



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

TRATAMIENTO DE LODOS DE PROCESO DE UN
COMPLEJO PETROQUÍMICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN INGENIERÍA

INGENIERÍA AMBIENTAL - AGUA

P R E S E N T A:

KARLA PAOLA GONZÁLEZ ALVARADO

TUTORA:

M.C. LINA MARIA CARDOSO VIGUEROS



2007

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dr. Simón González Martínez.

Secretario: M.C. Landy Irene Ramírez Burgos.

Vocal: M.C. Lina Maria Cardoso Vigueros.

1^{er}. Suplente: Dra. Georgina Fernández Villagómez.

2^{do}. Suplente: Dra. Rosa María Ramírez Zamora.

Lugar donde se realizó la tesis:

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)

Jiutepec, Morelos, México

TUTOR DE TESIS:

M.C. Lina María Cardoso Vigueros

AGRADECIMIENTOS

Los estudios de maestría se desarrollaron gracias al apoyo económico otorgado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), este apoyo fue fundamental para concluir mis estudios.

A la Dirección General de Estudios de Posgrado de la UNAM (DGEP) por el complemento de beca que me otorgaron durante los dos años de la maestría.

A mi asesora de tesis la M.C. Lina Cardoso por su gran apoyo y contribución en la realización de este trabajo.

A mis sinodales: Dr. Simón González, M.C. Landy Irene Ramírez, Dra. Georgina Fernández Villagómez y Dra. Rosa María Ramírez; por haber dedicado su tiempo en la revisión, así como por todos sus comentarios y observaciones para el mejoramiento de esta tesis.

A la subcoordinación de tratamiento de aguas residuales del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) por todas las facilidades otorgadas para la realización de esta tesis.

Con mucho cariño principalmente a mis padres Gracia y Jorge, que me dieron la vida y han estado conmigo en todo momento

A mis hermanos Omar, Adi y Xo, apoyarme siempre, los quiero mucho.

A mi tío Toño y mi tía Yola por su gran apoyo durante todo este tiempo, gracias.

A mi tía Laura y mi tía Rosa Elena, gracias por su ayuda.

A Martha Jiménez por estar siempre conmigo en todo momento.

A mis compañeros de la maestría: Octavio, Mariana y Alejandro.

A todos los amigos que encontré en Cuernavaca: Ivonne, Chayo, Kenia, Fabiola, Ana Laura, Arturo, José, Pauline, Darío, Ramses, Carlos, Liliana, Edson.

A mis maestros, Esperanza Ramírez, Petia Mijaylova, Lourdes Rivera, Manuel Sánchez, gracias por todo.

A ti Juan Ignacio por haber aparecido en mi vida y siempre darme tu apoyo.

ÍNDICE

ÍNDICE	I
ÍNDICE DE TABLAS	II
ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE GRAFICAS	IV
LISTA DE NOMENCLATURA Y ABREVIATURAS	V
RESUMEN	VI
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	2
1. ANTECEDENTES	3
1.1. Fuente de contaminación	3
1.2. Tecnologías de tratamiento de lodos.....	4
1.2.1. Vermicomposteo como tratamiento biológico	6
1.2.1.1. Tipos de lombrices.....	7
1.2.1.2 Taxonomía de <i>Eisenia foetida</i>	9
1.2.1.3 Características externas.....	9
1.2.1.4 Factores que influyen en el comportamiento de las lombrices.....	11
1.2.2.Descripción del sistema de vermicomposteo	13
1.3. La lombriz y los contaminantes.....	15
1.4. Sistemas de disposición.....	17
1.5. Marco legal.....	19
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	22
2.1. Caracterización de lodo de la petroquímica, municipal y basura de jardín	22
2.2. Bioensayos	23
2.2.1. Prueba de sobrevivencia o P50L.....	24
2.2.2. Descripción de la prueba de velocidad de degradación	25
2.3. Pruebas piloto	27
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	30
3.1. Caracterización.....	30
3.2. Bioensayos.....	31
3.3. Pruebas piloto.....	42
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	49
ANEXO I	51
ANEXO II	53
ANEXO III	54
ANEXO IV	57
REFERENCIAS	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Número de instalaciones petroquímicas que se encuentran en operación para la producción de derivados clorados.....	3
Tabla 1.2	Ventajas y desventajas de tecnologías para el tratamiento de lodos.....	6
Tabla 1.3	Clasificación zoológica de <i>Eisenia foetida</i>	9
Tabla 1.4	Morfología de <i>Eisenia foetida</i>	9
Tabla 1.5	Condiciones ambientales para la sobrevivencia de <i>Eisenia foetida</i> (Bollo, 2001)	13
Tabla 1.6	Estudios realizados para evaluar la asimilación de hidrocarburos, plaguicidas entre otros por organismos del genero <i>Lumbricus</i> y <i>Eisenia</i> (Contreras, 2004)	17
Tabla 1.7	Ventajas y desventajas de los sistemas de disposición de lodos y biosólidos.....	18
Tabla 1.8	Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos	19
Tabla 1.9	Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos	20
Tabla 1.10	Aprovechamiento de biosólidos	20
Tabla 2.1	Parámetros de caracterización	23
Tabla 2.2	Factores del proceso de la prueba de sobrevivencia y sus niveles.....	24
Tabla 2.3	Parámetros de caracterización en la prueba de sobrevivencia o P50L	24
Tabla 2.4	Parámetros de la caracterización final de la vermicomposta	29
Tabla 3.1	Caracterización de los diferentes lodos y la basura de jardín	30
Tabla 3.2	Resultados de análisis CRETIB en los diferentes lodos	31
Tabla 3.3	Resultados de la prueba de sobrevivencia o P50L en 24 hrs.....	32
Tabla 3.4	Nomenclatura de los tratamientos realizados en la prueba de sobrevivencia.....	33
Tabla 3.5	Probabilidades para la distribución normal.....	35
Tabla 3.6	Características del nuevo lote de lodo de petroquímica con diferentes porcentajes de concentración	39
Tabla 3.7	Relación L:L de los lotes A, B y C.....	42
Tabla 3.8	Diferentes densidades de siembra de lombrices en las pruebas piloto para un sistema de vermicomposteo de lodo de proceso de la industria petroquímica.....	43
Tabla 3.9	Resumen de los parámetros iniciales y finales de sistemas pilotos de vermicomposteo para el tratamiento de lodo de proceso de un complejo petroquímico con diferentes densidades de lombrices.....	46
Tabla 3.10	Porcentajes de reducción de CE, pH y la relación STV/ST en el tratamiento de lodo de proceso de un complejo petroquímico con diferentes densidades de lombrices	46
Tabla 3.11	Micronutrientes y macronutrientes presentes en los lotes A, B y C en las pruebas piloto	47
Tabla 3.12	Coliformes fecales y Huevos de Helminto presentes en los lotes A,B y C	47
Tabla A.1	Prueba P50L. pH Tiempo de pre-estabilización 10 y % de LP = 10. Mezcla 1	57
Tabla A.2	Prueba P50L. Conductividad. Tiempo de pre-estabilización 10 y % de LP = 10. Mezcla 1	57
Tabla A.3	Prueba P50L. pH Tiempo de pre-estabilización 20 y % de LP = 10. Mezcla 1	57
Tabla A.4	Prueba P50L. Conductividad. Tiempo de pre-estabilización 20 y % de LP = 10. Mezcla 1	57
Tabla A.5	Prueba P50L. pH Tiempo de pre-estabilización 10 y % de LP = 30. Mezcla 1	57
Tabla A.6	Prueba P50L. Conductividad. Tiempo de pre-estabilización 10 y % de LP = 30. Mezcla 1	57
Tabla A.7	Prueba P50L. pH Tiempo de pre-estabilización 20 y % de LP = 30. Mezcla 1	57
Tabla A.8	Prueba P50L. Conductividad. Tiempo de pre-estabilización 20 y % de LP = 30. Mezcla 1	57
Tabla A.9	Prueba P50L. pH Tiempo de pre-estabilización 10 y % de LP = 10. Mezcla 2	58
Tabla A.10	Prueba P50L. Conductividad. Tiempo de pre-estabilización 10 y % de LP = 10 Mezcla 2	58
Tabla A.11	Prueba P50L. pH Tiempo de pre-estabilización 20 y % de LP = 10. Mezcla 2	58

