg/kg	Cu 23.03 % (↑)
		Pb 959 mg/kg	Pb 1111 mg/kg	Pb 13.68 % (↑)
		Zn 147.3 mg/kg	Zn 155 mg/kg	Zn 4.96 % (↑)
		Ni 240 mg/kg	Ni 245 mg/kg	Ni 23.03 % (↑)
Alí., et al., (2013)	Lodos 63% – Estiércol de vaca 13% – residuos verdes 9% – 5% aserrín – 10% pasto. Rotación: 5 minutos cada 24 horas. (100 días de compostaje)	Humedad 75%,	Humedad 59%,	Humedad 21.3% (↓),
		NTK 14,300 mg/kg	NTK 14,700 mg/kg	NTK 2.7% (↑)
		COT 300,000 mg/kg	COT 180,000 mg/kg	COT 40% (↓)
		C/N 21	C/N 12,2.	C/N 41.9% (↓)
		Coliformes fecales 1.9 x 10 ³ NMP/g	Coliformes fecales 1.5 x 10 ² NMP/g	Coliformes fecales (↓),
Rodríguez..., et al. (2012).	50% lodos – 25% residuos de destilería de vino – 25% aserrín. Rotación: 3 giros completos cada 24 horas. (2 semanas de compostaje)	Humedad 66.5%.	Humedad 50.2%	Humedad 24.5% (↓)
		NTK 15,900 mg/kg,	NTK 21,600 mg/kg	NTK 26.38% (↑)
		COT 448,900 mg/kg,	COT 373,000 mg/kg,	COT en 16.9% (↓)
		C/N 29,8,	C/N 17,191	C/N 42.3 (↓).

Continuación tabla 1.3 Casos de compostaje en tambor rotatorio

Autor	Sustratos y rotación.	Mezcla inicial	Composta	Resultados
Kalmhdhad., <i>et al.</i> (2009).	Lodos 60% –Estiércol de vaca 30% – 10% residuos secos de jardinera. Rotación: Composta 1 (T ₁): 3 giros cada 8 horas.	Humedad 63%	C1: Humedad 42%	C1: Humedad 33.3%(↓)
			C2: Humedad 47%	C2: Humedad 25.3%(↓)
			C3: Humedad 48%	C3: Humedad, 23.8%(↓)
		NTK 15,000 mg/kg,	C1: NTK 18,000 mg/kg,	C1: NTK 16.6%(↑)
			C2: NTK 21,000 mg/kg	C2: NTK 28.5%(↑)
			C3: NTK 23,000 mg/kg	C3: NTK 34.7 %(↑)
		COT 310,000 mg/kg	C1: COT 275,000 mg/kg	C1: COT 11.29%(↓)
			C2: COT 263,000 mg/kg	C2: COT 15.1%(↓)
			C3: COT 230,000 mg/kg	C3: COT 28.5%(↓)
		C/N 20	C1: C/N 15	C1: C/N 25%(↓)
			C2: C/N 12	C2: C/N 40%(↓)
			C3: C/N 10	C3: C/N 50%(↓)
	pH 7.7	C1: pH 7.8	C1: pH 1.2%(↑)	
		C2: pH 8	C2: pH 3.75%(↑)	
		C3 pH 7.7	C3: pH ≡	
	Composta 2 (T ₂): 3 giros cada 16 horas.	P 25,000 mg/kg	C1: P 27,000 mg/kg	C1: P(↑) 7.4%
			C2: P 35,000 mg/kg	C2: P 28.5%(↑)
			C3: P 38,000 mg/kg	C3: P 34.2%(↑)
	Composta 3 (T ₃): 3 giros cada 24 horas. (7 días de compostaje)	Coliformes fecales 7.5 x 10 ⁵ NMP/g	C1: Coliformes fecales 1.5 x 10 ³	C1: Coliformes fecales (↓)
			C2: Coliformes fecales 4.3 x 10 ²	C2: Coliformes fecales (↓)
			C3: Coliformes fecales 1.5 x 10 ² NMP/g	C3: Coliformes fecales (↓)

Fuente: Elaboración propia, con base en los datos de Alí., *et al.* (2013); Kalamhdhad y Singht (2013); Rodriguez., *et al.*, (2012); Kalamhdhad., *et al.* (2009).

Ali., *et al.*, (2013), realizaron el compostaje en tambor dando 5 giros cada 24 horas, con base en los contenidos de COT se observó que las bacterias la mezcla, presentando condiciones termófilas, higienizando la composta, indicada en los contenidos de coliformes fecales, tabla 1.3.

Kalamdhad y Singh (2013) llevaron a cabo el compostaje de lodos residuales en un tambor rotatorio de 550 L, mostrando una alta degradabilidad de la mezcla reflejado en el consumo de COT realizado durante el proceso, tabla 1.3, en esta investigación se extrajeron los lixiviados, por lo que la composta presentó variaciones en su volumen, generando que las concentraciones de metales pesados se incrementaran.

Rodríguez., *et al.*, (2012), realizaron el compostaje en un tambor rotatorio de 550 L, observando que la fase termófila empezó 12 horas después de haber realizado la mezcla y, después de dos semanas ya se contaba con un producto que cumplía, con excepción de la humedad, con lo establecido por la Ley de España RD-824/2005 (B.O.E. 171, 2005) que regula el uso de las compostas como fertilizantes, en todos los parámetros. Por lo que llevaron a cabo una maduración en pilas estáticas durante 6 semanas, después de las cuales se cumplió con la norma en todos los parámetros, alcanzando una disminución en el tiempo estimado de compostaje en 4 semanas, respecto al que se estableció como promedio con el método de pilas estáticas (12 semanas).

En 2009 Kalamdhad., *et al.*, realizaron el compostaje de lodos residuales en tambor rotatorio, en un prototipo de 3.5m³ de capacidad, llevando a cabo la rotación 3 giros cada (T₁) 8, (T₂) 16 y (T₃) 24 horas. De acuerdo con los resultados reportados en la tabla 1.3 se observó que la composta T₃ presentó una estabilización más adecuada de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos analizados, al encontrar las características ideales para la aireación, liberación de gases, y homogeneización de la composta con un intervalo entre rotación de 24 horas. En la composta T₃, la aplicación de la técnica del tambor rotatorio se vio reflejada en una disminución de 3 semanas en el tiempo estimado para el compostaje en pilas estáticas (12 semanas).

De acuerdo con lo reportado en los casos citados, se observa que en las investigaciones de Kalamdhad., *et al.* (2009), y Rodríguez., *et al.* (2012), presentaron las condiciones más apropiadas para la estabilización fisicoquímica y microbiológica de los lodos residuales, al obtener las características buscadas después de 1 y 2 semanas de compostaje, respectivamente, aunque posteriormente el producto fue colocado en pilas durante 20 días, en ambos casos, para lograr su mineralización y obtener el máximo rendimiento posible. Los resultados reportados en la tabla 1,3 también mostraron, de acuerdo con Kalamdhad., *et al.* (2009), que el rango más apropiado para la rotación del tambor es de tres vueltas cada 24 horas, por lo que fue adaptado por Kalamdhad y Singht (2013), y Rodríguez., *et al.* (2012).

1.4.-Análisis estadístico de datos

Las variaciones que se registran durante el compostaje deben ser evaluadas a partir de un análisis estadístico, para establecer una jerarquización de las variables involucradas en el proceso, los más usados son el Coeficiente de Correlación de Pearson, Coeficiente de Determinación R^2 y ANOVA (García., 2015; Caballero., 2014; Peña., 2014; Kalamdhad y Singht 2013).

A) Coeficiente de Correlación de Pearson de Determinación R^2

En la investigación de Caballero (2014), los parámetros analizados durante el compostaje, fueron evaluados con el Índice de Germinación (IG), indicador de la calidad en la composta, por medio del Análisis de Correlación de Pearson, y el Análisis del Coeficiente de Determinación R^2 , para determinar la representatividad de las variaciones ocurridas durante el compostaje.

El Coeficiente de Correlación de Pearson se usa para establecer el tipo de relación entre los factores que se evalúan durante el compostaje, el tipo de relaciones son:

- Inversa, cuando la disminución en los contenidos del parámetro evaluado beneficia el incremento del IG, por lo que la correlación observada se presentó en números negativos.
- Directa, cuando el incremento en los contenidos del factor evaluado benefició el incremento del IG, este tipo de correlación se presentó en números positivos

El coeficiente de determinación R^2 se usa para establecer que tan significativa es la correlación de los parámetros evaluados respecto al IG, representando una relación más fuerte cuanto más cercano se ubica a 1 (correlación perfecta), de 0.9 a 0.99, correlación muy fuerte, de 0.7 a 0.89, correlación fuerte, de 0.4 a 0.69 correlación moderada, de 0.39 a 0.2, correlación débil y de 0 a 0.19, correlación muy débil (Martínez., *et al.*, 2013).

C) Análisis de varianza ANOVA

Para establecer la representatividad de los cambios que se presentan durante el compostaje en los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos evaluados, los resultados son analizados con el análisis de varianza, ANOVA, el cual establece que cuando la F calculada es mayor que la F crítica, la diferencia que existe entre los valores analizados es estadísticamente significativa, esto representa un impacto en la calidad del producto obtenido (Martínez., *et al.*, 2013).

2.- Justificación contextual y científica

2.1.- Justificación contextual

A nivel mundial se ha propiciado la sobreexplotación del recurso hídrico, debido a la alta demanda de servicios sanitarios por parte de la población, produciendo diariamente 2 millones de toneladas de aguas residuales a nivel mundial (FAO, 2011); de las cuales solo se trata el 35%, siendo, las lagunas facultativas y los lodos activados las principales técnicas de tratamiento (CONAGUA, 2015). En México estas técnicas representan 70.4% del caudal tratado.

El principal residuo generado, en el tratamiento de aguas son los lodos residuales. De acuerdo con las estimaciones realizadas por la SEMARNAT (2008), durante los primeros 7 años del siglo XXI, en México se generaron en promedio 38.9 toneladas de lodos residuales anuales, que contrastan con las 19 toneladas generadas anualmente durante la década de los noventa (SEMARNAT, 2008). Los lodos residuales son considerados como residuos peligrosos, debido a los contaminantes fisicoquímicos y microbiológicos que se puede encontrar en su composición (DOF, 2002); por lo tanto, requieren de un tratamiento de estabilización previo a su disposición final, el cual debe ser eficiente y barato, tomando en cuenta que la producción de lodos residuales se incrementa drásticamente cada año, de la mano con el incremento de la población.

Entre las técnicas empleadas para la disposición de los lodos se puede encontrar coagulación, confinamiento e incineración, sin embargo estas técnicas no aseguran la estabilización final de los lodos, además sus costos de implementación son muy altos, por lo que el compostaje de lodos ha crecido durante los últimos años, al ser una técnica económica y sustentable para la estabilizar los lodos residuales, que facilita su revalorización, beneficiando económicamente a los generadores, y minimizando el impacto ambiental y social derivado de la producción y disposición de los fangos.

Los lodos usados en esta investigación fueron obtenidos de la PTAR de “Galerías Metepec”, donde se purgan aproximadamente 30 litros cada tres meses, considerando una humedad de 80% (García., 2015), de acuerdo con la normatividad se establece que los lodos que no reciben una estabilización en el proceso que fueron generados deben ser conferidos a un tercero al que se le paga para que realice su disposición final, ya sea por confinamiento o incineración, tal como sucede en el centro comercial, sin embargo, ante la necesidad de minimizar costos, en las investigaciones de García (2015); Caballero (2014); y Peña (2014) se ah implementado el compostaje como una alternativa para la estabilización fisicoquímica y microbiológica de los fangos, mostrando que con esta técnica es posible obtener un producto que cumpla con normatividad correspondiente a biosolidos y

mejoradores de suelos en un lapso de 60 días, con lo cual se podría llevar a cabo revalorización, sin embargo, para eficientar el tiempo empleado en el proceso, en esta tesis se propuso usar el tambor rotatorio, que ha demostrado una reducción del periodo empleado para la degradación biológica de las mezclas realizadas con lodos como sustrato principal (Rodríguez., *et al.*, 2012; Kalamdhad., *et al.*, 2009)

El compostaje es una alternativa sustentable para la revalorización de los lodos, pues beneficia su reintegración dentro del mismo proceso que los originó, presentando como única dificultad la disponibilidad del sustrato usado como material de enmienda, que en esta investigación, fue pasto fresco, el cual no representaría problemas para obtención, pues estas gramíneas se encuentra en altas concentraciones dentro de las jardineras del centro comercial, y su poda se realiza semanalmente (García., 2015).

La mezcla se realizó empleando los mismos sustratos, y siguiendo la metodología de García (2015), para comparar los resultados empleando técnicas de compostaje diferentes, tomando en cuenta que se buscaba minimizar el tiempo y espacio usados para el compostaje.

2.2.- Justificación científica

Debido a la alta producción de lodos residuales que se ha presentado durante los últimos años, y como resultado de la necesidad por obtener la estabilización de sus contenidos fisicoquímicos y microbiológicos en un menor tiempo, las nuevas tendencias para su tratamiento han llevado a la aplicación del compostaje como la alternativa más usada (Martínez., *et al.*, 2013). La técnica de compostaje más empleada ha sido la de “pilas estáticas”, gracias a su bajo costo de implementación, en un periodo de 90 días (Álvarez, 2009); sin embargo, debido a la necesidad de obtener la estabilización fisicoquímica y microbiológica de los lodos en un periodo corto, los investigadores han innovado, encontrando los mejores resultados en el tambor rotatorio, que ha asegurado la estabilización, con una reducción de entre 3 y 4 semanas del tiempo estimado para el compostaje que se establece como media para las pilas estáticas (90 días; Rodríguez., *et al.*, 2013; Kalamdhad., *et al.*, 2009).

La disminución en los tiempos de compostaje se ha visto beneficiada con la aplicación de la técnica tambor rotatorio, pues durante el compostaje facilita el volteo de la mezcla, su homogeneización, aireación y la liberación de gases, así como la conservación de la humedad y temperatura, de acuerdo con lo observado por Kalamdhad y Kumar (2014); Ali., *et al.* (2013); Rodríguez., *et al.* (2012); Kalamdhad., *et al.* (2009) y Kalamdhad y Kazmi (2009).

Esta investigación representa una comparación respecto a la de García (2015), por lo que tanto los sustratos como la metodología se reprodujeron de este investigador. Con la aplicación del tambor rotatorio, se buscó implementar una alternativa que representara una mejora en los tiempos y el espacio usado para el compostaje (Rodríguez., *et al.*, 2013; Kalamdhad., *et al.*, 2009). La aplicación del compostaje se centra en la necesidad de aportar una solución eficiente y sustentable para la revalorización de los lodos residuales generados en la PTAR del centro comercial “Galerías Metepec”, analizados anteriormente por Caballero (2014) y Peña (2014).

3.- Hipótesis y Objetivos

3.1.- Hipótesis

La aplicación del tambor rotatorio durante el compostaje optimizara la estabilización fisicoquímica y microbiológica de la composta, con lo que los parámetros analizados mejoraran, y el tiempo usado para el compostaje disminuirá en comparación con la técnica de las pilas estáticas, facilitando la revalorización de los lodos residuales, evaluada a través del IG.

3.2 Objetivos

3.2.1.- Objetivo General

Obtener una composta en tambor rotatorio, partiendo de lodos residuales de la PTAR del centro comercial “Galerías Metepec” y pasto, que cumpla con la normatividad, beneficiando de esta manera su revalorización como mejorador de suelos y disminuyendo los tiempos del proceso, en comparación con la obtenida en pilas estáticas.

3.2.2.- Objetivos Específicos

- Obtener una composta en tambor a partir de lodos y pasto, que presente mejores características que las observadas en las pilas estáticas, por medio de la conservación de la temperatura y la rotación de la mezcla, con lo que disminuirá el tiempo empleado para el proceso.
- Diseñar y construir un tambor rotatorio, basado en la literatura, para cumplir con los requerimientos necesarios para realizar el compostaje de las materias primas utilizadas (lodos-pasto).
- Elaborar, monitorear y caracterizar la composta con lodos residuales de la PTAR del centro comercial “Galerías Metepec” y pasto, en el tambor rotatorio.
- Evaluar, mediante el análisis en laboratorio y pruebas del índice de germinación la estabilización fisicoquímica y microbiológica de la composta final.
- Evaluar la eficiencia del tambor rotatorio con base en el cumplimiento de la normatividad aplicable NOM-004-SEMARNAT-2002 (DOF, 2002).
- Comparar los resultados obtenidos en el tambor, respecto a los de pilas estáticas de García-Mejía (2014), y establecer el efecto del tipo de reactor sobre la mezcla compostada, por medio del análisis de dos variables ANOVA.