Tabla A.12	Prueba P50L. Conductividad. Tiempo de pre-estabilización 20 y % de LP = 10. Mezcla 2	58
Tabla A.13	Prueba P50L. pH Tiempo de pre-estabilización 10 y % de LP = 30. Mezcla 2	58
Tabla A.14	Prueba P50L. Conductividad. Tiempo de pre-estabilización 10 y % de LP = 30. Mezcla 2	58
Tabla A.15	Prueba P50L. pH Tiempo de pre-estabilización 20 y % de LP = 30. Mezcla 2	58
Tabla A.16	Prueba P50L. Conductividad. Tiempo de pre-estabilización 20 y % de LP = 30. Mezcla 2	58
Tabla A.17	Parámetros de control en la prueba P50L de la mezcla 1: LP+LM.....	59
Tabla A.18	Parámetros de control en la prueba P50L de la mezcla 2: LP+LM+MA.....	59
Tabla A.17	Resultados obtenidos durante la prueba de velocidad de degradación en el lote A.....	61
Tabla A.18	Resultados obtenidos durante la prueba de velocidad de degradación en el lote B.....	61
Tabla A.19	Resultados obtenidos durante la prueba de velocidad de degradación en el lote C.....	61
Tabla A.20	Resultados obtenidos durante la prueba de velocidad de degradación en el lote Blanco	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Vista general de una lombriz (Shuldt,2004).....	9
Figura 1.2	Tercio anterior. Aparato digestivo, Sistema nervioso y excretor (Shuldt,2004).....	10
Figura 1.3	Resumen de los procesos involucrados entre los contaminantes, suelo y las lombrices (Langdon,2003)	16
Figura 2.1	Etapas del desarrollo experimental	22
Figura 2.2	Unidades experimentales a escala laboratorio en la prueba de sobrevivencia con las mezclas propuestas.....	25
Figura 2.3	Sistema de vermicomposteo a escala piloto.....	27
Figura 2.4	Extractor de muestra para el conteo de lombrices	28
Figura 3.1	Lombrices con 24 horas de exposición al lodo de petroquímica. La figura A es con porcentaje del 10% y la figura B de 30%.....	32
Figura 3.2	Comportamiento del pH de los 8 tratamientos durante la prueba de sobrevivencia.....	33
Figura 3.3	Comportamiento de la conductividad eléctrica de los 8 tratamientos durante la prueba de sobrevivencia.....	34
Figura 3.4	Gráfica de Pareto.....	35
Figura 3.5	Gráfica de probabilidad normal de los efectos estandarizados.....	36
Figura 3.6	Gráfica de contornos.....	36
Figura 3.7	Gráfica de superficie respuesta. Interacción entre lombrices vivas, porcentaje de lodo de petroquímica y tiempo.....	37
Figura 3.8	Gráfica de superficie respuesta. Interacción entre lombrices vivas, porcentaje de lodo de petroquímica y tipo de mezcla.....	37
Figura 3.9	Gráfica de superficie respuesta. Interacción entre lombrices vivas, tiempo de pre-estabilización de petroquímica y tipo de mezcla.....	38
Figura 3.10	Porcentaje de ST en la prueba de velocidad de degradación a escala laboratorio.....	40
Figura 3.11	Porcentaje de STV en la prueba de velocidad de degradación a escala laboratorio.....	40
Figura 3.12	Porcentaje de STV/ST en la prueba de velocidad de degradación a escala laboratorio...	40
Figura 3.13	pH obtenido en la prueba de velocidad de degradación a escala laboratorio.....	41
Figura 3.14	CE obtenido en la prueba de velocidad de degradación a escala laboratorio.....	41
Figura 3.15	Porcentaje de humedad durante el desarrollo de la prueba de velocidad a escala laboratorio	42
Figura 3.16	pH en tres lotes con diferentes densidades de lombrices a escala piloto.....	44
Figura 3.17	CE en tres lotes con diferentes densidades de lombrices a escala piloto.....	44
Figura 3.18	Porcentaje de ST en tres lotes con diferentes densidades de lombrices a escala piloto.....	45
Figura 3.19	Porcentaje de STV en tres lotes con diferentes densidades de lombrices a escala piloto.....	45
Figura 3.20	Relación STV/ST tres lotes con diferentes densidades de lombrices a escala piloto.....	45
Figura 3.21	Porcentaje de humedad en tres lotes con diferentes densidades de lombrices a escala piloto.....	45

NOMENCLATURA Y ABREVIATURAS

%	Porcentaje
B.S.	Base seca
BPCs	Bifenilos policlorados
cal	Calorías
cm.	Centímetros
col.	Colaboradores
COT	Carbono orgánico total
CRETIB	Corrosividad, Reactividad, Explosividad, Toxicidad al ambiente, Inflamabilidad, Biológico-Infecioso
Cu	Cobre
DCE	Dicloroetano
E.	Eisenia
CE	Conductividad eléctrica
Fe	Hierro
g	Gramos
HPAs	Hidrocarburos poliaromáticos
IIE	Instituto de Investigaciones Eléctricas
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
K	Potasio
kg	Kilogramo
L	Litro
L:L	Relación lodo: lombrices
LGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente
LM	Lodo generado en una planta de tratamiento de aguas municipales
LMP	Límite máximo permisible
LP	Lodo de proceso de la industria petroquímica
m ²	Metros cuadrados
m ³	Metros cúbicos
MA	Material acondicionador
MCV	Monómero de Cloruro de Vinilo
mg	Miligramos
Mg	Magnesio
mm	Milímetros
mS	Milisiemens
NMP	Número más probable.
NMX	Norma Mexicana
NOMs	Normas Oficiales Mexicanas
NTK	Nitrógeno total Kjendahl
°C	Grado centígrado
p	Probabilidad para la distribución normal
PEMEX	Petróleos Mexicanos
P50L	Prueba de sobrevivencia
pH	Potencial de hidrógeno
PT	Fósforo Total
PVC	Polivinilo de cloruro
ST	Sólidos Totales
STV	Sólidos Totales Volátiles
Y	Lombrices vivas
Zn	Zinc

INTRODUCCIÓN

A partir de la producción en gran escala de derivados del petróleo, en nuestro país se han generado desde hace más de cincuenta años residuos que a medida que se fueron incrementando y se han convertido en un problema serio por resolver de parte de las empresas petroleras.

Estos residuos se han podido clasificar por fuente y tipo de contaminante en las siguientes formas: a) Lugares contaminados por descargas de refinerías y petroquímicas, b) tiraderos de desechos semisólidos c) suelo contaminado por derrames en las tuberías y d) Lodos de perforación y de proceso. La política de las empresas petroleras ha sido hasta la fecha la de confinar estos desechos o bien llevarlos a presas construidas especialmente para estos residuos y eventualmente recolectarlos para tratamiento.

Las petroquímicas que se dedican principalmente a la producción de derivados intermedios del petróleo, en sus plantas de proceso generan desechos sólidos que contienen compuestos orgánicos los cuales requieren un tratamiento adecuado antes de su disposición final. Estos lodos reciben como pretratamiento una evaporación y centrifugación con el fin de recuperar los compuestos orgánicos, para reciclarlos al proceso y disminuir el volumen de lodos que deben llevarse a un tratamiento final. Después de estos procesos queda un residuo o lodo al cual debe someterse a un tratamiento posterior para reducir los compuestos orgánicos remanentes a los niveles exigidos por la normatividad mexicana para después darles un uso o seleccionar la forma de disposición final.

Debido a esta problemática en este estudio se evaluó el tratamiento biológico del lodo de proceso por medio del vermicomposteo con *Eisenia foetida* para obtener como resultado un biosólido que pueda ser usado como mejorador de suelos contaminados por derrames de hidrocarburos debido a su alto contenido de materia orgánica y microorganismos.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el tratamiento de lodos de proceso de un complejo petroquímico utilizando *Eisenia foetida* en un sistema de vermicomposteo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Caracterizar el lodo de proceso proveniente de la industria petroquímica, lodo proveniente de un sistema de tratamiento de agua residual municipal y basura de jardín mediante análisis fisicoquímicos.

Evaluar el mejor medio para la producción de vermicomposta con *Eisenia foetida* utilizando diferentes concentraciones de lodo de petroquímica, tiempo de pre-estabilización y material acondicionar.

Estudiar el efecto de diferentes densidades de lombrices en un sistema a escala piloto utilizando el mejor medio para la producción de vermicomposta.

META

Obtener un biosólido que por sus características sea utilizado como mejorador de suelos contaminados cumpliendo con los límites máximos permisibles exigidos por la normatividad mexicana.

1. ANTECEDENTES

1.1. Fuente de contaminación

En México existe actualmente una gran cantidad de sitios contaminados con diferentes tipos de compuestos orgánicos, debido a las actividades antropogénicas principalmente de la industria petroquímica, además de la disposición clandestina y derrames de residuos peligrosos.

En el caso particular de la industria Petroquímica en México, sus plantas de procesamiento se concibieron y diseñaron principalmente en el periodo 1976-1985, y posteriormente se han introducido mejoras tecnológicas para aumentar la capacidad de procesamiento, haciendo más eficiente su operación y abatimiento el impacto ambiental de sus emisiones. Sin embargo, por la ausencia de inversiones significativas, sólo se han agregado innovaciones tecnológicas marginales y no se han incorporado las innovaciones en tecnologías de proceso que se han dado en el mundo en los últimos 15 años. Esto se refleja en una eficiencia operativa menor respecto de plantas modernas y como consecuencia de esta baja eficiencia en la producción se generan residuos líquidos y sólidos los cuales no reciben un adecuado tratamiento final para su reúso o disposición (Chapela, 2001).

En el sur del estado de Veracruz, se encuentran instalados los principales complejos petroquímicos, quienes producen más del 80% de los productos petroquímicos del país. Estas plantas se utilizan para la producción de derivados clorados como lo son; el Dicloroetano y el Ácido clorhídrico que aunado al Etileno, son materias primas para la producción de Cloruro de vinilo, utilizado a su vez para la fabricación de P.V.C., fibras sintéticas y juguetes; el Acetaldehído, como materia prima para la elaboración de ácido acético, acetatos de etilo y de vinilo, y butadieno entre otros, existiendo una planta para la elaboración de metil terbutil éter. En la tabla 1.1 se encuentran las instalaciones que actualmente en operan.

Tabla 1.1 Número de instalaciones petroquímicas que se encuentran en operación para la producción de derivados clorados.

Instalación	Cantidad
De proceso	4
De servicios auxiliares	3
Almacenamiento y llenaderas	2
Tratamiento de efluentes	1

Fuente: IMTA, 2002.