4.- Metodología

A continuación se muestra un diagrama de flujo, en el que se presenta la metodología seguida para esta investigación (Figura 4.1):

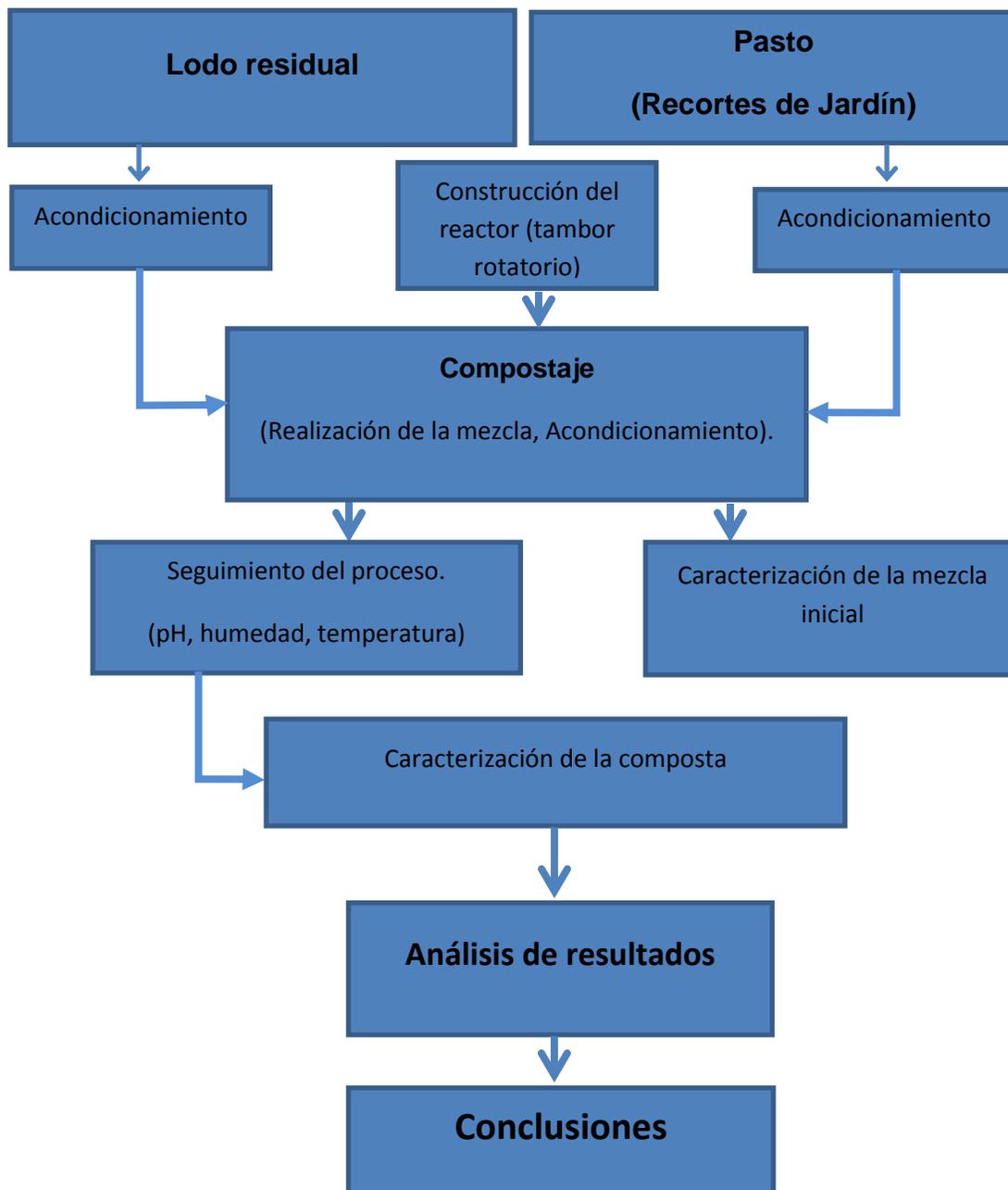


Figura 4.1 Metodología

4.1.- Colecta y acondicionamiento de sustratos

Los sustratos que se usaron para realizar el compostaje en esta investigación (pasto – lodos) fueron obtenidos en las instalaciones del centro comercial “Galerías Metepec”, ubicado en la Vialidad Toluca - Metepec No.126 Norte.

A) Lodos.

La PTAR de “Galerías Metepec”, opera en un modo semicontinuo o “Batch”, la planta trata aguas provenientes de descargas sanitarias, limpieza de alimentos en restaurantes, mantenimiento y aseo de la plaza (García, 2015; Caballero, 2014; Peña, 2014).

Los lodos usados en esta investigación fueron extraídos directamente de los reactores y colocados en un filtro prensa por 20 minutos sin adición de químicos, para deshidratarlos hasta 80%. Posteriormente los lodos fueron colocados en una charola de metal donde permanecieron por 3 horas más antes de realizar la enmienda con el sustrato pasto, cumpliendo con lo establecido por la NOM-004-SEMARNAT-2002 (DOF, 2002) y evitando la deshidratación excesiva, que dificultaría la homogeneización de la mezcla.

B) Recortes de jardín.

El sustrato pasto, se obtuvo directo de la poda de jardineras, que se realizó con una podadora etilo tractor, con tamaño de partícula demasiado grande, para su degradación durante el compostaje, así que fue trozado con los dedos, facilitando la homogenización en la mezcla. Posterior a este acondicionamiento, el pasto se inoculo en una bolsa de plástico negro, con un tiempo de retención de 24 horas, hasta la preparación de la mezcla.

4.2.- Construcción del tambor rotatorio

Previo a la construcción del tambor rotatorio se realizó una etapa de selección de materiales, con la finalidad de elegir los más aptos para el proceso, un contenedor de plástico de 60 L, barras, ángulos y tubos de hierro. Una vez adquiridos los materiales se elaboró el reactor con el apoyo técnico de los trabajadores del Taller de Modelos Hidráulicos del Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA), basándolo en el modelo propuesto por Kalamdhad y Kumar (2013); Fernández., *et al.*, (2010); y Kalamdhad y Kazmi (2009), que se observa en la tabla 4.1.

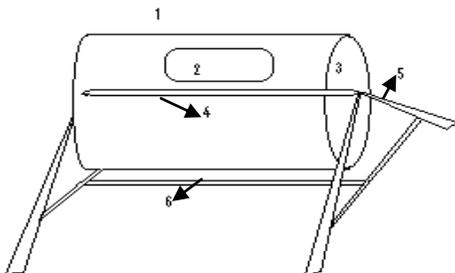
En el modelo mostrado en la tabla 4.1 se indican las partes del reactor que se elaboró para esta tesis, el tambor rotatorio identificado con el número 1, fue fabricado con el contenedor de plástico de características ya mencionadas, pintado de color negro, para evitar que parte de la temperatura se disipara al ambiente, además se hizo la adecuación de cerrar el extremo donde se ubica la tapa con

un círculo de conglomerado de madera, número 2 en la tabla, que fue asegurado con remaches de hierro de 2 pulgadas, posteriormente se acondicionó el tambor con un corte de 20 x 25 cm, donde se colocó una puerta de plástico transparente, número 3 en la tabla, que fue fijada con bisagras, tornillos y un pasador de hierro, durante el proceso se usó para la entrada, salida y monitoreo de la composta.

En el centro de las dos caras planas del barril se colocaron resistencias de madera de 15cm x 15cm en las que se realizó una perforación de 1 cm de diámetro, dentro de la cual se colocó un tubo de hierro, que funcionó como eje rotatorio, número 4 en la tabla. La base del tambor fue construida en dos fases, la primera constó de dos pares de patas elaboradas con hierro tipo ángulo, que fueron unidas en la parte superior, colocando un perno que se insertó dentro del eje de rotación del tambor, número 5 en la tabla, para complementar la estructura, se colocaron 3 barras de hierro unidas en forma de H, número 6 en la tabla, soldadas a las patas para evitar que la estructura perdiera balance o se destruyera durante la rotación.

Una vez terminado el tambor, se realizaron pruebas de función y resistencia, con equivalentes al peso que debía soportar, primero acondicionando la manija para asegurar que rotara y luego agregando 20 kg de sobantes de construcción, verificando que mantuviera la integridad estructural y que cumpliera con las funciones para las que fue diseñado.

Tabla 4.1 Partes del tambor rotatorio

Esquema del tambor rotatorio			
Número	Nombre	Características	Imagen
1	Contenedor	Contenedor de plástico de 60 litros de capacidad, pintado de negro. Ubicado a 31 cm del suelo.	
2	Puerta de entrada, Salida y monitoreo	Apertura a la mitad del cilindro de 20cm x 25cm, cubierta con una tapa de plástico transparente.	
3	Tapa del cilindro	Radio de 25 cm, cubierta con un círculo de triplay para darle soporte al contenedor, en su centro se realizó una perforación para colocar el eje sobre el que giró el tambor.	
4	Eje rotatorio	Tubo de 73 cm de largo, que sirvió para girar el contenedor, se ubicó en el centro del bote y dentro de él se colocaron dos pernos para montarlo sobre el soporte metálico, lo que facilitó la rotación total del tambor, para beneficiar la homogeneización y el volteo de la mezcla composteada. Se ubicó a 60 cm del suelo.	
5	Patatas del tambor rotatorio	Realizadas con una barra de metal tipo ángulo, cada una de 70 cm, cruzadas en par a 60 cm del suelo.	
6	Soporte o base	Barras cruzadas en forma de H, ubicadas a 28 cm del suelo y soldadas a las patas del barril para conformar un soporte.	

Fuente: Elaboración propia, 2016.

4.3.- Elaboración de la mezcla

Dando continuidad al trabajo de García (2015) se retomaron las proporciones empleadas para la elaboración de la mezcla de 65% lodos y 35% pasto, con un volumen de 10 kg en peso seco (p.s.) adecuados de la investigación de Caballero (2014), al mostrar las condiciones más apropiadas para la conservación de la temperatura, la homogenización y aeración del producto, el compostaje se realizó para comparar los resultados obtenidos para la estabilización de un mismo sustrato, con la variación de la técnica empleada (tambor – pila).

Para la elaboración de la mezcla fue necesario contar con equipo de protección personal (EPP), para salvaguardar la salud del investigador, utilizando guantes de látex, cubrebocas y gafas de protección. El material usado consistió en un vaso de precipitado de 1 L, con el que se midió y colocó 32.5 L de lodos dentro del tambor, y una balanza analógica en la que se pesaron 5.7 kg de pasto, que fueron agregados en proporción de 1 kg y se homogenizaron dando 50 rotaciones de 365° al tambor. Las proporciones de sustratos usadas en esta tesis se calcularon con la siguiente fórmula:

$$\frac{1 \text{ kg}}{\text{Humedad por kg}} = \frac{(\text{Porcentaje del sustrato en la mezcla}) \times (1000)}{\text{Kilogramos de los sustratos en base húmeda}}$$

El llenado del tambor se calculó en $\frac{3}{4}$ partes de su capacidad total, para beneficiar la aireación y movilización de la mezcla (Kalamdhad y Kumar, 2009; Kalamdhad y Kazmi, 2009; y Kalamdhad., *et al.*, 2009); y se cubrió con un plástico de color negro, con la finalidad de inocular el interior del reactor, que fue colocado en un ambiente seco y alejado de las condiciones climáticas, dentro de la PTAR.

4.4.- Transporte y almacenamiento de muestras para su análisis en laboratorio

Para realizar la toma de muestras se contemplaron las medidas de EPP que se estiman en la NOM-004-SEMARNAT-2002, además, con base en esta se adquirieron abatelenguas, gasas esterilizadas y frascos de cristal con rosca que fueron esterilizados durante 30 minutos en autoclave (DOF, 2002), en esta investigación se empleó la técnica del cuarteo, que consistió en colocar 4 muestras de 500 g obtenidas de diferentes zonas del reactor, y colocarlas sobre una lona, posteriormente homogeneizarlas con un abatelenguas y eliminar 2 pilotos, nuevamente se mezclaron y se obtuvo únicamente una muestra de 250 g, que fue almacenada dentro del recipiente y cubierta con un plástico negro, para ser trasladada inmediatamente al laboratorio de Calidad de agua en CIRA, donde fue colocada en refrigeración a 4 °C, siguiendo en todo momento lo establecido por la norma (DOF, 2002).

El muestreo se realizó cada 7 días, analizando los parámetros pH, conductividad eléctrica y humedad, el resto de los parámetros fueron analizados a principio y final de cada una de las etapas de las que constó el proceso.

4.5.- Caracterización

El análisis en laboratorio de las características fisicoquímicas y microbiológicas de la mezcla se realizó siguiendo los procedimientos establecidos por la normatividad, que tanto en esta investigación, como en la de García (2015) se adaptaron de los empleados por Caballero (2014) y Peña (2014), tabla 4.2.

Tabla 4.2 Parámetros analizados y métodos usados para la caracterización.

PARÁMETROS	MÉTODO
Humedad	Evaporación, NMX-AA-016-1984 (DOF, 1984).
Nitrógeno Kjeldahl (NTK)	NMX-AA-026-SCFI-2001 (DOF, 2001).
pH	Potenciometro. NOM-004-SEMARNAT-2002 (DOF, 2002).
Conductividad eléctrica	Evaluada con Potenciometro NOM-004-SEMARNAT-2002 (DOF, 2002).
Carbono Orgánico Total (COT)	COT (Método de combustión directa). NOM-004-SEMARNAT-2002 (DOF, 2002).
Relación C/N	(COT / NTK). NTEA-006-SMA-RS-2006 (GGEM, 2006)
Fósforo Olsen	NOM-021-RECNAT-2000 (DOF, 2000).
METALES	
Cu, Ni, Pb, Zn, y K	Absorción atómica NTEA-006-SMA-RS-2006 (GGEM, 2006)
MICROBIOLÓGICOS	
Coliformes fecales	Técnica del Número más probable NOM-004-SEMARNAT-2002(DOF, 2002).
<i>Salmonella</i>	Técnica del Número más probable NOM-004-SEMARNAT-2002 (DOF, 2002).
Huevos de helmintos	Técnica del Número más probable NOM-004-SEMARNAT-2002 (DOF, 2002).
FITOTOXICIDAD	
índice de germinación (IG)	Varnero., <i>et al.</i> , (2007); Lazaridi., <i>et al.</i> , (2006); Zucconi., <i>et al.</i> , (1981)

Elaboración propia basada en la metodología de García (2015), Caballero (2014) y Peña (2014)

4.5.1.- Fitotoxicidad.

Para observar el comportamiento de los parámetros analizados durante el compostaje y evaluar el efecto generado por la presencia las sustancias fitotoxicas (sales, Amoniaco) durante las diferentes fases del proceso se evaluó el índice de germinación, que además sirvió como un indicador del potencial agronómico de la composta.

El IG está basado en la germinación, que es el proceso en el que una semilla presenta la reactivación de su metabolismo, con lo cual inicia el crecimiento de una planta (Sinha., *et al.*, 2010); este índice es ampliamente analizado en ensayos ecotoxicológicos, para determinar la presencia de contaminantes por medio de la sensibilidad de las semillas (García 2015; Caballero 2014, Peña 2014; Varnero., *et al.* 2007; Lazaridi., *et al.*, 2006; Zucconi., *et al.* 1981). En esa investigación se analizó “*in placa*”, para semillas de *Raphanus sativus* (rábano) y *Lactuca sativa* (lechuga), tomando como base el procedimiento realizado por Varnero., *et al.*, (2007) y se evaluaron los resultados con base en lo propuesto por Zucconi., *et al.*, (1981), un IG menor a 50% mostró una alta presencia de sustancias fitotóxicas, 50% – 80% moderada presencia y un IG mayor a 80% muestra una presencia muy baja o nula.

Los resultados reportados para el IG (ecuación 3) se obtuvieron evaluando el porcentaje de germinación relativo (PGR) (formula 2) y el crecimiento de retícula relativo (CRR) (fórmula 1; Varnero., *et al.*, 2007; Tiquia., 2000). Las formulas usadas para evaluar el IG en esta investigación fueron las siguientes:

$$(1) \quad PGR = \frac{\text{No de semillas germinadas en el extracto}}{\text{No de semillas germinadas en el testigo}} \times 100$$

$$(2) \quad CRR = \frac{\text{Elogación de retículas en el extracto}}{\text{Elogación de retículas en el testigo}} \times 100$$

$$(3) \quad IG = \frac{PGR \times CRR}{100}$$

4.5.2 Macronutrientes

Los contenidos de N fueron analizados por medio de la técnica del Nitrógeno Total Kjeldhal (tabla 4.2), que se divide en tres pasos (DOF, 2002):

- Digestión: La descomposición del nitrógeno orgánico en la muestra se logra empleando una solución ácida. El resultado final es una disolución de sulfato de amonio.
- Destilación: Es la adición de un exceso de álcali a la mezcla ácida de digestión para convertir el NH_4^+ en NH_3 seguido por la ebullición y condensación del NH_3 gas.

- **Cuantificación:** La cantidad de nitrógeno en la muestra puede ser calculada de la cantidad de iones amoniacos (amonio) en la disolución de concentración conocida de ácido bórico. La fórmula usada para calcular los contenidos de N fue la siguiente:

$$NTK (mg/kg) = \frac{(T - B) \times 1.4}{S} \times 1000$$

Donde:

T: Ácido bórico usado en la titulación de la muestra (mL).

B: Promedio ácido bórico usado en la titulación de las alícuotas (mL).

S: Peso de la muestra (g).

1000: Factor de conversión.

Los contenidos de COT se analizaron con la técnica de combustión directa (tabla 4.2). Esta técnica consiste en la incineración de la porción orgánica presente en una muestra de .001 g del material que se va a analizar, se obtiene el porcentaje y la concentración correspondiente a este nutriente. La fórmula con la que se calculó el COT durante el compostaje fue la siguiente:

$$COT (mg/kg) = C \times 100000$$

Donde:

C: Promedio obtenido en la muestra y sus duplicados analizados en el COT (equipo) en g/kg.

100000: Factor de conversión, tomando en cuenta que la muestra fue analizada en 0.001 g.

La relación C/N, es un balance de nutrientes, que muestra las unidades de Carbono presentes en la composta, en relación con las unidades de Nitrógeno. La fórmula usada para calcular la relación C/N fue la siguiente:

$$C/N = \frac{COT}{NTK}$$

Donde:

C/N: Relación Carbono – Nitrógeno.

COT: Carbono Orgánico Total calculado (mg/kg).

NTK: Nitrógeno Total Kjeldhal calculado (mg/kg).

Los contenidos de P fueron analizados con la técnica del Fósforo Olsen. Este método, es ampliamente utilizado en estudios de fertilidad de suelos para su determinación en la forma disponible en suelos.

El fósforo determinado con este procedimiento ha mostrado una estrecha relación con la respuesta de los cultivos. La solución extractora de P consiste de una combinación de HCl y NH⁴F la cual remueve formas de P ácido solubles como fosfato de calcio y una porción de fosfatos de aluminio y hierro. El NH⁴F disuelve los fosfatos de aluminio y de hierro al formar un ion complejo con estos iones metálicos en solución ácida (DOF, 2002). La fórmula usada para calcular los contenidos de P fue la siguiente:

$$P \text{ (mg/kg)} = CC \times \frac{Vf}{A} \times \frac{Vi}{p} \times 1000$$

Donde:

CC: mg/L⁻¹ de P en la solución, obtenido del espectrofotómetro.

Vf: Volumen final de la solución (mL).

A: Alícuota del extracto (mL).

Vi: Volumen de la solución usada para hacer el extracto (mL).

p: Peso de la muestra (g).

1000: factor de conversión.

La técnica usada para el análisis de K fue la de absorción atómica, la misma que se usó para el análisis de los metales pesados. Cuando los contenidos de Potasio son muy altos para medirlos en el digestor, > 1.5 mg/L, se requiere de realizar diluciones, ubicándolos dentro del rango medible, por lo que para determinar los contenidos de K por medio de la fórmula es necesario establecer el rango de dilución. Los contenidos de K se obtuvieron con la siguiente fórmula:

$$K \text{ (mg/kg)} = \frac{V * S}{m * 1000} \times (D)$$

Donde:

K: Contenido de Potasio en mg/kg.

V: Valor registrado en el digestor (mg/L⁻¹).

S: Volumen de la solución usada (mL).

m: Peso de la muestra seca (g).

D: Valor correspondiente a las diluciones realizadas a la alícuota inicial.

1000: Factor de conversión.

4.5.3.- Metales pesados

Los contenidos de metales pesados se analizaron con la técnica de la absorción atómica, se realiza en un digestor, en el cual se coloca una alícuota preparada con la mezcla y agua destilada, que es absorbida en el equipo, para posteriormente dispersar una niebla con ella, en la cual las concentraciones de metales son identificadas por colorimetría, por medio de una lámpara sin electrodo específica para cada metal evaluado (Zn, Ni, Pb, Cu). La fórmula usada para medir las concentraciones de metales pesados fue la siguiente:

$$M \text{ (mg/kg)} = \frac{V * S}{m} * 1000$$

Donde:

M: contenidos de metales pesados en mg/kg.

V: Valor registrado en el digestor (mg/L⁻¹).

S: Volumen de la solución usada (mL)

m: Peso de la muestra seca (g).

1000: Factor de conversión.

4.5.4.- Microbiológicos

Los contenidos de coliformes fecales, huevos de helmintos y *Salmonella ssp* se determinaron con la técnica del número más probable por gramo de la muestra (NMP/g), siguiendo lo establecido en la NOM-004-SEMARNAT-2002 (DOF, 2002). El análisis microbiológico se realizó durante las diferentes etapas del compostaje para conocer los contenidos de patógenos, y evaluar su eliminación. Los contenidos de *Salmonella ssp* y huevos de helminto se analizaron en las instalaciones del laboratorio de bacteriología del CIESA (Anexo 1), y los coliformes fecales en el Laboratorio de Calidad del Agua del CIRA, área de microbiología.

4.6.- Seguimiento del proceso

Durante el proceso de compostaje en el tambor se analizaron diariamente los parámetros humedad, pH, y temperatura, siguiendo lo establecido por la norma correspondiente o propuesta por la literatura, en el caso de humedad.

- La temperatura se tomó en dos momentos, posterior a 24 horas de reposo y subsecuente al giro, llevando el registro con un termómetro de mercurio de rango -20 °C – 100 °C (resolución 1 °C).
- El pH fue monitoreado con tiras reactivas y potenciómetro, realizando un extracto de la muestra, con 10 g de composta y se saturó con agua, en un matraz de 50 ml, posteriormente se agitó hasta lograr la homogenización y se filtró al vacío, colocando según fuera el caso la tira o el electrodo en el interior del extracto obtenido, para realizar la lectura de acuerdo con lo establecido en la NOM-004-SEMARNAT-2002 (DOF, 2002), El potenciómetro con electrodo para conductividad permitió eficientar los análisis en laboratorio.
- La humedad para el monitoreo *in situ* se usó la técnica del puño, propuesta por Ravera y De Sanso (2003), que consistió en tomar una muestra de la mezcla composteada con la mano y presionarla. Para confirmar que la humedad es la correcta (45-70% Cooperband, 2007) debe quedar una delgada película de agua en la palma y los materiales deben permanecer unidos, para realizar esta técnica fue necesario el uso de guantes.

La humedad en el laboratorio fue analizada con la técnica de evaporación en estufa cada 15 días durante el compostaje, para observar de manera más exacta el contenido de agua en la composta.

4.8.- Análisis estadístico de resultados.

El análisis de los resultados registrados en esta investigación se realizó siguiendo la metodología empleada en la investigación de Caballero (2014) para Coeficiente de Correlación de Pearson y Coeficiente de Determinación R^2 , comparando las variaciones que registraron los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos evaluados durante el compostaje, respecto al IG.

El análisis ANOVA se evaluó de acuerdo con el procedimiento manejado en las investigaciones de García (2015); Caballero (2014); y Peña (2015); para comparar las diferencias que existieron entre las variaciones en los contenidos de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, registradas en el tambor y en las pilas, además de las reportadas durante las diferentes fases del compostaje, en esta tesis.

5.- Resultados y discusión

5.1.- Caracterización de la mezcla.

Los parámetros NTK, CE y C/N, en la mezcla inicial, mostraron las mayores variaciones respecto a los reportados en la tesis de García (2015); en la tabla 5.1 se observa la caracterización de estos parámetros, comparando los resultados con los registrados para el compostaje en pilas estáticas.

Tabla 5.1 Caracterización NTK, COT, C/N, Humedad, pH, conductividad eléctrica.

Parámetro	Pilas	Tambor	Diferencia
	García (2015)	Mezcla inicial	
Nitrógeno Total Kjeldhal (mg/kg)	26,525	30,165± 800	12%(↑)
Carbono Total (mg/kg)	430,850	419,600 ± 10,300	2.6%(↑)
C/N	20	13.9	30%(↑)
Humedad (%)	65	65 ± 3.1	0%(≡)
pH	7.1	7.1 ± 0.3	0%(≡)
Conductividad eléctrica (µS/cm)	9040	7,414 ± 120	17%(↓)

Elaboración propia con base en los contenidos registrados en la mezcla inicial, 2016.

La C/N en la mezcla inicial fue menor en 30% respecto a la registrada por García (2015). Debido a que los contenidos de COT fueron del orden entre ambas investigaciones, con variación de 2.6%; se observó que el NTK, que presentó contenidos 12% superiores en esta tesis, alejó la C/N respecto a la reportada por García (2015). Los contenidos de NTK, también se vieron reflejados en la CE, pues este parámetro está ligado a la presencia de sales de Amonio, debido a las altas concentraciones de Urea, presentes en los lodos de la PTAR de “Galerías Metepec” (Peña 2014).

Las variaciones registradas para el NTK estuvieron ligadas al proceso de tratamiento, pues en la investigación de García (2015) los lodos procedían de una resiembra, mientras que en esta investigación los lodos se obtuvieron con 3 meses de diferencia, contando con el procedimiento estándar empleado en la PTAR. Tomando en cuenta los procesos de sucesión de las bacterias, los contenidos fisicoquímicos de los lodos presentaron variaciones, que se reflejaron en la mezcla inicial, de acuerdo con la tabla 5.1.

Los contenidos de humedad y el pH, fueron iguales a los reportados en la investigación de García (2015), pues los sustratos usados para el compostaje, se obtuvieron del mismo lugar, y sufrieron el mismo proceso de pre-tratamiento, anterior a la realización de la mezcla.

5.1.1.- Nutrientes: K y P en la mezcla inicial.

Los parámetros K y P mostraron altas concentraciones, cumpliendo con la norma. En la tabla 5.2 se observan los contenidos reportados para estos nutrientes en la mezcla inicial.

Tabla 5.2 P y K en la mezcla inicial.

Nutriente	Tambor	NTEA-006-SMA-RS-2006 (DOF, 2006)	Cumplimiento de la norma
	Mezcla inicial		
K (mg/kg)	12,420 ± 1200	Mayor a 250	✓
P (mg/kg)	15,700 ± 600	Mayor a 100	✓

Elaboración propia con base en los contenidos registrados en la mezcla inicial, 2016.

Los contenidos de K y P en la mezcla inicial se ubicaron muy por arriba del límite establecido por la norma para mejoradores de suelos (tabla 5.2; DOF, 2006); mostrando la presencia de MO sin estabilizar, la cual proveería alimento para la supervivencia microbiológica durante el compostaje, beneficiando de esta manera los procesos de mineralización.

Los contenidos de K y P en la mezcla se compararon con los registrados por Peña (2014) en una composta realizada con 75% lodos residuales de la PTAR de “Galerías Metepec” y 25% lirio acuático, mostrando contenidos para el P 12,639 mg/kg, que fueron 3,061 mg/kg menores que los reportados en esta investigación, mientras que los contenidos de K se ubicaron 3,206 mg/kg por arriba de los observados por Peña (2014; contenidos de 9,214 mg/kg).

5.1.2.- Metales pesados en la mezcla inicial

La concentración de metales pesados observados en la mezcla inicial se ubicaron dentro de lo establecido por la norma, tabla 5.3, esto evitó que el compostaje se viera afectado, pues debido a su naturaleza inorgánica, estos no suelen disminuir durante el compostaje, además, tampoco deben incrementarse de manera significativa, ya que la materia orgánica mineralizada dificulta su movilidad, por lo que en un proceso de compostaje eficiente, los contenidos de metales pesados deben mantenerse dentro del rango inicial (Lugo., *et al.*, 2015; Abdelrahamn y Al- Ajmi 1994; Kuo y Baker, 1980).

Tabla 5.3 Metales pesados en la mezcla inicial.

Metales (mg/kg)	Pilas	Tambor	Diferencia	Valores de referencia NOM-004-SEMARNAT-2002 (DOF, 2002) (Excelente)	Cumplimiento de la Norma
	García (2015)	Mezcla inicial			
Cu	137	132.2 ± 1.4	3.5%(↓)	1500	✓
Pb	47	56.4 ± 3	16.6%(↑)	300	✓
Zn	243	292.4 ± 2.3	16.8%(↑)	2800	✓
Ni	22	22 ± 0.5	0% (≡)	420	✓

Elaboración propia con base en los contenidos registrados en la mezcla inicial, 2016.

Las concentraciones de Cu y Ni en la mezcla fueron del orden de los reportados por García (2015), mientras que para Pb y Zn fueron mayores en 16.6% y 16.8% respectivamente, como estos dos elementos presentaron prácticamente el mismo incremento, se estableció que tuvieron el mismo origen, el desgaste de las tuberías, ya que el Zn es usado ampliamente en el galvanizado de metales y el Pb se usa en la fabricación de tuberías para cañería y soldaduras (Martínez., *et al.*, 2013). Este incremento en los contenidos de Zn y Pb pudo originarse semanas anteriores a la toma de la muestra de los lodos, pues en esos días se llevaron a cabo acciones de mantenimiento en la plaza y la PTAR, y se renovaron algunas tuberías dañadas, retirando soldaduras y aplicando nuevas. Debido a que los contenidos iniciales de metales pesados fueron muy bajos comparados con los límites exigidos por la norma, tabla 5.3, se esperaba que durante el compostaje no se presentaran dificultades correspondientes a este parámetro.

5.1.3.- Caracterización microbiológica de la mezcla inicial

La mezcla inicial lodos – pasto se comparó con los límites que establece la NOM-004-SEMARNAT-2002 para biosólidos (tabla 5,4; DOF, 2002), la cual es aplicable a esta investigación debido al uso de los lodos que fueron estabilizados a partir del para el compostaje. Los contenidos de helmintos, *Salmonella ssp* y coliformes fecales que se registraron en la mezcla inicial se muestran en la tabla 5.4.

Tabla 5.4 Determinación de contaminantes microbiológicos en la mezcla inicial.

Parámetro	Pilas	Tambor	NOM-004-SEMARNAT-2002, Biosólidos (DOF, 2002)			Cumplimiento de la norma
	García (2015)	Mezcla inicial	Clase A	Clase B	Clase C	
Coliformes fecales NMP/g	2.2x10 ⁶	3.4 x 10 ⁷	Menor de 1000	Menor de 1000	Menor de 2,000,000	✗
<i>Salmonella ssp</i> NMP/g	Negativo	Negativo	Menor de 3	Menor de 3	Menor de 300	✓
Huevos de helmintos NMP/g	1 huevecillo	1 huevecillo	Menor de 1	Menor de 1	Menor de 35	✓

Elaboración propia con base en los contenidos registrados en la mezcla inicial, 2016.

Los contenidos en la mezcla dieron negativo a *Salmonella ssp*, y 1 NMP/g para helmintos, de la misma manera que en el caso de García (2015), por lo que en este parámetro no se esperaba observar dificultades para el cumplimiento de la norma, ya que el tambor rotatorio beneficiaría la inoculación de la mezcla.

Los contenidos de coliformes fecales en la mezcla inicial se ubicaron por arriba de los observados por García (2015) en una unidad logarítmica (tabla 5.4), debido a las condiciones ambientales, pues los lodos usados para el compostaje en pilas fueron extraídos en enero de 2014, y la temperatura media en Metepec durante diciembre de 2013 y enero de 2014 fue de 18 °C, mientras que para esta investigación, la temperatura promedio durante abril de 2014 fue de 22.5 °C (INEGI, 2014); tomando en cuenta que los coliformes fecales encuentran características ideales para su desarrollo en el rango de 35 – 40 °C, se estimó que entre mayor es la temperatura ambiental, mayor será la concentración de coliformes fecales en los lodos. Los contenidos iniciales de coliformes fecales se ubicaron por arriba de los que establece la norma (en una unidad exponencial, tabla 5.4; NOM-004-SEMARNAT-2002; DOF, 2002), por lo cual se planteó que uno de los retos a vencer, con la aplicación del tambor rotatorio durante el compostaje, sería la disminución de los coliformes fecales y la eliminación total de los helmintos, lo cual contribuiría a que la composta final cumpliera con los límites establecidos por la norma para biosólidos de clase A (DOF, 2002) y se pudiera asignar una actividad para su reutilización.

5.1.4.-Índice de Germinación en la mezcla inicial

La evaluación del índice de germinación (IG), se usó para identificar la presencia de compuestos que pudieran condicionar negativamente el desarrollo vegetal (fitotóxicos), además, facilitó evaluar el

potencial agronómico de la composta. Los resultados en la mezcla inicial lodos – pasto se muestra en la tabla 5.5.

Tabla 5.5 IG de la mezcla inicial.