Las plantas de procesos son: Planta criogénica, Planta de etileno II, Planta de dicloroetano por cloración directa y Planta de cloruro de vinilo III.

Y los productos que se obtienen son: Metano, etano e hidrocarburos licuables para Petroquímica gas y Petroquímica básica y etileno, cloruro de vinilo, dicloroetano y ácido muriático para PEMEX Petroquímica.

La Planta de Cloruro de Vinilo III tiene como función la producción de Monómero de Cloruro de vinilo (MCV), utilizando el proceso de desintegración térmica del dicloroetano (DCE), el cual se produce en la planta por oxidación y cloración directa del etileno.

En esta planta se generan residuos en forma de lodos. Se producen 21 ton/año de lodos con finos de catalizador y 690 Ton/Año de lodos de limpieza de equipos/drenajes (IMTA, 2002).

Los cuales son recuperados y almacenados en tambores que se acumulan en el almacén de residuos.

1.2. TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO DE LODOS

Actualmente las tecnologías que se utilizan para el tratamiento de lodos se basan en técnicas de remediación que son desarrolladas para disminuir el contenido de diferentes niveles de toxicidad, involucrando metodologías químicas, físicas o biológicas, con el objetivo de reducir la toxicidad, movilidad o volumen del material contaminado (Davies y col., 2002).

1) Tratamiento fisicoquímico

Utiliza las propiedades físicas y químicas de los contaminantes o del medio contaminado para separar o contener la contaminación (Reacciones de hidrólisis, oxidación, reducción, solubilización).

Uno de los tratamientos fisicoquímicos de lodos es la estabilización con cal en el cual se agrega suficiente cal al lodo residual hasta alcanzar un pH 12 con 2 horas de contacto (USEPA, 2003). La estabilización con cal es uno de los procesos más utilizados para el tratamiento de lodos, después de la digestión anaerobia y la aerobia (Jiménez, 2001).

2) Tratamiento Térmico

Utiliza calor para incrementar la volatilidad (separación), quemar, descomponer o fundir (inmovilización) los contaminantes (Volkes y col., 2002).

El secado térmico es usado para reducir patógenos y el contenido de agua en el lodo residual. El lodo residual es secado por el contacto directo o indirecto de gases calientes para reducir el contenido de humedad en un

10% o menos. La temperatura de las partículas del lodo residual exceden los 80°C, esto reduce los patógenos, virus, bacterias y huevos de helminto a bajos niveles detectables.

El proceso de tratamiento térmico es usado para desinfectar lodo residual y reducir patógenos a bajos valores detectables. El proceso involucra el calentamiento del lodo residual a bajas presiones por periodos cortos de tiempo.

Otro tratamiento son los lechos de secado en el cual al aire libre se secan parcialmente los lodos residuales digeridos. El lodo residual generalmente se aplica en lechos o camas de secado con una altura de 23 centímetros y el tiempo en el cual el lodo se seca es en un mínimo de 3 meses (USEPA, 2003).

3) Tratamiento Biológico

Utiliza los microorganismos ya sean aerobios o anaerobios para la degradación, transformación o remoción de contaminantes de tipo orgánico a productos menos tóxicos. Algunos tratamientos biológicos aplicados actualmente son la digestión aerobia, digestión anaerobia, composteo, vermicomposteo¹.

La digestión aerobia en la cual los lodos residuales son oxidados bioquímicamente por bacterias en un reactor abierto o cerrado; para suministrar a estos microorganismos aerobios el suficiente oxígeno, el lodo es agitado por mezclado o por la inyección de aire. Bajo condiciones apropiadas de operación los sólidos volátiles en el lodo residual son convertidos a dióxido de carbono, agua y nitratos (USEPA, 2003). Los digestores aerobios son aplicables a lodos biológicos. Es una continuación del proceso de aeración tomando los subproductos del sedimentador secundario y del espesamiento (Jiménez, 2001). Castaldi y Ford (1992) estudiaron la biodegradación a escala laboratorio de lodos residuales producidos en la industria petroquímica mediante un reactor batch de bioxidación, concluyeron que el mecanismo aparente para la remediación de estos desechos involucra una disolución inicial de los residuos constituyentes en la fase acuosa seguidos por la biodegradación.

La digestión anaerobia es un proceso en el cual se utilizan bacterias que funcionan en ausencia total de oxígeno para convertir los sólidos volátiles en dióxido de carbono, metano y amonio. Estas reacciones suceden en un tanque cerrado que puede ser o no calentado (USEPA, 2003). Se usa comúnmente para lodos del sedimentador primario que contiene elevadas concentraciones de materia orgánica (Jiménez, 2001).

¹ La descripción del tratamiento por vermicomposteo se encuentra en un apartado más adelante ya que este es el tratamiento seleccionado en el presente trabajo.

El composteo es otro tratamiento biológico el cual involucra una descomposición aerobia del material orgánico usando una temperatura, humedad y oxígeno controlado. También conocido como un proceso de biorremediación utilizando las actividades metabólicas de ciertos organismos (bacterias, hongos, plantas, entre otros). En la tabla 1.2 se observan las ventajas y desventajas de los diferentes tratamientos.

Tabla 1. 2. Ventajas y desventajas de tecnologías para el tratamiento de lodos.

Tratamientos	Ventajas	Desventajas
Tratamientos Biológicos	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Son efectivos en cuanto a costos. ➤ Son tecnologías más benéficas para el ambiente. ➤ Los contaminantes generalmente son degradados. ➤ Se requiere un mínimo o ningún tratamiento posterior. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Requieren mayores tiempos de tratamiento. ➤ Es necesario verificar la toxicidad de intermediarios y/o productos. ➤ No pueden emplearse si las características de lodo no favorece el crecimiento microbiano.
Tratamientos fisicoquímicos	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Pueden realizarse en periodos cortos. ➤ El equipo es accesible y no se necesita de mucha energía e ingeniería. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Los residuos generados por técnicas de separación pueden tratarse o disponerse esto genera un aumento en costos así como la necesidad de permisos. ➤ Los fluidos de extracción pueden aumentar la movilidad de los contaminantes: necesidad de sistemas de recuperación.
Tratamientos térmicos	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Reducción total. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Es el grupo más costoso. ➤ Emisiones al ambiente.

Fuente: (Volkes y col., 2002)

1.2.1. VERMICOMPOSTEO COMO TRATAMIENTO BIOLÓGICO

El vermicomposteo es un proceso de descomposición natural, similar al compostaje en el que el material orgánico, además de ser atacado por los microorganismos (hongos, bacterias, actinomicetos, levaduras, etc.) existentes en el medio natural, también lo es por el complejo sistema digestivo de la lombriz.

En el intestino de la lombriz ocurren procesos de fraccionamiento, desdoblamiento, síntesis y enriquecimiento enzimático y microbiano, lo cual tiene como consecuencia un aumento significativo en la velocidad de degradación y mineralización del residuo, obteniendo un producto de alta calidad. Esta transformación hace que los niveles de pérdida de nutrientes como nitrógeno, potasio, etc., sean mínimos con relación a los sistemas tradicionales de compostaje (Cardoso y Ramírez, 2006).

Los elementos factibles de transformar por medio de lombriz, son:

- Todo tipo de estiércoles (de vacunos, equinos, conejos, gallinas, etc.)

-
- Materia vegetal (hojas, césped, rastrojos)
 - Papel, cartón
 - Algunos residuos industriales (aserrín, sueros, gelatinas, mataderos, papeleras, agroindustriales, etc.)
 - El lodo de las Plantas de Tratamiento de aguas residuales.

Las lombrices durante el proceso de alimentación fragmentan los residuos, incrementan la actividad microbiana y los índices de descomposición y/o mineralización de los residuos orgánicos, alteran las propiedades físicas y químicas de los materiales, provocando un efecto de composteo o humificación mediante el cual la materia orgánica inestable es oxidada y estabilizada. El producto final comúnmente llamado humus es obtenido conforme los residuos orgánicos pasan a través del intestino de la lombriz, y es bastante diferente al material orgánico. Además se ha demostrado que bajo la acción de las lombrices se incrementa tanto la velocidad de mineralización del N como los índices de conversión de $N-NH_3^+$ (Reséndez y col, 2005; tomado de Atiyeh y col 2000).

El humus es un fertilizante orgánico, es un material de color oscuro con un aspecto similar a la tierra, suave, ligero e inodoro, tiene altos contenidos de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y microelementos en cantidades al menos cinco veces superiores a las de un buen terreno fértil.

1.2.1.1. Tipos de lombrices

Las lombrices pertenecen al grupo de los Anélidos o gusanos anillados, reciben este nombre debido a que su cuerpo se encuentra constituido por metámeros o segmentos en forma de anillos. El cuerpo de estos animales es alargado, cilíndrico, con una fina cutícula, segregada por las células de la epidermis, por donde estos animales efectúan la respiración.

Las especies de anélidos que se utilizan en el vermicomposteo difieren de las especies que se encuentran comúnmente en el suelo.

En los siguientes incisos se presentan dos diferentes tipos de lombrices:

- Lombrices formadoras de suelo.
- Lombrices composteadoras.

Lombrices formadoras de suelo

Las especies formadoras de suelo facilitan la penetración de aire y agua. Ayudan además al transporte de materiales en los diferentes estratos, estabilizan los agregados y solubilizan los nutrientes lo que favorece el crecimiento vegetal.

Las lombrices de tierra son de una gran importancia económica, porque con su actividad cavadora de tierra, en su estado natural, participan en la fertilización, aireación y formación del suelo, por su efecto marcado sobre la estructuración del mismo, debido a la mezcla permanente y el reciclaje de bases totales, como el hidróxido de calcio, el cual sustraen de las capas más profundas del suelo hacia la superficie.

Entre las especies representativas de este grupo encontramos a: *Apporrectodea*, *sp. Microscolex dubius*, *Octalasion cyaneum*, *Lumbricus terrestres*, esta especie cava galerías muy profundas, prefiere regiones frías y se reproduce poco.

Las lombrices de tierra también pueden encontrarse en depósitos de lodo residual consumiéndolo, sin embargo no pueden ser cultivadas porque escapan de los recipientes (Cardoso, 2005).

Lombrices composteadoras

Las especies composteadoras, además de realizar las actividades descritas por las lombrices formadoras de suelo, sobreviven en condiciones de alta carga orgánica de material sin estabilizar, por lo que pueden ser utilizadas para transformar residuos orgánicos en humus. El 80% de los criaderos de lombrices a nivel mundial utilizan *Eisenia foetida*; hay otras especies como *Eisenia andrei*, *Perionyx excavatus*, *Eudrilus eugeniae*, que soportan vivir con altos contenidos de materia orgánica, o la híbrido rojo de California, también conocida como *Helodrilus caliginosus* (Martínez, 2004).

Eisenia foetida es superior a otras especies ya que tolera un amplio rango de temperatura para sobrevivir, tiene una alta velocidad de reproducción y una eficiencia en la conversión de residuos orgánicos. *Eudrilus eugeniae* y *Perionyx excavatus* también son efectivas pero tienen un rango reducido de la temperatura para sobrevivir y las ubica en condiciones tropicales. La reproducción de *Eudrilus eugeniae* es más baja que la de *E. foetida* (Blakemore, 1995).

1.2.1.2. Taxonomía de *Eisenia foetida*

Eisenia foetida es la más común y la que en mejor forma ha respondido a todas las aplicaciones para la cual se le ha utilizado. La taxonomía y morfología de las mismas se encuentra en la tabla 1.3 y 1.4.

Tabla 1.3. Clasificación zoológica de *Eisenia foetida*

Reino	Animal
Tipo	Anélido
Clase	Oligoqueto
Orden	Opisthoro
Familia	Lombricidae
Género	<i>Eisenia</i>
Especie	<i>Foetida</i>

Fuente: (Myers, 2001).

Tabla 1.4. Morfología de *Eisenia foetida*

Longitud	6-8 cm.
Diámetro	3-5 Mm.
Peso	1 g
Sexo	Hermafrodita

Fuente: (Myers, 2001).

Las lombrices juegan un rol importante en este proceso (vermicomposteo), estimulando la actividad microbiana mediante la aireación y mezclado del suelo. Tienen una alta capacidad de acumular elementos tóxicos; sin embargo, hasta cierto punto la acumulación depende del tipo de elemento y de las propiedades del suelo (Langdon y col., 2003). Ellas poseen un gran número de características (gran tamaño, comportamiento y alta biomasa) que hacen que sean uno de los animales más apropiados como organismo bioindicador para la prueba de toxicidad de compuestos químicos en suelos. Consecuentemente, ellas fueron adoptadas como organismos estándares para pruebas ecotoxicológicas por la unión europea (Arnaud y col., 2000; OECD, 1984).