Índice de germinación	Pilas	Tambor	Diferencia	Varnero <i>et al.</i> (2007); Lazaridi <i>et al.</i> (2006); Zucconi <i>et al.</i> (1981).
	García (2015)	Mezcla inicial		
Lechuga	80%	64.4% ± 2.1	19.5%(↓)	80% - 100%, baja o nula fitotoxicidad; 50% - 80% moderadamente fitotóxica; Menor a 50% altamente fitotóxica.
Rábano	90%	93% ± 1.4	3.2%(↓)	

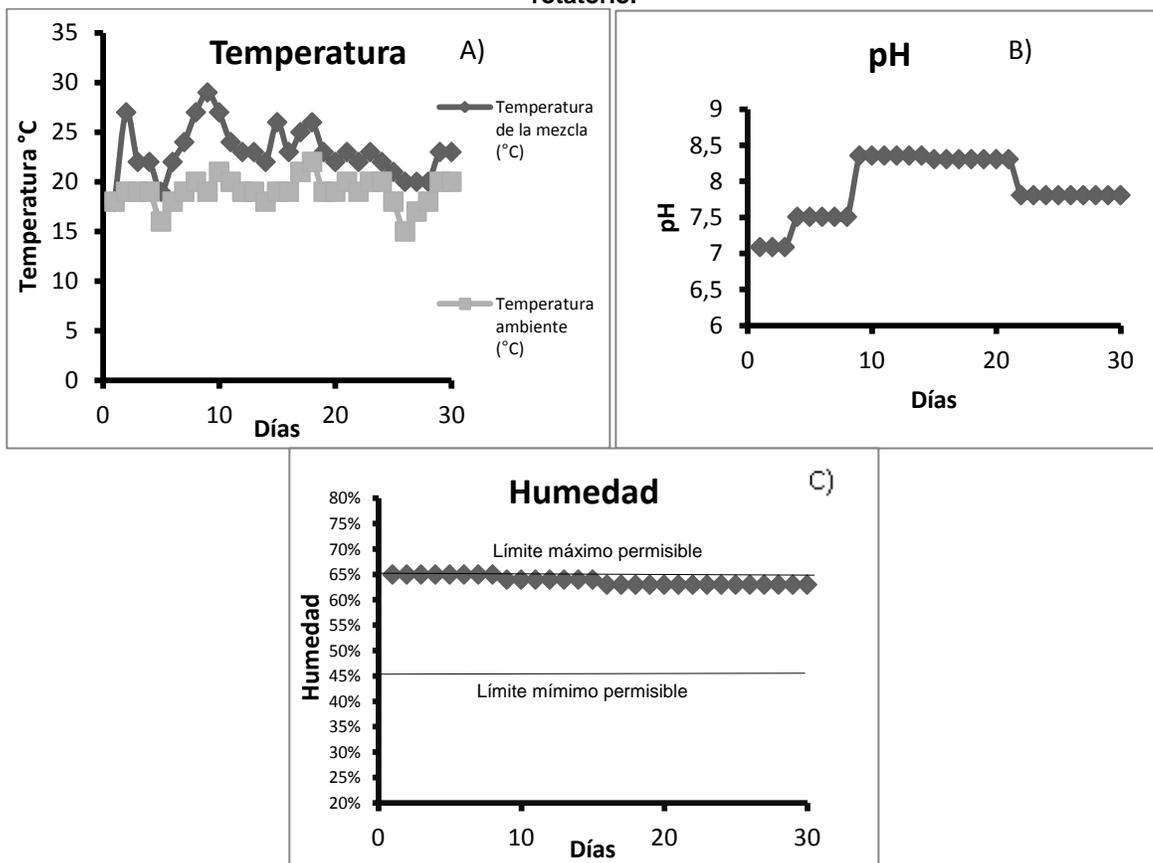
Elaboración propia con base en los contenidos registrados en la mezcla inicial, 2016.

El IG para la semilla de rábano se ubico del orden de la reportada por García (2015), sin embargo, en la semilla de lechuga se presentó una diferencia de 19.5%, ubicando a la mezcla realizada en esta tesis con una moderada presencia de sustancias fitotóxicas, de acuerdo con la clasificación propuesta por Zucconi., *et. al.* (1981), esto fue atribuido a la presencia de sales de amonio (NH_4^+) en altas concentraciones, pues los contenidos NTK fueron 12% mayores respecto a los reportados en las pilas estáticas, y la CE se ubicó en 7414 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mostrando una alta relación con los contenidos de este tipo de sales. Por lo tanto, otro reto a vencer durante el compostaje en el tambor rotatorio sería la disminución en los contenidos de sustancias fitotóxicas, lo cual se reflejaría en un incremento del potencial agronómico de la composta que se obtendría al finalizar el proceso.

5.2.- Monitoreo del compostaje en tambor rotatorio

El compostaje en el tambor rotatorio se llevo a cabo durante 30 días, empezando el 5 de mayo al 4 de junio de 2014. El comportamiento registrado diario, durante el proceso, en los parámetros: temperatura, pH y humedad, se muestra en la figura 5.1.

Figura 5.1 Evolución de los parámetros: A) temperatura, B) pH, y C) humedad, durante el compostaje en el tambor rotatorio.



Elaboración propia con base en los contenidos registrados en esta investigación, 2016.

De acuerdo con la figura 5.1 A, las temperaturas más altas se reportaron entre los días 9, 10 y 11 del proceso. La temperatura máxima observada durante el compostaje fue de 29 °C, ubicándose 10°C por arriba de la temperatura ambiente, en el día 10 del proceso, que también fue el período en el que el pH de la composta se incrementó como resultado una alta actividad microbologica, sin embargo no se alcanzó el rango propuesto por la literatura para la fase termófila, >40°C (Cooperband, 2007). Durante los últimos 10 días del proceso la temperatura de la mezcla composteada fue del orden de la ambiente, debido a que el metabolismo bacteriano disminuyó, por la falta de alimento de facil degradación, por lo tanto se dejo de producir calor (Bathia., *et al.*, 2010).

La temperatura registrada por García (2015) se mantuvo en todo momento dentro del orden de la ambiente, con una temperatura máxima de 23°C, y solo 3°C por arriba de la ambiente, por lo que en el tambor rotatorio se presentó una actividad microbiológica mayor, en comparación con las pilas estáticas, pues la acción de los microorganismos es el principal medio por el cual se produce calor en la composta (Kalamdhad., *et al.*, 2009); esto permitiría una estabilización fisicoquímica con mejores contenidos que en la composta de García (2015).

El comportamiento que registró el pH durante el compostaje estuvo muy ligado al reportado para la temperatura, pues durante los primeros días del proceso este parámetro se incrementó, a 7.3 en el día 3, y a 8.5 en el día 9, manteniéndose en este valor hasta el día 22 del proceso, figura 5.1, B. Esta variación fue resultado de la producción de amoníaco, que se presentó como factor para la desnitrificación de la composta, por medio de la acción microbiológica (Jiménez., *et al.*, 2016; Tello., *et al.*, 2014; Cariello., *et al.*, 2007); por lo tanto, este parámetro guardó una alta relación con el incremento registrado en la temperatura. Finalmente, para el día 23 del compostaje el pH disminuyó a 7.8, y se mantuvo hasta el día 30, mostrando una eficiente eliminación del Amoníaco generado durante el proceso, pues el tambor rotatorio facilitó la movilización de los gases generados en la composta.

Debido a las variaciones reportadas durante el compostaje, la curva registrada para el pH en el tambor rotatorio fue muy similar a la establecida como rango típico para el proceso, de acuerdo con lo propuesto por Cooperband (2007). El pH final se ubicó dentro del rango exigido por la NOM-004-SEMARNAT-2002 (DOF, 2002) para biosólidos, y la NTEA-006-SMA-RS-2006 (DOF, 2006) para mejoradores de suelos, 6.5 – 8.

La humedad en la composta también se benefició con la aplicación del tambor rotatorio, pues facilitó la conservación de líquidos, por lo que este parámetro disminuyó solo 3% durante el proceso. Esta variación fue idéntica a la registrada por García (2015) en las pilas estáticas, sin embargo, en su investigación se tuvo que agregar agua a la mezcla composteada cada tercer día para conservar la humedad.

5.3.- Caracterización de la composta.

Para evaluar la eficiencia del compostaje en tambor rotatorio las variaciones registradas entre la mezcla inicial y la composta, en esta tesis se compararon con las reportadas por García (2015) en las pilas estáticas. La caracterización de los parámetros COT, NTK, CE, C/N, pH y Humedad de la composta se muestra en la tabla 5.6.

Tabla 5.6 Caracterización y comparación final de la estabilización de la composta

Parámetro	Pilas estáticas		Tambor rotatorio		
	García (2015)	Variación García (2015)	Mezcla inicial	Composta	Variación Mezcla inicial – Composta
Nitrógeno Total Kjeldhal (mg/kg)	25,438	4.1% (↓)	30,165 ± 800	26,320 ± 1,100	12.7% (↓)
Carbono Orgánico Total (mg/kg)	425, 580	1.2% (↓)	419,600 ± 10,000	408,900 ± 3,500	2.5% (↓)
C/N	18.8	6% (↓)	13.9	15.5	10.3% (↑)
Humedad (%)	55	8.3% (↓)	65 ± 3.1	62 ± 3	5% (↓)
pH	5.9	16.9% (↓)	7.1 ± 0.3	7.7 ± 0.2	7.7% (↑)
Conductividad eléctrica (µS/cm)	2,521	72.1% (↓)	7414 ± 300	4,578 ± 370	38.2% (↓)

Elaboración propia con base en los contenidos registrados en esta investigación, y en la de García (2015), 2016.

La C/N de la composta presentó un incremento de 10.3% respecto a la inicial, contrario a lo que se plantea en la literatura, por el consumo de la MO que se da durante el compostaje, mientras que con las pilas estáticas de García (2015) disminuyó en 6%, mostrando una diferencia significativa (ANOVA, $p= 0.05$, ver anexos), sin embargo debe considerarse que este parámetro en la mezcla inicial fue de 13.9, ubicándose por debajo del rango propuesto por la literatura para iniciar el proceso, $40 < 20$, por lo que este parámetro presentó una autorregulación con tendencia al incremento durante el compostaje, con la cual se benefició la velocidad de la acción microbológica (Kalamdhad., *et al.*, 2009).

Tomando en cuenta que el COT disminuyó solo 2.5% con el tambor rotatorio, y que presentó una variación del orden de la observada por García (2015, ANOVA, alfa 0.5), matemáticamente se determinó para el NTK que solo 356.6 mg/kg, de los 3,845 mg/kg que disminuyó durante el compostaje fueron resultado de la acción microbológica, los 3,488.4 mg/kg restantes se perdieron en

el Amoniaco que se produjo durante los días 9 – 22 del proceso. El NH₃ también influyó en la disminución de 38.2% que presentó la CE, al ser una sustancia altamente alcalina (Martínez., et al., 2013); esta diferencia fue estadísticamente significativa respecto a la reportada en las pila, pues la conductividad eléctrica en la pila bajó aproximadamente el doble (47%), tabla 5.6, debido a la lixiviación de sales, que en esta investigación fue nulificada, pues el tambor rotatorio es un contenedor cerrado, además, el compostaje en las pilas duró 30 días más. En esta tesis no se cumplió con el rango establecido por la norma en mejoradores de suelos, para este parámetro <4,000 µS/cm (DOF, 2007).

5.3.1.- K y P en la composta.

Los contenidos de K y P en la mezcla inicial se ubicaron muy por arriba de los establecidos como límite mínimo para mejoradores de suelos (DOF,2006), sin embargo, la MO aún debían ser estabilizada, por lo que se esperaba que el proceso en el tambor rotatorio beneficiaría la disponibilidad y movilidad de los nutrientes. Los contenidos de K y P observados en la composta se muestran en la tabla 5.7.

Tabla 5.7 K y P después del compostaje en tambor rotatorio.

Nutriente	Tambor rotatorio			NTEA-006-SMA-RS-2006 (DOF, 2006)	Cumplimiento de la norma
	Mezcla inicial	Composta	Variación Mezcla inicial– Composta		
K (mg/kg)	12421	14800 ± 860	16% (↑)	Mayor a 250	✓
P (mg/kg)	15700	19400 ± 550	19% (↑)	Mayor a 100	✓

Elaboración propia con base en los contenidos registrados en esta investigación, 2016.

El incremento observado durante el compostaje en los contenidos de K, 16%, y P 19%, fue atribuido a la mineralización microbiológica de la MO disponible en la mezcla inicial, que representó una mayor movilidad de ambos nutrientes, pues mineralizados presentan una alta capacidad para disolverse en la fase líquida en los suelos, que es de donde lo absorben las plantas (Calderón., et al., 2010).

La variación registrada en los contenidos de K y P durante el compostaje en el tambor rotatorio, se comparó con la reportada en las investigaciones de Kalamdhad y Kumar (2014) y Kalamdhad., et al., (2009), que realizaron el compostaje en tambor rotatorio con los sustratos: 40% lodos, 30% estiércol de vaca, 20% aserrín y 10% residuos de jardinera, mostrando un incremento en el K de 27.8% en el caso de Kalamdhad y Kumar (2014) y 26.7% en el de Kalamdhad., et al., (2009), y de 38% y 34.3% para P, respectivamente. Lo que representó una diferencia aproximadamente de 50% respecto al

incremento registrado en esta tesis para ambos nutrientes, sin embargo, en las investigaciones citadas se alcanzó la fase termófila, que es donde se presenta la mayor actividad microbiológica de todo el proceso, tomando en cuenta que la actividad registrada en esta investigación fue solo de bacterias mesófilas, el incremento observado en los contenidos de K y P que se registró en el tambor rotatorio, fue aceptable, tabla 5.7.

Los contenidos de K y P en la composta se ubicaron muy por arriba de los exigidos por la NTEA-006-SMA-RS-2006 para mejoradores de suelos (DOF, 2006), tabla 5.7, por lo que se esperaba ver una mejora en su potencial agronómico, pues ambos nutrientes son esenciales para el proceso de fotosíntesis vegetal (Calderón., *et al.*, 2010).

5.3.2.- Metales pesados en la composta obtenida del tambor rotatorio

Debido a la naturaleza inorgánica de los metales pesados, no suelen ser degradados durante el compostaje, en la mezcla inicial todos los metales cumplieron con lo establecido por la norma, tabla 5.8, por lo que se esperaba que este parámetro no fueran un factor limitante para la reutilización del producto obtenido al finalizar el proceso, y que sus contenidos se mantuvieran dentro del rango establecido por la NOM-004-SEMARNAT-2002 (DOF, 2002).

Tabla 5.8 Contenidos de metales pesados en la composta obtenida del tambor rotatorio (p.s.).

Metales (mg/kg)	Pilas estáticas	Tambor rotatorio			Valores de referencia (NOM-004-SEMARNAT-2002) Biosólido Tipo excelente	Cumplimiento de la norma
	Composta García (2015)	Mezcla inicial	Composta	Variación Mezcla inicial-composta		
Cu	195	132.2 ± 0.6	138 ± 0.8	3.5% (↑)	1500	✓
Pb	82	56.4 ± 0.5	57.4 ± 0.5	1.7% (↑)	300	✓
Zn	302	292.4 ± 0.8	298 ± 0.9	1.8% (↑)	2800	✓
Ni	22	22 ± 0.5	22.8 ± 0.5	3.5% (↑)	420	✓

Elaboración propia con base en los contenidos registrados en esta investigación, y en la de García (2015), 2016.

Los metales pesados presentaron un incremento de solo 2.8% promedio, debido a la pérdida de volumen en la composta, que fue de aproximadamente 30%, esto propició una mayor concentración por kg en la mezcla compostada (García, 2015, Peña, 2014). Todos los metales presentaron contenidos menores al límite que establece la norma, tabla 5.8, aunque el incremento en el Ni y Cu fue mayor, debido a que las proporciones iniciales de Ni fueron muy bajas, y un leve incremento fue

más visible que en el resto de los parámetros. Mientras que, el Cu es considerado un micronutriente en suelos al encontrarse como Cu^{2+} , por lo que la movilización de este catión fue mayor que la del resto de los metales analizados (Martínez., *et al.*, 2013).

La composta mostró una diferencia significativa (ANOVA, alfa, 0.5), respecto a las pilas estáticas de García (2015), donde los contenidos de metales pesados se incrementaron en 22.8% general, atribuyéndolo a la pérdida de volumen que se presentó durante el proceso, al igual que en esta tesis, la masa compostada disminuyó aproximadamente 50% en su investigación, demostrando el efecto que generó la aplicación del tambor rotatorio para conservar los líquidos durante el compostaje, pues evitó que el volumen del producto disminuyera, y que la concentración de metales pesados se incrementara de forma considerable, como sucedió en las pilas. Los contenidos de metales pesados en la composta se mantuvieron dentro del límite establecido para un biosólido de tipo excelente (tabla 5.8, DOF, 2002); mostrando un riesgo bajo tanto para la salud del ser humano como para el ambiente.

5.3.3.- Caracterización microbiológica de la composta

Los contenidos de coliformes fecales en la mezcla inicial se ubicaron muy por arriba de los exigidos en la NOM-004-SEMARNAT-2002 (DOF, 2002), por lo que se planteó como reto para el compostaje, la disminución de sus concentraciones. Los contenidos microbiológicos observados en la composta se muestran en la tabla 5.9.

Tabla 5.9 Caracterización microbiológica de la composta obtenida en el tambor rotatorio.

Parámetro	Pilas estáticas	Tambor rotatorio		NOM-004-SEMARNAT-2002, Biosólidos (DOF, 2002)			Clasificación de acuerdo con la norma
	Composta García (2015)	Mezcla inicial	Composta	Clase A	Clase B	Clase C	
Coliformes fecales NMP/g	1.8×10^5	3.4×10^7	2.2×10^5	Menor de 1000	Menor de 1000	Menor de 2,000,000	Clase C
<i>Salmonella</i> ssp NMP/g	Sin crecimiento de colonias	Sin crecimiento de colonias	Sin crecimiento de colonias	Menor de 3	Menor de 3	Menor de 300	Clase A
Huevos de helmintos NMP/g	Negativo a helmintos	1 huevecillo <i>Ancylostoma</i>	Negativo a helmintos	Menor de 1	Menor de 10	Menor de 35	Clase A

Elaboración propia con base en los contenidos registrados en esta investigación, y en la de García (2015), 2016.

Los contenidos de coliformes fecales disminuyeron en 2 unidades exponenciales durante el compostaje en el tambor rotatorio (tabla 5.9), debido principalmente al efecto desinfectante del Amoniaco, que se generó de forma natural entre los días 4 – 22 del proceso (Fidjeland., *et al.*, 2013; Magri., *et al.*, 2013; Martínez., *et al.*, 2013; Emmot., *et al.*, 2011). Otros aspectos que pudieron influir para la disminución en los contenidos de coliformes fecales, fueron: la presencia de hongos productores de penicilina (*Rhizopus Penicillium*; Tello., *et al.*, 2015), y la falta de alimento de fácil degradación, como sucedió en la investigación de García (2015), que registró una disminución de una unidad exponencial para los contenidos de estos microorganismos, mostrando una diferencia significativa, respecto a esta tesis (ANOVA, $p= 0.05$).