1.2.1.3. Características externas

Las lombrices tienen un cuerpo cilíndrico y alargado que consiste de dos tubos concéntricos: la pared del cuerpo y el tubo digestivo.

Existe una porción más gruesa en el tercio anterior de 5 mm. como se muestra en la figura 1.1 de longitud llamada clitelium cuya función esta relacionada con la reproducción.

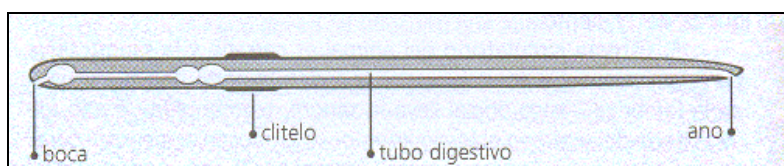


Figura 1.1. Vista general de una lombriz adulta (Shuldt, 2004)

Sistema digestivo

Está formado por la boca, que es una pequeña cavidad que se une con la faringe y en ella se lubrica el alimento que pasa posteriormente al esófago en el cual se encuentran las glándulas calcáreas, cuya función es excretar carbonato cálcico para neutralizar, los ácidos orgánicos presentes en el alimento. Posteriormente, se encuentran el buche y la molleja. En el buche se almacena el alimento y en la molleja se tritura, para ser digerido en el intestino, donde ocurre la mayor parte de la digestión y la absorción (figura 1.2)

Sistema Circulatorio

Las lombrices tienen un sistema circulatorio cerrado constituido por dos grandes vasos sanguíneos uno dorsal y el otro ventral; además de cinco vasos principales a lo largo del cuerpo y cinco pares de corazones. La sangre de las lombrices está compuesta por un plasma líquido de color rojo debido a la presencia de hemoglobina. La función de la sangre es absorber las sustancias alimenticias de los intestinos, liberar residuos solubles en los riñones, transportar el oxígeno a todo el cuerpo y liberar gas carbónico a través de la piel.

Sistema Respiratorio

La respiración de las lombrices es cutánea. La falta de un sistema circulatorio organizado permite que la sangre circule por capilares que se ubican junto a la cutícula húmeda de la pared del cuerpo, lo que favorece la absorción de oxígeno y la liberación de anhídrido carbónico. Por lo tanto la respiración solo puede darse con la cutícula húmeda. Cuando se expone una lombriz al sol, deja de respirar al irse secando y muere. Otra causa de muerte es la falta de oxígeno que se presenta en condiciones de saturación de agua, de inundación, por ejemplo, como cuando hay precipitaciones altas (Myers, 2001).

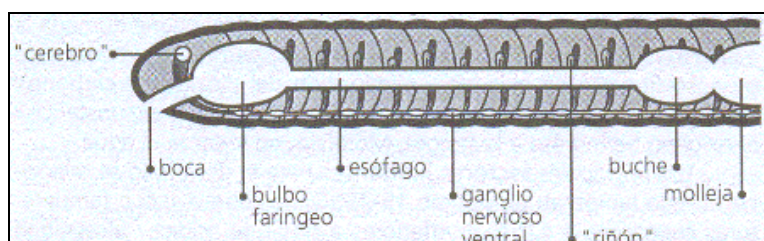


Figura 1.2. Tercio anterior. Aparato digestivo, Sistema nervioso y excretor (Shuldt, 2004).

Sistema Reproductivo

La lombriz es hermafrodita, por lo que se producen óvulos y espermatozoides en un mismo individuo. Sin embargo para reproducirse se requiere de dos individuos. Dos lombrices giran en sentido opuesto la una de la otra, de esta forma pueden contactar el aparato genital masculino de una con el aparato genital femenino de

la otra. Así en cada acoplamiento, una lombriz recibe el esperma de la otra y lo retiene en su propio aparato genital femenino hasta la fecundación. La fecundación se produce a través del clitelium, cuyas glándulas producen un capullo o cápsula (Shuldt, 2004).

El capullo es de color amarillo-verdoso, de 2 a 3 mm por 2 a 4 mm, de forma parecida a una pera. Las lombrices emergen después de 14 a 21 días de incubación, en grupos de 2 a 21 son de color blanco, a los 5 ó 6 días se ponen rosadas y a los 120 días ya se parecen a las adultas siendo de color rojizo y estando en condiciones de aparearse.

1.2.1.4. Factores que influyen en el comportamiento de las lombrices

Materia orgánica

Se entiende por materia orgánica al material de origen orgánico que se encuentra en el suelo o en algún abono como la composta, en diferentes grados de descomposición. El lodo residual tiene un contenido elevado de materia orgánica (73%), durante un proceso de composteo debido al proceso de mineralización y al consumo de carbono por los microorganismos termofílicos se disminuye esta cantidad para alcanzar valores de 40 a 50% (IMTA, 1991).

Humedad

Estos animales no tienen un mecanismo de conservación de agua adecuado, no obstante que requieren de humedad en la pared corporal para su respiración y pierden mucho agua en la orina. Sin embargo resisten la pérdida de agua de hasta un 75%. Como mecanismo de defensa ante la falta de humedad, la lombriz reduce al máximo su superficie corporal haciéndose bolita. (Martínez, 1999). Las condiciones de humedad para la sobrevivencia de las lombrices se encuentran en la tabla 1.5.

Si la humedad no es adecuada puede dar lugar a la muerte de la lombriz. Las lombrices toman el alimento chupándolo, por tanto la falta de humedad les imposibilita dicha operación. El exceso de humedad origina empapamiento y una oxigenación deficiente.

La falta de agua reduce el movimiento de la lombriz, afectando directamente la búsqueda de alimento, lo que repercute en una disminución de la población puesto que afecta su reproducción y se reduce la liberación de capullos (Bollo, 2001).

Las lombrices probablemente pierden del 10 al 20% del peso de su cuerpo en humedad cada día por su sistema respiratorio, el cual requiere mantener la humedad de la superficie exterior, y porque el mecanismo de excreción de nitrógeno, el cual requiere de agua para diluir el amonio y urea para más orina hipotónica. Esta pérdida de agua solo puede ser repuesta por la ingestión o el contacto directo con agua libre (Jager, 1998).