Los contenidos de *Salmonella ssp* y huevos de helminto en la composta fueron negativos, tabla 5.9, de la misma manera que en la investigación de García (2015), por lo las variaciones registradas para estos parámetros durante el compostaje no fueron significativas (ANOVA, $p= 0.05$).

5.3.4.- IG en la composta obtenida del tambor rotatorio

La mezcla inicial presentó una fitotoxicidad moderada para la semilla de lechuga, sin embargo, se esperaba que pudiera disminuir durante el compostaje, por medio de la acción microbiológica, que se reflejaría en la estabilización fisicoquímica de la composta. El IG registrado en el producto se muestra en la tabla 5.10.

Tabla 5.10 IG en la composta a su salida del tambor rotatorio.

Semilla	Pilas estáticas		Tambor rotatorio			Varnero <i>et al.</i> (2007); Lazaridi <i>et al.</i> (2006); Zucconi <i>et al.</i> (1981).
	García (2015)	Variación García (2015)	Mezcla inicial	Composta	Variación Mezcla inicial – composta	
Lechuga (%)	79	1.25%(↓)	64.4	82.1 ± 0.9	21.5%(↑)	80% - 100%, baja o nula fitotoxicidad; 50% - 80% moderadamente fitotóxica; menor a 50% altamente fitotóxica.
Rábano (%)	81	10%(↓)	93	96.9 ± 0.5	4%(↑)	

Elaboración propia con base en los contenidos registrados en esta investigación, y en la de García (2015), 2016.

El IG observado en el tambor rotatorio presentó diferencias significativas, respecto a las variaciones registradas por García (2015; ANOVA, $p= 0.05$, al incrementarse en 21.5% para la semilla de lechuga y 4% para la de rábano, mientras que en las pilas estáticas disminuyó 1.25% y 10% respectivamente, (tabla 5.10). Esto demostró una alta eficiencia del tambor rotatorio para la eliminación de sustancias fitotóxicas, frente a las técnicas tradicionales, principalmente el Amoniaco

generado durante los días 4 – 22 del compostaje, de acuerdo con las variaciones registradas en el pH y la disminución en los contenidos NTK (12.7%) y CE (38.2%).

Otro factor que se reflejó en el incremento del IG fue la movilización de K y P, con lo que se facilitó su consumo por parte de las plantas, reflejándose en un incremento del potencial agronómico de la composta, ya que estos nutrientes son esenciales para la fotosíntesis (Martínez., *et al.*, 2013).

Durante el compostaje en el tambor rotatorio se observó la estabilización de la mayoría de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos analizados, de acuerdo con la norma, con excepción de la CE, sin embargo, los contenidos de coliformes fecales y el IG aún eran mejorables.

5.4.- Etapa de pulimiento en pilas estáticas.

Para asegurar el máximo rendimiento durante el compostaje, y de esta manera facilitar que los parámetros analizados alcanzaran las características más apropiadas, se estableció realizar una etapa de pulimiento complementaria al compostaje en tambor rotatorio, que consistiría en colocar la masa composteada en pilas estáticas durante un periodo de 20 días, cumpliendo de esta manera con la metodología propuesta por la literatura (Fernandez., *et al.*, 2013; Kalamdhad., *et al.*, 2009). Los contenidos reportados en la composta final para NTK, COT, C/N, humedad, pH y CE se muestran en la tabla 5.11.

Tabla 5.11 Caracterización y comparación de la etapa de pulimiento.

Parámetro	Mezcla Inicial	Composta	Pulimiento	Variación Mezcla – pulimiento.	Variación composta – pulimiento.
Nitrógeno Total Kjeldhal (mg/kg)	30,165	26,320	24,080 ± 1, 200	20.1%(↓)	8.3%(↓)
Carbono Orgánico Total (mg/kg)	419,600	408,900	404,266 ± 6,300	3.6%(↓)	1.1%(↓)
C/N	13.9	15.5	16.7	16.7% (↑)	7.1% (↑)
Humedad (%)	65	62	60 ± 1	7.6%(↓)	3.2%(↓)
pH	7.1	7.7	7.5 ± 0.2	5.3%(↑)	2.5%(↓)
Conductividad eléctrica (μS/cm)	7414	4578	3982 ± 143	46.2%(↓)	8%(↓)

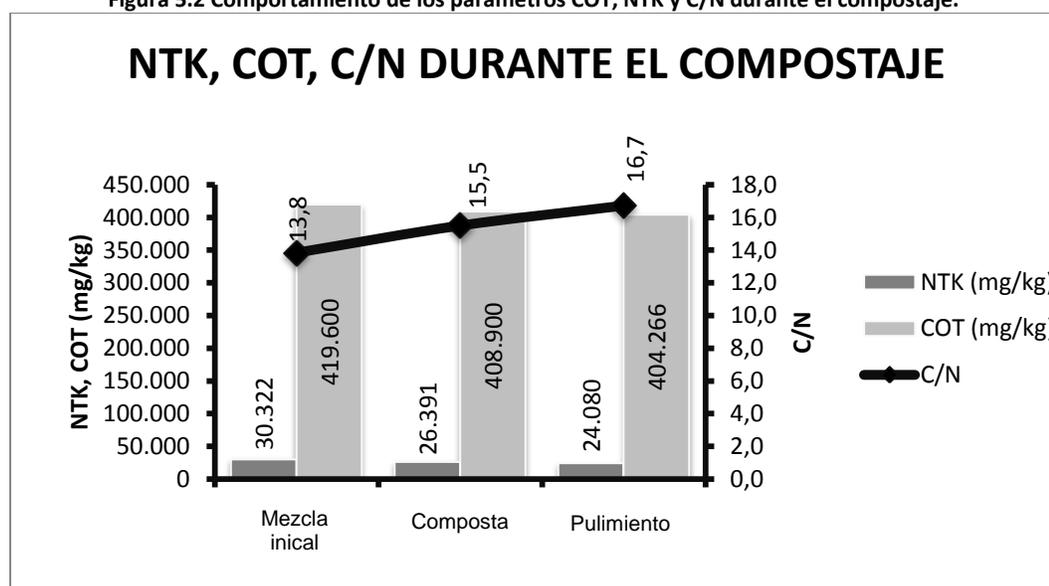
Elaboración propia con base en los contenidos registrados en esta investigación, 2016

Durante la etapa de pulimiento la C/N se incrementó 7.1%, tomando en cuenta que el consumo de la MO fue bajo, pues el COT solo disminuyó 1.1%, el incremento observado en este parámetro se ligó a la lixiviación de sales de Amonio que se mantuvieron disueltas durante el compostaje en el tambor, el NTK disminuyó en 8.3%, la CE 8%, y el pH 2.5% tabla 5.11.

Las variaciones registradas para la CE, NTK, COT y C/N fueron significativas respecto a la mezcla inicial (ANOVA, $p= 0.05$, ver anexos). De acuerdo con la figura 5.2, la C/N presentó una tendencia a incrementarse durante el compostaje con el sistema integral tambor – pilas, aumentando en 16.7%; mientras que el COT disminuyó en 3.6%, mostrando consumo bajo de la MO disponible, por lo que solo 1.6% del NTK se perdió en esta investigación, por consumo biológico, y 18.5% por medio de sustancias como el Amonio y Amoniaco, que también influyeron sobre la CE, que disminuyó en 46.2%. Los contenidos de humedad y el pH no presentaron una variación significativa respecto a la mezcla inicial (ANOVA, $p= 0.05$).

Al finalizar el compostaje se observó que la CE se ubicó dentro del rango que establece la norma para mejoradores de suelos $\leq 4,000 \mu\text{S}/\text{cm}$ (DOF, 2007), por lo que la composta podría ser usada sin restricciones en este parámetro, también el pH se ubicó dentro del rango exigido en la norma (6 – 8; DOF, 2006). En lo que respecta a la concentración de NTK estuvo por arriba del límite mínimo propuesto para la literatura en un mejorador de suelos, $<2000 \text{ mg}/\text{kg}$, beneficiando de esta manera el potencial agronómico del producto final (Jiménez., *et al.*, 2016; Tello., *et al.*, 2015; Rihani., *et al.*, 2010).

Figura 5.2 Comportamiento de los parámetros COT, NTK y C/N durante el compostaje.



Elaboración propia con base en los contenidos registrados en esta investigación, 2016

5.4.1.- K y P en la etapa de pulimiento

Los contenidos de K y P reportados en la mezcla inicial fueron muy altos respecto a la norma, sin embargo la mineralización biológica benefició su movilización durante la primera fase del compostaje, por lo que sus concentraciones se incrementaron, de tal manera que estos nutrientes no representaron problemas para el proceso. Los contenidos de K y P observados en la composta final se muestran en la tabla 5.12.

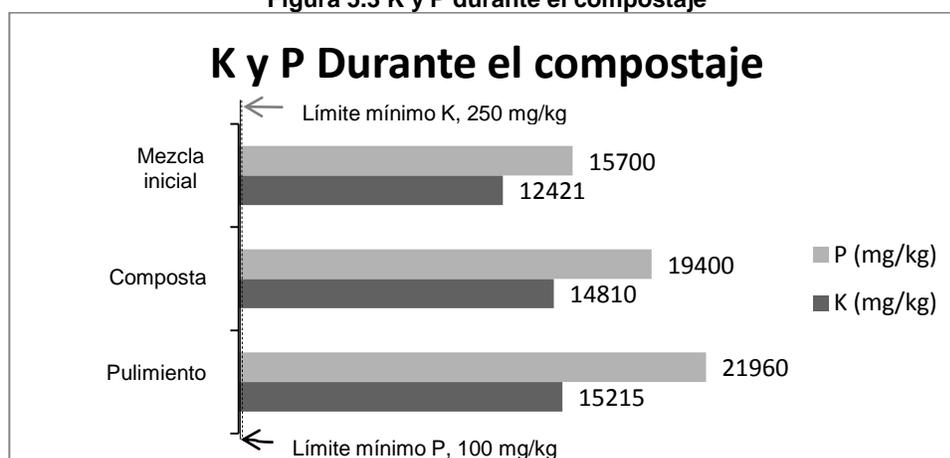
Tabla 5.12 Contenidos de K y P en la etapa de pulimiento.

Nutriente	Mezcla inicial	Composta	Pulimiento	Variación mezcla – composta	Variación composta - pulimiento	NTEA-006-SMA-RS-2006 (DOF, 2006)	Cumplimiento de la norma
K (mg/kg)	12420	14800	15220 ± 1,300	18.3% (↑)	2.3% (↑)	Mayor a 250	✓
P (mg/kg)	15700	19400	21960 ± 950	28.5% (↑)	9.5% (↑)	Mayor a 100	✓

Elaboración propia con base en los contenidos registrados en esta investigación, 2016

Durante la etapa de pulimiento los contenidos de K se incrementaron, 2.6% y los de P 9%, tabla 5.12, lo que se atribuyó a la mineralización de la MO que aún se encontraba disponible en la composta, tomando en cuenta que tanto el COT, como el NTK presentaron un leve consumo microbiológico, sin embargo gran parte de estos nutrientes puede perderse en energía o volatilización, mientras que tanto el Fósforo como el Potasio son muy estables, por lo que en lugar de perder, sus concentraciones suelen incrementarse (imagen 5.3), en esta investigación no solo se benefició la obtención contenidos superiores respecto a los establecidos por la norma en 14,450 mg/kg K y los de P en 19,300 mg/kg, también potenció su disponibilidad, mostrando un incremento significativo respecto a la mezcla inicial (ANOVA, $p= 0.05$), que se reflejaría en el IG.

Figura 5.3 K y P durante el compostaje



Elaboración propia con base en los contenidos registrados en esta investigación, 2016

5.4.2.- Metales pesados en la etapa de pulimiento

Los contenidos de metales pesados sólo se incrementaron 2.8% promedio en el tambor rotatorio, manteniéndose dentro de los rangos establecidos por la NOM-004-SEMARNAT-2006 para un biosólido de tipo excelente (DOF, 2006). En la etapa de pulimiento la pila fue cubierta con una bolsa de plástico, para evitar el contacto directo con el ambiente y eliminar la posibilidad de una inducción de estas sustancias en medios secundarios. Los contenidos de metales pesados registrados en la composta final se muestran en la tabla 5.13.

Tabla 5.13 Metales pesados en la etapa de pulimiento p.s.

Metales (mg/kg)	Mezcla inicial	Composta	Pulimiento	Variación Mezcla – pulimiento.	Variación composta – pulimiento	NOM-004-SEMARNAT-2002 (Biosólido tipo Excelente)	Cumplimiento de la norma
Cu	132.2 ± 0.6	138 ± 0.8	140.2 ± 0.9	4.9 % (↑)	1.4% (↑)	1500	✓
Pb	56.4 ± 0.5	57.4 ± 0.5	58.6 ± 0.5	3.7% (↑)	2% (↑)	300	✓
Zn	292.4 ± 0.8	298 ± 0.9	302.8 ± 0.7	3.4% (↑)	1.5% (↑)	2800	✓
Ni	22 ± 0.5	22.8 ± 0.5	23.2 ± 0.8	4.3% (↑)	1.7% (↑)	420	✓

Elaboración propia con base en los contenidos registrados en esta investigación, 2016

Durante la etapa de pulimiento los contenidos de metales pesados se incrementaron apenas 1.6% general, tabla 5.13, debido a la disminución que presentó la masa de la composta durante este período, y que correspondió aproximadamente al 10% del volumen total, generando un incremento en las concentraciones por kg de este parámetro, de la misma manera que sucedió en el tambor rotatorio.

El incremento observado en los contenidos de metales pesados con el sistema tambor – pilas, 4.2% general, no resultó significativo respecto a los contenidos iniciales (ANOVA, $p=0.05$, ver anexos), mostrando una alta eficiencia para evitar la contaminación de la composta con estas sustancias, y una minimización del incremento por pérdida de volumen, tal como en la investigación de Kalamdhad y Singht (2013), pues en una composta: 40% lodo residual, 30% estiércol de vaca, 20% aserrín y 10% residuos de jardinera, presentó los siguientes contenidos: 70.5 mg/kg Cu, 240 mg/kg Ni, 959 mg/kg Pb y 147.3 mg/kg Zn y después del compostaje con el sistema tambor - pilas: Cu 91.6 mg/kg, Ni 245 mg/kg, Pb 1111 mg/kg y Zn 155 mg/kg, mostrando un incremento de 10.5% general, que fue similar al reportado en esta tesis. Los contenidos finales reportados en esta tesis se mantuvieron en todos los casos dentro de los exigidos en la norma (DOF., 2002).

5.4.2.- Caracterización microbiológica en la etapa de pulimiento

Durante el compostaje en el tambor rotatorio se presentó una disminución de 2 unidades exponenciales en los contenidos de coliformes fecales, debido en gran medida a la producción de Amoniaco que se observó entre los días 4 – 22 del proceso (Jiménez., *et al.*, 2016; Tello., *et al.*, 2015). Uno de los objetivos para la aplicación de la etapa de pulimiento en pilas fue disminuir los contenidos de estos microorganismos, y alcanzar una mejor clasificación de acuerdo con la NOM-

004-SEMARNAT-2002 (DOF, 2002). Los contenidos microbiológicos observados en la composta final se muestran en la tabla 5.14.

5.14 Clasificación microbiológica en la etapa de pulimiento.

Parámetro	Mezcla inicial	Composta	Pulimiento	NOM-004-SEMARNAT-2002, Biosólidos (DOF, 2002)			Clasificación de acuerdo con la norma
				Clase A	Clase B	Clase C	
Coliformes fecales NMP/g	3.4×10^7	2.2×10^5	1.4×10^5	Menor de 1000	Menor de 1000	Menor de 2,000,000	Clase C
<i>Salmonella</i> ssp NMP/g	Sin crecimiento de colonias	Sin crecimiento de colonias	Sin crecimiento de colonias	Menor de 3	Menor de 3	Menor de 300	Clase A
Huevos de helmintos NMP/g	1 huevecillo <i>Ancylostoma</i>	Negativo a helmintos	Negativo a helmintos	Menor de 1	Menor de 10	Menor de 35	Clase A

Elaboración propia con base en los contenidos registrados en esta investigación, 2016

Los contenidos de *Salmonella* ssp y huevos de helminto observados en la composta final se mantuvieron nulos, durante la etapa de pulimiento, tabla 5.14, mientras que los contenidos de coliformes fecales, presentaron una disminución correspondiente a 80,000 NMP/g, que fue atribuida a la falta de alimento disponible en la composta, tomando en cuenta que el consumo de COT durante esta etapa fue de apenas 1.1% (Bathia., et al., 2010).

La disminución observada en los contenidos de coliformes fecales de la composta final fue estadísticamente significativa, respecto a los valores iniciales (ANOVA, $p= 0.05$) y comparando con las pilas estáticas de García (2015), se observó que con un tiempo de compostaje similar, el sistema integral tambor – pilas resultó más eficiente para la desinfección de la composta realizada a partir de la mezcla lodos – pasto, debido en gran medida a la acción desinfectante amoniaco generado de manera natural durante el compostaje en el tambor rotatorio (Jiménez et al., 2016; Tello., et al., 2015; Cariello., et al., 2007).