Temperatura

La temperatura es otro de los factores que influyen en la reproducción, producción de humus y fecundidad de los cocones. La temperatura óptima como se muestra en la tabla 1.5 es de 20 °C en la cual se observa el máximo rendimiento de las lombrices.

Cuando la temperatura desciende hasta 15 °C las lombrices entran en un periodo latente, dejando de reproducirse, crecer y producir humus, además que alarga el ciclo evolutivo, puesto que los cocones no eclosionan y pasan más tiempo encerrados los embriones, hasta que se presentan las condiciones del medio favorable, sucediendo lo mismo con la lombriz joven, pasa más tiempo en este período, puesto que ahí soporta más tiempo las adversidades del tiempo (Legall y col., 2002).

También Barois 1995 (tomado de López y col. 2003) enfatizó que la temperatura tiene un efecto directo sobre la actividad microbiológica en el contenido del tracto digestivo de la lombriz. Este hecho ya había sido aportado por Allieli y col. 1987 (tomado de Lopez y col. 2003) quienes encontraron mayor actividad microbiana en el tracto de las lombrices a 28°C.

pH

El pH del suelo es un factor importante que determina la presencia o ausencia de lombrices, el valor óptimo de pH es 6.5 a 7.5.

La acidez influye directamente en la alimentación y reproducción de la lombriz, aunque algunos autores indican que la muerte se debe principalmente a su sensibilidad a la acidez del suelo. En algunos casos, cuando la acidez es muy baja (pH 4-5), la lombriz migra hacia la superficie del suelo, donde se queda quieta y posteriormente muere (Martínez, 1999).

Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es un factor importante ya que a condiciones superiores a 8.0 mS/cm las lombrices mueren como se muestra en la tabla 1.5.

Tabla 1.5. Condiciones ambientales para la sobrevivencia de *Eisenia foetida*.

Parámetro	Condiciones
Humedad	Nivel óptimo: 75%
	Nivel adecuado: entre 70 y 80%
	Peligro de muerte: inferior a 70% y superior a 80%
Temperatura	Nivel óptimo: 20°C
	Nivel adecuado: entre 15 y 24°C
	Peligro de muerte: menor que 5°C y mayor que 37°C
pH	Nivel óptimo: 6.5 a 7.5
	Nivel adecuado: en un rango entre 6 y 8
	Peligro de muerte: menor que 4.5 y superior a 8.5
Conductividad eléctrica	Nivel óptimo 2.5 mS/cm
	Nivel adecuado: 3.0 mS/cm
	Peligro de muerte: Superior a 8.0 mS/cm

Fuente: (Bollo, 2001)

Luz

Las lombrices necesitan de oscuridad, ya que la presencia de luz las afecta directamente, la exposición por tiempos cortos a los rayos ultravioleta las deseca y les causa la muerte si no se las protege en forma rápida (Martínez, 1999).

Relación Carbono-Nitrógeno

Estas relaciones caracterizan los diversos materiales orgánicos biodegradables (MO), orientando acerca de cómo disponer y/o combinarlos a los fines de optimizar un compostaje apropiado de los mismos. Es sabido que para que ello ocurra se requiere que la MO generada posea una relación de 30 (eventualmente 26) a 40 partes de carbono (C) por cada una de nitrógeno (N) (Bollo, 2001).

1.2.2. Descripción del sistema de vermicomposteo

Hay dos métodos de sistemas de vermicomposteo: En cajas con bastidores y cunas sobre el terreno. Ambos pueden estar bajo cubierto o al exterior, siendo distinto el manejo en cada caso. Las cajas contienen bastidores de diferentes medidas, y son la técnica más sencilla. Las cunas consisten en colocar una capa de sustrato sobre el piso.

El proceso de vermicomposteo consta de 4 fases en la cuales se lleva a cabo la transformación del lodo residual a vermicomposta todo por la acción conjunta de los microorganismos presentes en el lodo y las lombrices. A continuación se presenta la descripción de cada fase del proceso.

Fase 1: Mezclado

El lodo y material acondicionador deben ser mezclados de manera que queden homogéneos. El lodo y el material acondicionador pueden mezclarse directamente en el área de vermicomposteo. La densidad² de esta mezcla debe ser aproximadamente 0.6 g/L (Cardoso y Ramírez., 2006).

Fase 2: Pre-estabilización o pre-composteo

Esta fase la realizan los microorganismos que se encuentran en el lodo residual y material acondicionador, los cuales comienzan a con el proceso de pre-estabilización para posteriormente agregar las lombrices al sistema.

Durante el pre-composteo, los residuos orgánicos se descomponen bajo la acción de diversos microorganismos y factores ambientales, y los productos principales son CO₂, H₂O, iones minerales y materia orgánica estabilizada, rica en sustancias húmicas (Atiyeh y col. 2000).

El proceso de pre-composteo consta de 4 etapas: mesófila, termófila, enfriamiento y maduración. El proceso se caracteriza por el predominio de metabolismos respiratorios aerobios. Durante el desarrollo de las etapas la mezcla va sufriendo cambios, de la etapa mesófila a la etapa termófila. En la etapa mesófila el pH durante los primeros días disminuye pero al continuar la etapa este aumenta hasta que la temperatura llega a 40°C. En la etapa termófila durante un periodo corto de tiempo se mantiene la temperatura a 40- 60°C y el pH permanece constante, con el paso del tiempo la temperatura disminuye y el pH se comporta de forma asintótica.

Fase 3: Siembra de la lombriz y Vermicomposteo

Mientras los microorganismos son responsables de la degradación bioquímica de la materia orgánica en el proceso de vermicomposteo, las lombrices son importantes para acondicionar el sustrato y para promover la actividad microbiana. Las lombrices actúan como batidoras mecánicas ya que éstas desintegran el material orgánico, incrementan el área superficial expuesta a los microorganismos y mueven los fragmentos y los excrementos (humus) ricos en bacterias, en consecuencia homogenizan el material orgánico (Domínguez y col, 2003)

² En el Anexo I se encuentra el procedimiento de calculo de la densidad de la mezcla

El lodo a tratar deberá colocarse en el lugar definitivo donde trabajará la lombriz antes de realizar la siembra (Martínez, 2004). Una vez sembrada la lombriz se llevará un tiempo reconociendo el material y luego las lombrices comienzan a descomponer el lodo produciendo humus.