5.4.3.- IG en la etapa de pulimiento

Durante el compostaje en el tambor rotatorio se presentó una disminución de las sustancias fitotóxicas observadas en la mezcla inicial, sin embargo el IG aún era mejorable, por lo que se

planteó como un objetivo para la etapa de pulimiento que este parámetro se incrementara en el producto obtenido. El IG registrado en la composta final se muestra en la tabla 5.15.

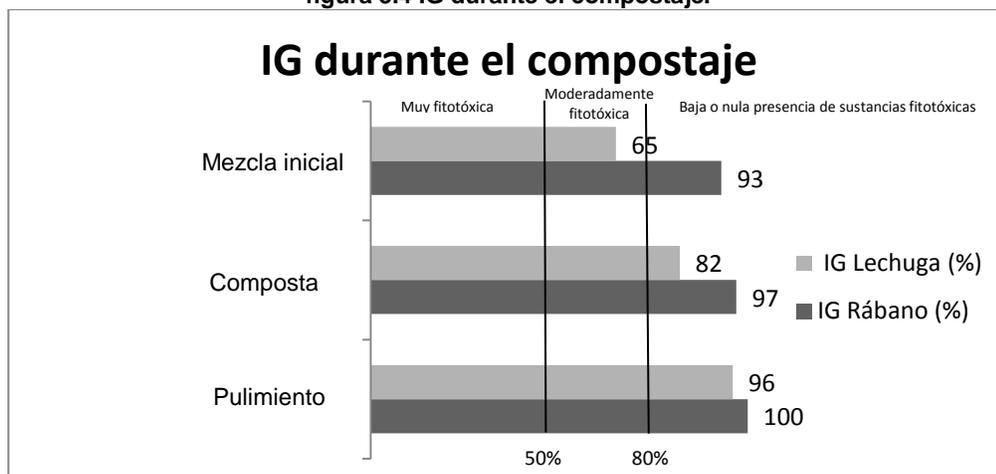
5.15 Índice de germinación en la etapa de pulimiento.

IG	Mezcla inicial	Composta	Pulimiento	Variación Mezcla – composta	Variación Mezcla – pulimiento.	Variación composta – pulimiento	Varnero <i>et al.</i> (2007); Lazaridi <i>et al.</i> (2006); Zucconi <i>et al.</i> (1981).
Lechuga	64.4%	82.1%	95.7% ±0.4	21.5%(↑)	32.7%(↑)	11.2%(↑)	80%-100%, baja presencia de sustancias fitotóxicas; 50%-80% moderadamente fitotóxica; menor a 50% altamente fitotóxica.
Rábano	93%	96.9%	100%	4%(↑)	7%(↑)	3.0%(↑)	

Elaboración propia con base en los contenidos registrados en esta investigación, 2016

Durante la etapa de pulimiento el IG se incrementó 11.2% para la semilla de lechuga y 3% para la semilla de rábano, tabla 5.15. El factor más ligado a este incremento fue la CE, pues disminuyó 8% debido a la lixiviación de sales de Amonio en la pila, reflejándose en las concentraciones de NTK, 8.3% (↓). La mineralización del P también presentó un efecto considerable sobre el IG de la composta, pues al facilitarse su movilidad, su concentración se incrementó, 9.5%, lo que propició una mejora del potencial agronómico, ya que este nutriente es esencial durante el proceso de fotosíntesis (Calderón., *et al.*, 2010). La composta final presentó un IG de 95.7% para la semilla de lechuga y 100% para la semilla de rábano, mostrando una presencia prácticamente nula de sustancias fitotóxicas para estas especies (Varnero., *et al.*, 2007); figura 5.4, lo que fue muy significativo respecto a la mezcla (ANOVA, $p= 0.05$) tomando en cuenta que en inicialmente se partió de una fitotoxicidad moderada (figura 5.4).

figura 5.4 IG durante el compostaje.



Elaboración propia con base en los contenidos registrados en esta investigación, 2016

El IG se incrementó tanto para la semilla de lechuga 11.2% como para la de rábano 3%, además facilitó el cumplimiento de la normatividad para la CE <4,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (DOF, 2007); y las concentraciones de coliformes fecales disminuyeron, 80,000 NMP/g, sin embargo en este parámetro no se alcanzó una mejor clasificación de acuerdo con la norma (DOF, 2002).

5.5.- Interrelación entre parámetros.

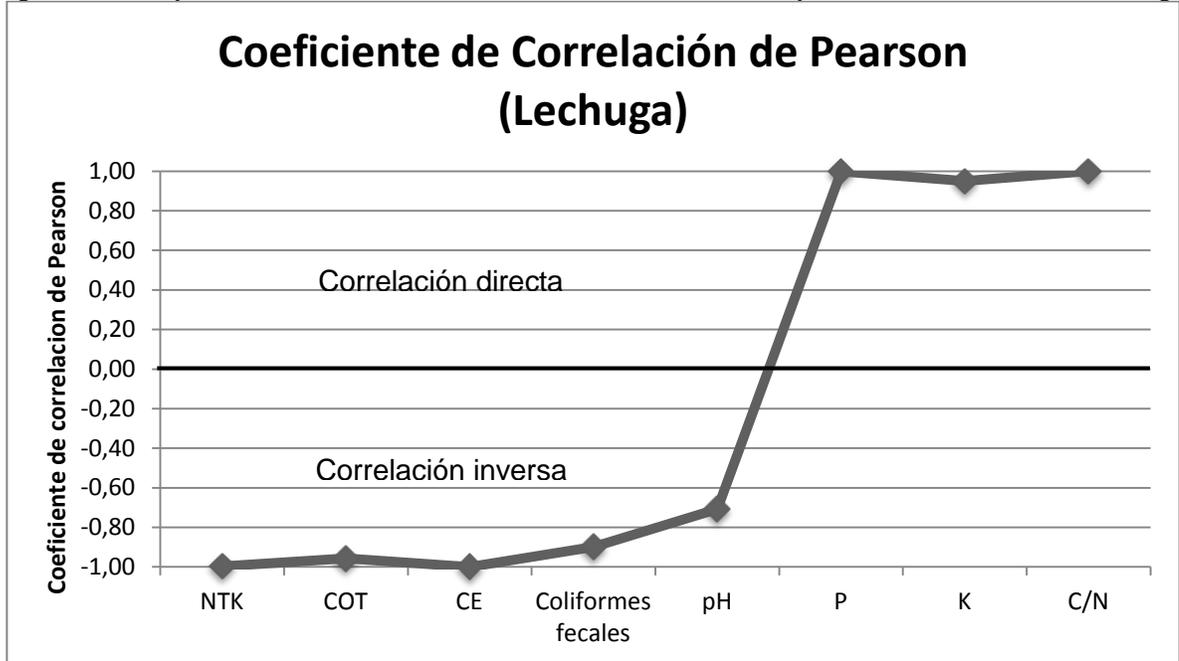
Durante el proceso de compostaje se usó al IG como un indicador para la presencia de sustancias fitotóxicas en la composta, y de su potencial agronómico, por lo tanto este factor estuvo ampliamente ligado a las variaciones que presentaron los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos analizados. Para evaluar la interrelación entre los parámetros evaluados en la composta y el IG, se analizaron el Coeficiente de correlación de Pearson y el Coeficiente de determinación R^2 . Los valores reportados para la semilla de lechuga se muestran en la tabla 5.16, figura 5.5 y los valores reportados para la semilla de rábano se muestran en la tabla 5.17 y figura 5.6

5.16 Coeficiente de correlación de Pearson y de determinación R^2 para la semilla de lechuga

IG en la semilla de lechuga	Coeficiente de correlación de Pearson		Coeficiente de determinación R^2	
NTK	-1.00	Correlación inversa	1.00	Relación directa
COT	-0.96	Correlación inversa	0.92	Relación muy fuerte
C/N	1.00	Correlación directa	1.00	Relación directa
CE	-1.00	Correlación inversa	1.00	Relación directa
pH	-0.71	Correlación inversa	0.50	Relación moderada
P	1.00	Correlación directa	1.00	Relación directa
K	0.95	Correlación directa	0.90	Relación muy fuerte
Coliformes fecales	-0.90	Correlación inversa	0.81	Relación fuerte

Elaboración propia con base en los contenidos registrados en esta investigación, 2016

Figura 5.5 Comportamiento del coeficiente de correlación de Pearson para el IG en la semilla de lechuga.



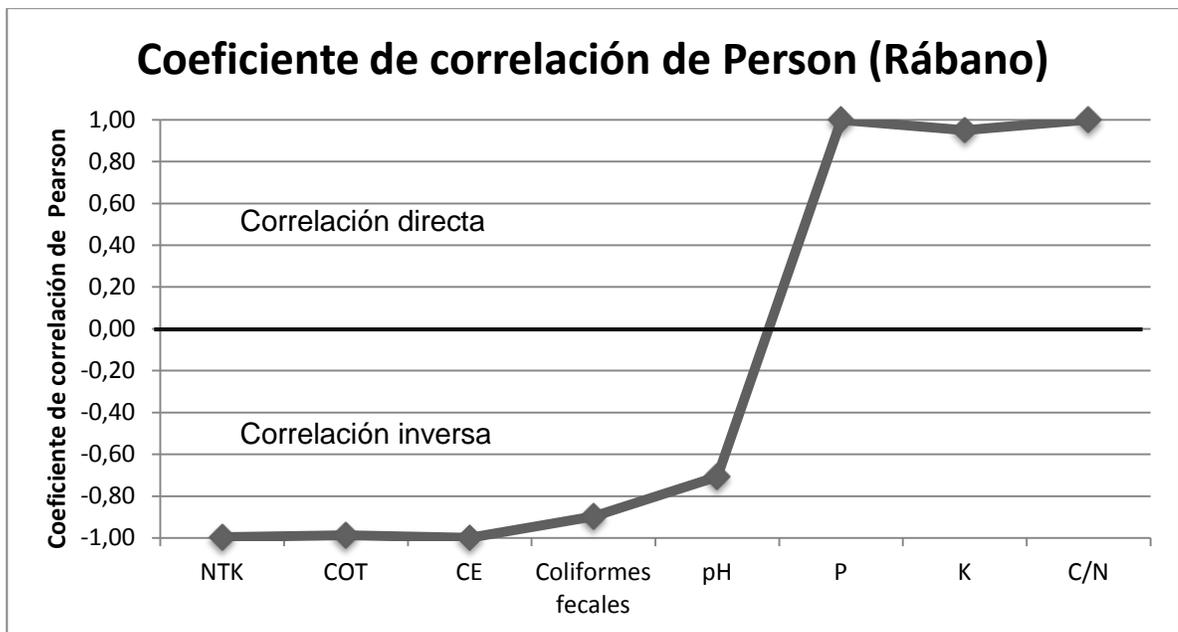
Elaboración propia con base en los contenidos registrados en esta investigación, 2016

5.17 Coeficiente de correlación de Pearson y de determinación R^2 para la semilla de rábano

IG en la semilla de rábano	Coeficiente de correlación de Pearson		Coeficiente de determinación R^2	
	Valor	Relación	Valor	Relación
NTK	-1.00	Correlación inversa	1.00	Relación directa
COT	-0.99	Correlación inversa	0.98	Relación muy fuerte
C/N	1.00	Correlación directa	1.00	Relación directa
CE	-1.00	Correlación inversa	1.00	Relación directa
pH	-0.71	Correlación inversa	0.50	Relación moderada
P	1.00	Correlación directa	1.00	Relación directa
K	0.95	Correlación directa	0.90	Relación muy fuerte
Coliformes fecales	-0.90	Correlación inversa	0.81	Relación fuerte

Elaboración propia con base en los contenidos registrados en esta investigación, 2016

Figura 5.6 Comportamiento del Coeficiente de Correlación de Pearson del IG en la semilla de rábano.



. Elaboración propia con base en los contenidos registrados en esta investigación, 2016

De acuerdo con los resultados obtenidos con el análisis del coeficiente de determinación R^2 , las correlaciones observadas entre el comportamiento de los parámetros analizados y el IG fue muy alta, especialmente para CE, NTK, C/N y P (tabla 5.16, 5.17). Sin embargo, el IG serviría para evaluar dos aspectos durante el compostaje: el potencial agronómico de la composta y la presencia de sustancias fitotóxicas.

De acuerdo con lo observado por Caballero (2014) y Peña (2014), el parámetro que representa mayor importancia para el incremento del IG es la CE, sin embargo en esta investigación, la presencia y liberación de Amoníaco y sales amónicas representó el factor que mayor impacto tuvo durante el compostaje, pues influyó en tres de los aspectos que presentaron las correlaciones más fuertes respecto al IG: NTK, CE y C/N. La producción de Amoníaco y sales amónicas se presentó de forma natural, como un mecanismo regulador para el incremento de la C/N, propiciando que las concentraciones de NTK y CE disminuyeran 20.1% y 42.6% respectivamente, mostrando correlaciones perfectas en todos los casos, directa para C/N e inversa para NTK y CE (figura 5.5 y 5.6).

Respecto a las especies usadas para el análisis del IG se observó que la semilla de lechuga es más sensible a la presencia de sustancias fitotóxicas como Amoníaco y sales (Varnero., *et al.*, 2009). Por

lo que al disminuir sus concentraciones, de acuerdo con NTK y CE el IG en esta semilla se incrementó, 30.7%.

Por otro lado, el incremento que se observó durante el compostaje en los contenidos de Fósforo presentó una correlación directa con el IG (tabla 5.16, 5.17), relacionado este parámetro ampliamente a la mejora del potencial agronómico en la composta, pues su movilización en la composta facilitó su consumo y el desarrollo de las especies vegetales evaluadas (lechuga – rábano).

El parámetro con la menor correlación, respecto al incremento que presentó IG durante el proceso fue el pH, debido a que este parámetro mostró un comportamiento muy cercano al típico para el compostaje, a pesar de no haberse alcanzaron temperaturas termófilas. Gracias al comportamiento mostrado en el pH, el valor final en la composta se ubicó dentro del rango del reportado en la mezcla inicial.

De acuerdo con lo observado en el análisis estadístico, los valores registrados para el IG, 95.7% Lechuga y, 100% Rábano, estuvieron de acuerdo con el cumplimiento de la normatividad en los contenidos de coliformes fecales, *Salmonella ssp*, huevos de helminto, metales pesados, K, P, CE y pH (DOF, 2007; DOF, 2006; DOF, 2002); mientras que en los parámetros NTK, COT y C/N los contenidos registrados se ubicaron dentro de los que propone la literatura para un mejorador de suelos.

6.- Conclusiones y recomendaciones

6.1.- Conclusiones

Tambor

- La revalorización de los lodos se cumplió de acuerdo con la normatividad al mostrar contenidos nulos para *Salmonella ssp* y Helminetos; 2.2×10^5 NMP/g en coliformes fecales, y los contenidos de metales pesados se mantuvieron dentro de los límites máximos permisibles al incrementarse solo 2.8% promedio (DOF 2007, DOF 2006 y DOF 2002).
- El tambor rotatorio logró vencer uno de los retos planteados inicialmente, pues los contenidos de coliformes fecales (2.2×10^5 NMP/g) correspondieron a un biosólido clase C (DOF, 2002), por lo que la composta podría ser empleada como enmienda de suelos con algunas restricciones, entre ellas evitar el contacto directo con la población (ver anexos; DOF, 2002).
- La composta disminuyó en dos unidades exponenciales los contenidos de coliformes fecales y se incrementó solo en 2.8% promedio para metales pesados, representando una mejora frente a las pilas estáticas, donde se presentó la disminución de una unidad exponencial y el incremento en 22.8% respectivamente.
- Durante los 20 primeros días en el tambor rotatorio la temperatura de la composta fue claramente independiente a la ambiente, ubicándose hasta 10°C por arriba, demostrando una mejor conservación para este parámetro, en comparación con las pilas estáticas donde la diferencia máxima registrada fue de 3°C.
- La composta disminuyó de 12.7% en el NTK y 38.2% en la CE, debido a la producción de NH_3 durante el proceso en el tambor, el cual se liberó gracias a la implementación de la rotación de 360°.
- La producción de NH_3 en la composta propició que el pH subiera del 7 inicial a 7.3 entre los día 4-9 de proceso, y posteriormente a 8.3 entre los días 9-22, cuando se presentó la máxima producción de esta sustancia, disminuyendo gradualmente hasta 7.7 entre los días 22-30, por efecto de la rotación del tambor.
- Los contenidos de sustancias fitotóxicas disminuyeron durante el compostaje en el tambor rotatorio, de acuerdo con el incremento observado en el IG, 21.5% en la semilla de lechuga, y 4% en la de rábano, ubicándola con una fitotoxicidad muy baja o nula, respecto a la mezcla inicial (fitotoxicidad moderada para la lechuga), adjudicado principalmente a la degradación de Amoniaco, cumpliendo con uno de los retos planteados inicialmente para el proceso.
- Los contenidos de Fosforó y Potasio se ubicaron muy por arriba de los límites mínimos exigidos en la NTEA-006-SMA-RS-2006 (DOF, 2006) para mejoradores de suelos, en 14,450

mg/kg, 19,300 mg/kg, respectivamente, demostrando que la composta final podría beneficiar el desarrollo vegetal, y proveerlos al usarla como enmienda de suelos.

- Los contenidos de metales pesados en la composta final se mantuvieron dentro de los límites exigidos para un biosólido de tipo excelente, (DOF, 2002), por lo que podría ser empleada en cualquier actividad que requiriera de enmiendas de suelos sin restricciones que aplicaran a este parámetro (DOF, 2002).

Pulimiento

- El proceso de lixiviación de sales de Amonio que se presentó durante la etapa de pulimiento benefició la disminución del NTK, y la CE, 8.3% y 8% respectivamente.

Sistema integral tambor – pilas.

- Se determinó que 1.6% del Nitrógeno consumido durante el compostaje fue producto de la actividad microbiológica; el 18.5% restante se perdió en Nitrógeno Amoniacal, y sales de Amonio.
- La lixiviación de sales de Amonio durante en la etapa pulimiento, benefició que con el proceso integral la CE de la composta se ubicara en 3,982 $\mu\text{S}/\text{cm}$, cumpliendo con lo establecido en la norma $<4,000 \mu\text{S}/\text{cm}$ (DOF, 2007); por lo que en este parámetro no se presentarían restricciones para su uso como mejorador de suelos.
- Los metales pesados presentaron un comportamiento conservativo durante el compostaje, incrementándose solo 4.9% general, por lo que permanecieron dentro de los límites para biosólidos de tipo Excelente, por lo que podrían ser empleados en cualquier actividad como enmienda de suelos sin restricciones aplicables a este parámetro (DOF, 2002).

6.2.- Recomendaciones

- Dar la seguimiento a la estabilización de los lodos residuales de la PTAR de “Galerías Metepec”, para lograr alcanzar las características de un biosólido tipo A de acuerdo con la norma, facilitando de esta manera que la composta obtenida pueda ser usada dentro de las jardineras del centro comercial, sin restricciones de uso (DOF., 2002)
- Analizando las posibilidades de mejora de la técnica, se plantea el objetivo de variar la composición de los sustratos, incluyendo materiales con una alta degradabilidad, que beneficien el consumo microbiológico de la mezcla compostada, facilitando de esta manera que se alcance la fase termófila durante el proceso en el tambor rotatorio.
- Cuando no se alcanza el rango ideal en los contenidos microbiológicos, se sugiere realizar estudios para complementar la estabilización de la composta, mediante el vermicompostaje, tal como se propone en las investigaciones de García (2015), Caballero (2014), Peña (2014) y Kalamdhad y Kumar (2009).
- Plantear un Programa de Manejo de los Residuos Sólidos, con base en su generación y el periodo de tratamiento de aguas residuales en el centro comercial “Galerías Metepec” y su PTAR.

Anexo 1.- Cálculos

NITRÓGENO TOTAL KJELDHAL

La ecuación usada para calcular los contenidos de NTK durante el compostaje fue la siguiente:

$$NTK (mg/kg) = \frac{(T - B) \times 1.4}{S} \times 1000$$

Donde:

T: Ácido bórico usado en la titulación de la muestra (mL).

B: Promedio ácido bórico usado en la titulación de las alícuotas (mL).

S: Peso de las muestra (g).

1000: Factor de conversión.

1.4: Valor establecido como normalidad del ácido bórico.

Los cálculos realizados para determinar los contenidos de NTK se muestran a continuación.

Nitrógeno mezcla inicial		
	Muestras (T)	Blancos (B)
MUESTRA0	11	0.3
MUESTRA1	11.12	0.3
MUESTRA2	11.1	0.3
PROMEDIO	11.0733333	0.3
1.4		
TOTAL	30.1653333	
RESULTADO	30165.3333 mg/kg	

Nitrógeno tambor		
	Muestras (T)	Blancos (B)
MUESTRA0	9.7	0.3
MUESTRA1	9.8	0.3
MUESTRA2	9.6	0.3
PROMEDIO	9.7	0.3
1.4		
TOTAL	26.32	
RESULTADO	26320mg/kg	

Nitrógeno pulimiento		
	Muestras (T)	Blancos (B)
MUESTRA0	9	0.3
MUESTRA1	8.9	0.3
MUESTRA2	8.8	0.3
PROMEDIO (T)	8.9	0.3
1.4		
TOTAL	24.08	
RESULTADO	24080mg/kg	

CARBONO ORGANICO TOTAL

Los contenidos de COT observados durante el compostaje se calcularon usando la siguiente ecuación:

$$COT (mg/kg) = C \times 100000$$

Donde:

C: Promedio obtenido en la muestra y sus duplicados analizados en el COT (equipo) en g/kg.

100000: Factor de conversión, debido a que los contenidos se analizaron en .001 g de muestra.

Los contenidos de COT observados durante el compostaje fueron los siguientes.

COT mezcla inicial	
M1	4.217
M2	0
M3	4.175
PROMEDIO	4.196
100000	
RESULTADO	419600

COT tambor	
M1	4.137
M2	4.081
M3	4.049
PROMEDIO	4.089
100000	
RESULTADO	408900

COT pulimiento	
M1	4.035
M2	3.991
M3	4.102
PROMEDIO	4.042667
100000	
RESULTADO	404266.7

C/N

La ecuación usada para calcular la relación C/N durante el compostaje fue la siguiente.

$$C/N = \frac{COT}{NTK}$$

Donde:

C/N: Relación Carbono – Nitrógeno.

COT: Carbono Orgánico Total calculado (mg/kg).

NTK: Nitrógeno Total Kjeldhal calculado (mg/kg).

Las C/N calculadas durante el compostaje se muestran a continuación.

C/N mezcla inicial	
COT	419600
NTK	30165.3333
RESULTADO	13.9100071

C/N tambor	
COT	408900
NTK	26320
RESULTADO	15.5357143

C/N pulimiento	
COT	404266.7
NTK	24080
RESULTADO	16.78848

FÓSFORO OLSÉN

La ecuación usada para calcular los contenidos de Fósforo Olsén durante el compostaje fue la siguiente.

$$P \text{ (mg/kg)} = CC \times \frac{Vf}{A} \times \frac{Vi}{p} \times 1000$$

Donde:

CC: mg/L⁻¹ de P en la solución, obtenido del espectrofotómetro.

Vf: Volumen final de la solución (mL).

A: Alícuota del extracto (mL).

Vi: Volumen de la solución usada para hacer el extracto (mL).

p: Peso de la muestra (g).

1000: factor de conversión.

P mezcla inicial	
CC	0.0785mg/L
Vf	50ml
A	5ml
Vi	50ml
P	2.5g
RESULTADO	15.7x 1000
	15700 mg/kg

P tambor	
CC	0.097mg/L
Vf	50ml
A	5ml
Vi	50ml
p	2.5g
RESULTADO	19.4 x 1000
	19400 mg/kg

P pulimiento	
CC	0.1098mg/L
Vf	50ml
A	5ml
Vi	50ml
P	2.5g
RESULTADO	21.96 x 1000
	21960 mg/kg

Metales pesados

La ecuación usada para calcular los contenidos de metales pesados, durante el compostaje fue la siguiente.

$$M \text{ (mg/kg)} = \frac{V * S}{m} * 1000$$

Donde:

M: contenidos de metales pesados en mg/kg.

V: Valor registrado en el digestor (mg/L⁻¹).

S: Volumen de la solución usada (mL)

m: Peso de la muestra seca (g).

1000: Factor de conversión.

Los contenidos observados durante el compostaje se muestran a continuación.

Metales pesados mezcla inicial				
Metal	Valor	Solución	Muestra	Total
Cu	0.661	50	0.00025	132.2 mg/kg
Ni	0.111	50	0.00025	22.2 mg/kg
Pb	0.282	50	0.00025	56.4 mg/kg
Zn	1.462	50	0.00025	292.4 mg/kg

Metales pesados tambor				
Metal	Valor	Solución	Muestra	Total
Cu	0.69	50	0.00025	138 mg/kg
Ni	0.114	50	0.00025	22.8 mg/kg
Pb	0.287	50	0.00025	57.4 mg/kg
Zn	1.484	50	0.00025	296.8 mg/kg

Metales pesados pulimiento				
Metal	Valor	Solución	Muestra	Total
Cu	0.701	50	0.00025	140.2mg/kg
Ni	0.124	50	0.00025	24.8mg/kg
Pb	0.293	50	0.00025	58.6mg/kg
Zn	1.514	50	0.00025	302.8mg/kg

POTASIO

El Potasio fue analizado con la misma técnica que los metales pesados, aunque por las altas concentraciones detectadas fue necesario realizar diluciones, por lo que la ecuación usada para calcular los contenidos de K varió un poco respecto a la usada para los metales pesados.

$$K \text{ (mg/kg)} = \frac{V * S}{m * 1000} * (D)$$

Donde:

K: Contenido de Potasio en mg/kg.

V: Valor registrado en el digestor (mg/L⁻¹).

S: Volumen de la solución usada (mL).

m: Peso de la muestra seca (g).

D: Valor correspondiente a las diluciones realizadas a la alícuota inicial.

1000: Factor de conversión.

Los contenidos observados durante el compostaje fueron los siguientes.

K mezcla inicial						
Nutriente	Valor	Solución	Muestra	Total	Dilución	Resultado
K	0.621	50	0.00025	124.2 mg/kg	10 ²	12420

K tambor						
Nutriente	Valor	Solución	Muestra	Total	Dilución	Resultado
K	0.74	50	0.00025	148 mg/kg	10 ²	14800

K pulimiento						
Nutriente	Valor	Solución	Muestra	Total	Dilución	Resultado
K	0.761	50	0.00025	152.2mg/kg	10 ²	15220

ÍNDICE DE GERMINACIÓN

Las ecuaciones usadas para calcular el IG fueron las siguientes:

$$1. - PGR = \frac{\text{No. de semillas germinadas en el extracto}}{\text{No. de semillas germinadas en el testigo}} \times 100$$

$$2. - CRR = \frac{\frac{\text{Promedio elongación en el extracto}}{\text{No. de semillas germinadas}}}{\frac{\text{Promedio elongación en el testigo}}{\text{No. de semillas germinadas}}} \times 100$$

$$3. - IG = \frac{PGR \times CRR}{100}$$

IG Lechuga mezcla inicial			
C.S	0.6	Blanco	1.8
	1.2		1.4
	1.8		1.4
	1.6		1.8
	2		1.6
	1.4		1.9
	1.3		2.1
	1.5		2.5
			1.7
			1.5
SUMA	11.4		17.7
PROM.	1.425		1.77
PGR	80		
CRR	80.50847		
IG	64.40678		

IG Rábano mezcla inicial			
C.S.	0.9	Blanco	2.5
	1.2		2
	1.5		1.7
	1.7		2
	1.5		1.7
	2.3		0.5
	1.7		1
	1.3		1
			0.5
			0.1
SUMA	12.1		13
PROM.	1.5125		1.3
PGR	80		
CRR	116.3462		
IG	93.07692		

IG Lechuga tambor			
C.S.	1.7	Blanco	1.3
	1.4		1.6
	1.2		0.8
	1.3		2
	1.7		1
	1.9		1
	0.5		3.1
	1.5		2
	0.6		1
			0.8
SUMA	12		14.3
PROM.	1.3333		1.43
PGR	90		
CRR	91.3242		
IG	82.19178		

IG Rábano tambor			
C.S.	1.5	Blanco	2
	1.1		2.1
	0.9		1.3
	1.7		2
	1.7		2
	0.5		0.4
	2.3		1.4
	1.9		1
	1		0.2
			0.6
SUMA	12.6		13
PROM.	1.4		1.3
PGR	90		
CRR	107.6923		
IG	96.92308		

IG Lechuga final			
C.S.	2	Blanco	1.2
	2.5		1.3
	2		2
	1		1.5
	2		1.1
	0.8		0.7
	3.5		1
	0.6		4
	0.3		1.5
	0.9		2
SUMA	15.6		16.3
PROM.	1.56		1.63
PGR	100		
CRR	95.70552		
IG	95.70552		

IG Rábano pulimiento			
C.S.	2.7	Blanco	1
	1.9		1.6
	1.3		1.8
	1.1		3.1
	0.8		2.1
	0.5		0.9
	2		2
	1.4		1.1
	1		0.1
	1.7		0.7
SUMA	14.4		14.4
PROM.	1.44		1.44
PGR	100		
CRR	100		
IG	100		

Contenidos microbiológicos en la composta inicial reportados por CIESA



Formato de diagnóstico
Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia
Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Salud Animal (CIESA)
Área de diagnóstico



FECHA DE REMISIÓN:	28/04/2014
FECHA DE EMISIÓN:	08/05/2014
NÚMERO DE CASO:	A-207-14

L.CA JESÚS GARCÍA
GALERIAS METEPEC, MÉXICO
PRESENTE

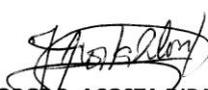
INFORME DEL AREA DE BACTERIOLOGÍA AISLAMIENTO DE SALMONELLA

Se procesó una muestra de lodo en base a la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental-lodos y biosólidos especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.

En la siguiente tabla se observan los datos correspondientes a la muestra remitida:

No.	TIPO DE MUESTRA
1	Lodo con pasto

DIAGNÓSTICO	Sin crecimiento de colonias, procesada mediante la técnica de cuantificación <i>Salmonella</i> spp por el número más probable, basada en la Nom-004-SEMARNAT.
-------------	---


DR. JORGE P. ACOSTA DIBARRAT
RESPONSABLE DEL DIAGNÓSTICO


DR. ROBERTO MONTES DE OCA JIMÉNEZ
COORDINADOR DEL CIESA



Nota: Resultados correspondientes a la mezcla inicial



FECHA DE REMISIÓN:	28/04/2014
FECHA DE EMISIÓN:	08/05/2014
NÚMERO DE CASO:	A-207-14

L.CA JESÚS GARCÍA
 PRESENTE

**INFORME DEL AREA DE PARASITOLOGÍA
 MÉTODO PARA LA CUANTIFICACIÓN DE HELMINTOS**

Se procesó una muestra de lodo en base a la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental-lodos y biosólidos especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.

Muestra remitida de Galerías Metepec, identificada como lodo residual de la PTAR mas pasto seco.

En la siguiente tabla se observan los datos correspondientes a la muestra remitida:

RESULTADO DIAGNOSTICO:

No.	MUESTRA	Peso	Huevecillos
1	Lodo con pasto	3 gr.	<i>Ancylostoma sp</i> (1)

Dx.	Una muestra positiva a <i>Ancylostoma sp</i> .
-----	--


 DR. ALBERTO BARBABOSA PLIEGO
 RESPONSABLE DEL DIAGNÓSTICO


 DR. ROBERTO MONTES DE OCA JIMÉNEZ
 COORDINADOR DEL CIESA



Nota: Resultados correspondientes a la mezcla inicial

Tambor rotatorio



Formato de diagnóstico

Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia

Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Salud Animal (CIESA)

Área de diagnóstico



FECHA DE REMISIÓN:	16/06/2014
FECHA DE EMISIÓN:	10/07/2014
NÚMERO DE CASO:	A-295-14

ING. JESÚS GARCÍA GONZÁLEZ
GALERIAS METEPEC, MÉXICO
PRESENTE

INFORME DEL AREA DE PARASITOLOGÍA MÉTODO PARA LA CUANTIFICACIÓN DE HELMINTOS

Se procesó una muestra de lodo en base a la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental-lodos y biosólidos especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.

Muestra remitida de Galerías Metepec, identificada como lodo residual de la PTAR más pasto seco.

En la siguiente tabla se observan los datos correspondientes a la muestra remitida:

RESULTADO DIAGNÓSTICO:

No.	MUESTRA	Peso	Huevecillos
1	Lodo residual	5.250 gr.	Negativo

Dx. Una muestra negativa a helmintos.


DR. ALBERTO BARBABOSA PLIEGO
RESPONSABLE DEL DIAGNÓSTICO


DR. ROBERTO MONTES DE OCA JIMÉNEZ
COORDINADOR DEL CIESA



Nota: Resultados correspondientes a la composta obtenida del tambor rotatorio



FECHA DE REMISIÓN:	16/06/2014
FECHA DE EMISIÓN:	09/07/2014
NÚMERO DE CASO:	A-295-14

ING. JESÚS GARCÍA GONZÁLEZ
 GALERIAS METEPEC, MÉXICO
 PRESENTE

**INFORME DEL AREA DE BACTERIOLOGÍA
 AISLAMIENTO DE SALMONELLA**

Se proceso una muestra de lodo en base a la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental-lodos y biosólidos especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.

En la siguiente tabla se observan los datos correspondientes a la muestra remitida:

No.	TIPO DE MUESTRA
1	Lodo residual

DIAGNÓSTICO	Sin crecimiento de colonias, procesada mediante la técnica de cuantificación <i>Salmonella</i> spp por el número más probable, basada en la Nom-004-SEMARNAT.
-------------	---


 DR. JORGE P. ACOSTA DIBARRAT
 RESPONSABLE DEL DIAGNÓSTICO


 DR. ROBERTO MONTES DE OCA JIMÉNEZ
 COORDINADOR DEL CIESA



Nota: Resultados correspondientes a la composta en tambor rotatorio

Anexo 2.- Resultados ANOVA

Resultados del análisis ANOVA del proceso tambor – pilas.

PARÁMETRO	F CALCULADA	F CRITICA	INTERPRETACIÓN
Nitrógeno	2061	9.5	La variación es estadísticamente significativa
Carbono	20698.7	9.5	La variación es estadísticamente significativa
C/N	18880.1	9.5	La variación es estadísticamente significativa
Humedad	45.5	9.5	La variación es estadísticamente significativa
pH	9.1	9.5	La variación no es estadísticamente significativa
Conductividad eléctrica	1624.2	9.5	La variación es estadísticamente significativa
IG rábano	95.1	9.5	La variación es estadísticamente significativa
IG lechuga	1251.3	9.5	La variación es estadísticamente significativa
Cu	9.4	9.5	La variación no es estadísticamente significativa
Ni	7.7	9.5	La variación no es estadísticamente significativa
Pb	8	9.5	La variación no es estadísticamente significativa
Zn	8.7	9.5	La variación no es estadísticamente significativa
P	47787.9	9.5	La variación es estadísticamente significativa
K	10211.7	9.5	La variación es estadísticamente significativa
Coliformes fecales	97575.5	9.5	La variación es estadísticamente significativa
Huevos de helminto	1	9.5	La variación no es estadísticamente significativa
<i>Salmonella ssp</i>	0	9.5	La variación no es estadísticamente significativa

*(F calculada mayor que F crítica muestra una variación estadísticamente significativa)

Resultados obtenidos del análisis ANOVA del compostaje en tambor rotatorio y en pilas estáticas

Parámetro	F calculada	F crítica	Interpretación
NTK	70864	18.5	La variación es estadísticamente significativa
COT	17.8	18.5	La variación es estadísticamente significativa
C/N	425.9	18.5	La variación es estadísticamente significativa
Humedad	7.1	18.5	La variación no es estadísticamente significativa
pH	40.5	18.5	La variación es estadísticamente significativa
Conductividad eléctrica	17.8	18.5	La variación no es estadísticamente significativa
IG rábano	0.2	18.5	La variación no es estadísticamente significativa
IG lechuga	0.4	18.5	La variación no es estadísticamente significativa
Cu	227880	18.5	La variación es estadísticamente significativa
Ni	107.5	18.5	La variación es estadísticamente significativa
Pb	28800	18.5	La variación es estadísticamente significativa
Zn	32224.3	18.5	La variación es estadísticamente significativa
Coliformes fecales	1137.8	18.5	La variación es estadísticamente significativa
Huevos de helmintos	0	18.5	La variación no es estadísticamente significativa
<i>Salmonella ssp</i>	0	18.5	La variación no es estadísticamente significativa

*(F calculada mayor que F crítica muestra una variación estadísticamente significativa)

ANEXO 3.- Clasificación de biosólidos

La NOM-004-SEMARNAT-2002 (DOF, 2002) establece una clasificación para Biosólidos y garantiza que el cumplimiento de las concentraciones exigidas para los contenidos de metales pesados en la composta, representa un impacto mínimo o nulo sobre el ambiente y la población (tabla 4.3).

Tabla 4.3 Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos (DOF, 2002).

CONTAMINANTE	EXCELENTES mg/kg en base seca	BUENOS mg/kg en base seca
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1 200	3 000
Cobre	1 500	4 300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2 800	7 500

Fuente: NOM-004SEMARNAT-2002 (DOF, 2002).

Respecto a los contaminantes microbiológicos evaluados (coliformes fecales, huevos de helminto y *Salmonella ssp*), la NOM-004-SEMARNAT-2002 (DOF, 2002) también establece una clasificación, mostrada en la tabla 4.4, en la que el impacto de estos factores es mínimo. La importancia de minimizar los contaminantes microbiológicos durante el compostaje tiene origen en el riesgo a la salud humana que representan altos contenidos en este parámetro.

Tabla 4.4 Indicador Clasificación microbiológica de Biosólidos (DOF, 2002)

(DOF, 2002), Biosólidos clase A		
Coliformes fecales NMP/g en base seca	Salmonella spp. NMP/g en base Seca	Huevos de helmintos/g en base seca
Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 1
(DOF, 2002) Biosólidos clase B		
Menor de 1000	Menor de 3	Menor de 10
(DOF, 2002) Biosólidos clase C		
Menor de 2,000,000	Menor de 300	Menor de 35

Fuente: NOM-004SEMARNAT-2002 (DOF, 2002)

De acuerdo con los contenidos microbiológicos y de metales pesados presentes en los biosólidos se establecen restricciones para su reutilización, con base en la NOM-004-SEMARNAT-2002 (DOF, 2002), la tabla 4.5.

Tabla 4.5 Aprovechamiento de biosólidos (DOF, 2002)

Tipo (metales pesados)	Clase (Contenidos microbiológicos)	Aprovechamiento
Excelente	A	<ul style="list-style-type: none"> • Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación. • Los establecidos para clases B y C.
Excelente o Bueno	B	<ul style="list-style-type: none"> • Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación. • Los establecidos para clase C.
Excelente o bueno	C	<ul style="list-style-type: none"> • Usos forestales. • Mejoramiento de suelos. • Usos agrícolas.

Fuente: NOM-004SEMARNAT-2002 (DOF, 2002)

7.- Bibliografía

- Acuña, R., (2008). Generalidades del sistema de lodos residuales. En Biotecnología Práctica y aplicada, fichas técnicas online: <http://bioreactorcrc.wordpress.com/2008/04/30/como-funciona-una-planta-de-lodos-activados/> (Consultado el 16 de Abril de 2014).
- Aledo, A., Rico, S., López A., (2010). Problemas ambientales, población y medio ambiente: <http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/2725/3/cap3.pdf> (Consultado el 01 de mayo de 2014).
- Ali, M., Bhatia, A., Kazmi, A., Madan, S., Pathania, R., Sahoo, J., (2013). Diversity of bacterial isolates during full scale rotary drum composting. *Waste Management*. 33: 1595-1601.
- Alonso, M., Constans, A., Martí C., (2011). Estaciones depuradoras de aguas residuales: riesgo biológico. Instituto Nacional de Seguridad Higiene y Trabajo, España: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/401a500/ntp_473.pdf (Consultado el 17 de Abril de 2014).
- Álvarez, J., (2009). Manual de compostaje para agricultura ecológica. Consejería de agricultura y pesca, Panamá: http://www.cienciasmarinas.uvigo.es/bibliografia_ambiental/agricultura_ecologica/Manual%20compostaxe.pdf (Consultado el 16 de Abril de 2014).
- Atiyeh, R., Lee, S., Edwards, C., Arancon, N., Metzger, J., (2002). The influence of humic acids derived for earthworm-processed organic wastes on plant growth. *Bioresource Technol.* 84: 7-14.
- Barrios, J., (2009). Aspectos generales del manejo de lodos. Academia de Ingeniería de México. Talleres online: <http://academiadeingenieriademexico.mx/archivos/talleres/aprovechamiento-lodos/Aspectos%20Generales%20del%20Manejo%20de%20Lodos.pdf> (Consultado el 17 de Abril de 2014).
- Bathia, A., Madhan, S., Sahoo, J., Mountjer, A., Pathania, R., Kazmi, A. (2013). Diversity of bacterial insulates during full scale rotary drum composting. *Waste management*. 33: 1529-1601

- Caballero, J. (2012). Estudio de los efectos de la densidad de lombriz y la relación superficie/volumen en un vermireactor *de alta tasa*, alimentado con lirio acuático seco y lodo residual precomposteados. Tesis Doctoral en Ciencias del Agua. Centro Interamericano de Recursos del Agua. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de México. México.
- Jiménez, M., Caballero, J., Chávez M., (2016). Estudio sobre diversas compostas con lirio acuático (*E. Crassipes*) y lodo residual. Libro, Congreso FIUAEMex: 51 – 55.
- Calderón, E., Marín, A., Ticante, A., Torres, I., (2010). Caracterización de compostas, lombricompostas y su potencial uso en enmiendas de suelo y producción de cultivos. BUAP. Puebla, México. 2-8.
- Cariello, M., Castañeda L., Riobo I., González J., (2007). Inoculante de microorganismos endógenos para acelerar el proceso compostaje de residuos sólidos urbanos. *Soil Science Plant Nutrition*:26–37.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2009). Situación del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento. SEMARNAT Edición 2009, México: 167-207.
- Cooperband, L., (2007). Departamento de Ciencias de Suelo, Universidad de Wisconsin-Madison; Cornell State University, USA. “The Science and Engineering of Composting.” Apuntes de clase Online: www.wastenotorganics.wisc.edu/05composting/presentations/spanish/biologiadelcompostaje.pdf (Consultado 16 de febrero de 2014).
- Daza, R., González, A., (2008). Factores que condicionan el proceso de compostaje. Universidad Autónoma Metropolitana (UAM). Apuntes. Licenciatura en Ciencias de la Tierra, México
- DOF. (2000). NOM-0021-SEMARNAT-2000. Protección ambiental. Lodos y Biosólidos. Establece las especificaciones de la fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. México.
- DOF. (2001). NMX-AA-026-SCFI-2001. Análisis del agua-determinación de Nitrógeno Total Kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. México.

- DOF. (2002). NOM-004-SEMARNAT-2002). Lodos y Biosólidos. Especificaciones y límites máximos Permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.
- Emino, E., Warman, P. (2004). Biological assay for compost quality. *Compost Science & Utilization* 12: 342-348.
- Emmoth, E., Ottoson, J., Albiñ, A., Belak, S., Vinnerås, B., (2011). Ammonia disinfection of hatchery waste for elimination of single-stranded RNA viruses. *Appl. Environ Microb.* 77:3960–3966
- Fernández, F., Sánchez, V., Rodríguez, L., y Villaseñor, J. (2012). Feasibility of composting combinations of sewage sludge, olive mill waste and winery waste in a rotatory drum reactor. *Waste Management* 30: 1948–1956.
- Ferrini, F., Saebo, A., (2006). The use of compost in urban Green areas - A review for practical application. *Urban forestry and urban greening.* 4: 159-169.
- Fidjeland, J., Magri, M.E., Jönsson, H., Albiñ, A., Vinnerås, B., (2013). The potential for self sanitisation of faecal sludge by intrinsic ammonia. *Water Resource* 47:6014–6023.
- Franco, L., (2004). Sintesis Historica del tratamiento de aguas residuales. UAM, apuntes online: Aguatratada.docENVI:envia.xoc.uam.mx/tid/investigaciones/A/Agua%20tratada.doc. (Consultado el 13 de febrero de 2014).
- García, C., (2015). Avances de Tesis: Reutilizacion de residuos: Compostaje-lombricompostaje de lodo residual y recortes de jardín. Tesis Maestría en Ciencias del Agua. Centro Interamericano de Recursos del Agua. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de México. México.
- Gajalakhmi, R., (2001). Potential of two epigenic and two anecic earthworm species in vermicomposting of wather hyacinth. *Bioresource technology* 76: 177-181.
- GGEM. (2006). Norma Estatal Ambiental, NTEA-010-SMA-RS-2008. Establece los requisitos y especificaciones para la instalación, operación y mantenimiento de infraestructura de acopio, transferencia, separación y tratamiento de residuos solidos urbanos y de manejo especial para el Estado de México.

- González, C., Martínez, S., Méndez J., (2008). Supervivencia de bacterias fecales en lodos residuales deshidratados tratados con Amoniaco. Universidad Autónoma Metropolitana, México D.F., Revista Mexicana de Ingeniería Química, (7), 229 – 235.
- Hait, S., y Tare, V., (2011). Optimizing vermistabilization of waste activated sludge using vermicompost as bulking material. Waste Management. 55: 502-511.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México). (2017). Estadísticas e indicadores sobre el territorio: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/temas/default.aspx?s=est&c=23824> (Consultado el 01 de mayo de 2017).
- Kalamdhad, A., Kazmi, A., Khwairakpam, M., Muntjeer, A., Singh, Y. K., (2008). Rotary drum composting of vegetable waste and tree leaves. Bioresource Technology 100: 6442-5450.
- Kalamdhad, A., Kazmi A., Singh K., (2009). Maturation of primary stabilized compost from rotary drum. Resource, Conservation and Recycling 53: 386–392
- Kalamdhad, A., y Kazmi, A. (2009). Effects of turning frequency on compost stability and some chemical characteristics in a rotatory drum composter. Chemosphere 74: 1327-1334.
- Kalamdhad, A., Kumar, A., (2014). Feasibility of composting combinations of sewage sludge, cattle manure, and sandwst in a rotary drum. Environmental Engenergy Research 19: 47-57.
- Kalamdhad, A., Singh, K., (2013). Assessment of bioavailability of heavy metals during rotary drum composting of Green waste. Ecological Engeneering. 52: 59-69.
- Lahera, V., (2010). Infraestructura sustentable: las plantas de tratamiento de aguas residuales. Quivera 2: 58-69.
- Lazaridi, C., Quintero, R., Martín C. (2006). Comparision and effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure. Chemosphere 22: pp. 1013-1019.
- Martínez, I., Pineda, J., Totosaus, A., (2013). Compostas 2. Evaluación de la presencia de metales pesados en compostas. Universidad Simón Bolívar. Ecatepec, México: 91-99.

- Martínez, M., Pantoja, A., Román, P., (2013). Manual de compostaje del agricultor. Experiencias de América Latina. ONU. Santiago de Chile. 17: 26-63
- Meira, P., (2008). Elogio a la educación ambiental. Quivera 12: 41-51.
- Mendoza, M., Rojas, J., (2011). Efectos de las enmiendas orgánicas sobre las propiedades físicas del suelo con especial referencia a la adición de lodos urbanos. Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal. Vol VI, No. II: 1-12
- Navarro, R., (2008). Manual Para hacer composta aerobica. Amigos de la tierra, El salvador (CESTA). Online: <http://www.basuracero.org/sitio/admin/archivos/composta.pdf>
- Naím, M., (2010). Compostaje Ecológico. Diario el país. Noticias online: <http://perseo.sabuco.com/historia/crecimientopoblacion.pdf> (Consultado el 01 de mayo de 2014).
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación), (2011). Agua limpia para un mundo sano de FAO. Online: <http://www.rlc.fao.org/en/press/news/dia-mundial-del-agua-2011-agua-limpia-para-un-mundo-sano/>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación), (2012). Taller-Técnicas de compostaje, FAO Praguay. Online: <http://www.fao.org/rioplus20/319970da60267864c68bab5a31650c534b25a3.jpg> (Consultado el 11 de febrero de 2014).
- Peña, P., (2014). Efecto de la proporción adicionada y la presentación de lirio acuático (seco y libre de ácidos grasos volátiles) sobre la composta de lodo residual municipal. Tesis Maestría en Ciencias del Agua. Centro Interamericano de Recursos del Agua. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de México. México.
- Ravera, R., y De Sanso., A., (2003). "Lombricultura." Buenos Aires, Argentina. Online: www.agroconnection.com/specialites/5054A00281.htm. (Consultado el 26 de febrero de 2014)
- Rodríguez, L., Cerrillo, M. I., Villaseñor, J. y García, V. (2012). Domestic Sewage sludge composting in a rotary drum reactor optimizing the thermophilic stage. *Journal of Environmental Management* 112:284–291

- Silva., V., J. P., López M., P., y Valencia, A., P., (2009). Recuperación de nutrientes en fase sólida a través del compostaje. Tesis Licenciatura. Facultad de Ingeniería, Licenciatura en Ciencias de la Tierra, PAHO, Colombia.
- Sinha, R., Agarwal, S., Chauhan, K., Chandran, V., Soni, B., (2010). Vermiculture technology: reviving the dreams of sir Charles Darwin for scientific use of earthworms in sustainable development programs. *Technol. Investments* 3: 155–172.
- Tello, A, Jimenez, M.C, Sanchez, G., (2015). Management of sewage sludge by composting, using fermented Water Hyacinth. *Environmental Science Pollution Resource*. 14781 – 14792.
- Tiquia, S., M., (2000). Evaluating phytotoxicity of pig manure from the pig on litter system. En: P.R. Warman y B.R. Taylor, Ed., *Proceedings of the International Composting Symposium*, CBA Press Inc. Truro, NS, p:625-647.
- Tognetti, C., Mazzarino, M., Laos, F., (2007). Improving the quality of municipal organic waste compost. *Bioresource Technology*. 98: 1067-1076.
- Varnero, M., Rojas, C., Orellana, R. (2007). Índices de fitotoxicidad en residuos orgánicos durante el compostaje. *Ciencias del suelo y nutrición Vegetal*, 7: pp. 28-37.
- Vento, M., D., (2008). Estudio sobre la preparación de compost Estático y su Calidad. Tesis Licenciatura. Licenciatura en Ciencias de la Tierra. UAM. México.
- Wong, J., Selvam, L., (2006). Efectos de la materia orgánica disuelta de los lodos y compost en suelos. *Revista Calidad Ambiental*: pp. 878-883.
- Zirbes, Q., R., Dufey, J., Khanh, P., Nghia, H., Lebailly, P., Francis, F., y Haubruge, E., (2011). "Valorisation of a water hyacinth in vermicomposting using an epigeic earthworm *Perionyx excavatus* in Central Vietnam." *Biotechnol. Agron. Soc. Environ*. 15: 85-93.
- Zucconi, F., Pera, A., Forte, M., De Bertoli, M., (1981). Evaluating toxicity in immature compost. *Biocycle*. 22:54 - 57.