El oxígeno requerido para este proceso lo proporcionan las mismas lombrices al enterrarse en la tierra van haciendo túneles por los cuales entra el aire y ya no es necesario realizar una aireación forzada.

Fase 4: Separación

Concluido el proceso de vermicomposteo, el material está en condiciones de ser separado de las lombrices y del material acondicionador. Esta última operación es opcional y se realizan dependiendo de las características que se deseen en el producto final. Si es necesario el cribado, y si el humus presenta un exceso de humedad, debe realizarse una operación de secado antes del cribado. En caso de que el humus esté lo suficientemente seco para realizar un adecuado cribado (contenido de humedad por debajo del 35%), el secado no se realiza. Si es enviada al almacén, debe tener un contenido de humedad del 15%.

El cribado tiene como propósito la recuperación de una parte del material acondicionador para reciclarlo y proporcionar al producto características que favorezcan su comercialización (Cardoso, 2005).

1.3. LA LOMBRIZ Y LOS CONTAMINANTES

En este punto se presentan brevemente diferentes estudios realizados con lombrices con diversos contaminantes, así como los resultados observados; esto para dar una idea más amplia de la importancia de las lombrices en la degradación de contaminantes.

Las lombrices acumulan contaminantes orgánicos lipofílicos (xenobióticos, metales pesados, entre otros) de su medio ambiente como en el caso del suelo. Son capaces de acumular compuestos lipofílicos no solo por absorción pasiva de la fracción disuelta en el agua intersticial a través de la pared del cuerpo, también por asimilación intestinal durante el paso de suelo contaminado a través del intestino. En la figura 1.3 se presentan las diferentes procesos y formas en que la lombriz puede tomar los contaminantes (Langdon y col., 2003).

Contreras (2004) menciona que Liste y Alexander (2002) encontraron que las lombrices son capaces de asimilar hidrocarburos poliaromáticos (HPAs) de la porción remanente en suelos que no son disponibles por otras técnicas de extracción convencionales.

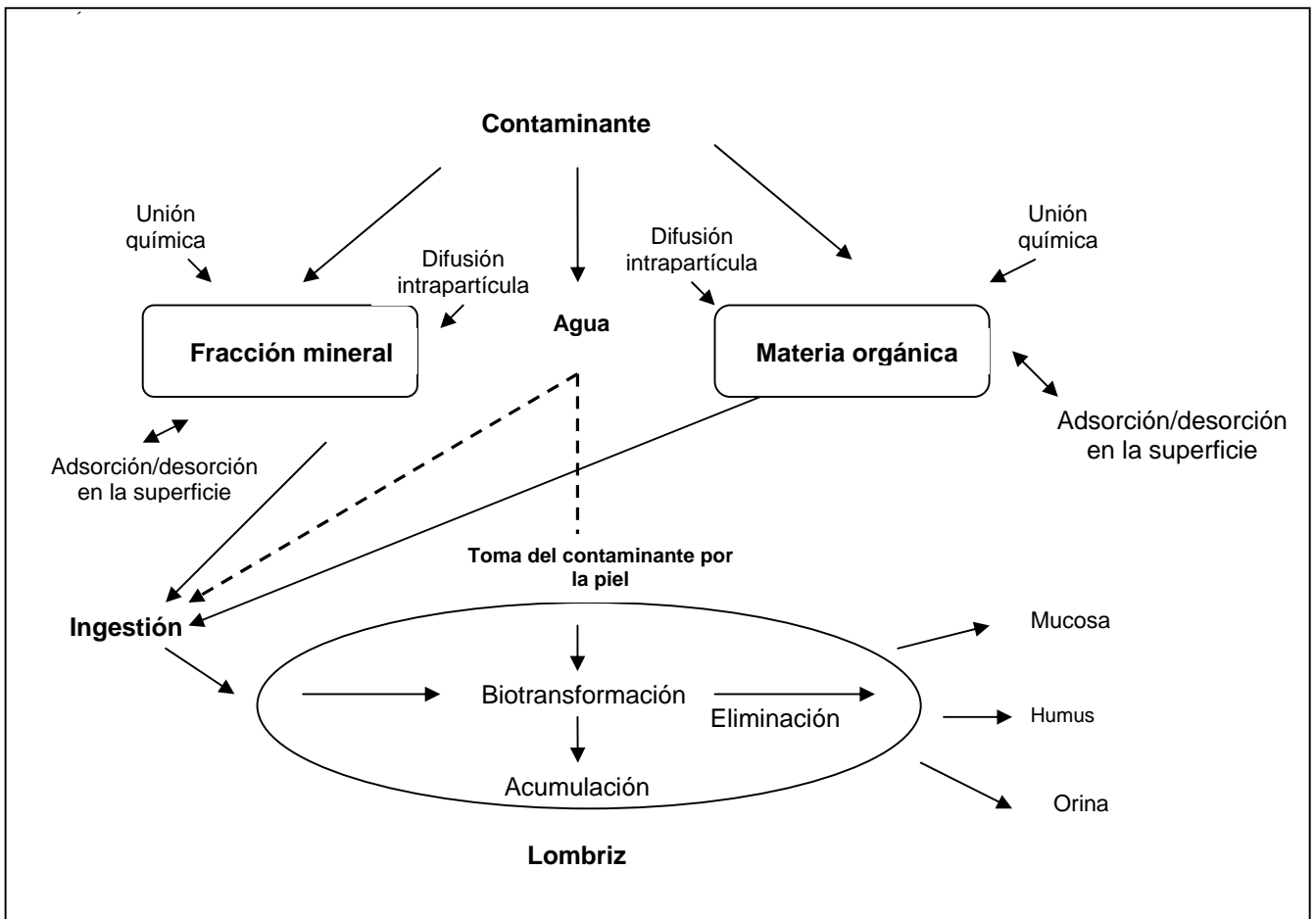


Figura 1.3. Resumen de los procesos involucrados entre los contaminantes, suelo y las lombrices. (Langdon, 2003).

En la tabla 1.6 se muestran algunos estudios realizados para evaluar algunos compuestos químicos por organismos del género *Lumbricus* y *Eisenia*.

Tabla 1.6. Estudios realizados para evaluar la asimilación de hidrocarburos, plaguicidas entre otros por organismos del genero *Lumbricus* y *Eisenia*. (Contreras, 2004).

Especie	Compuesto	Observación	Referencia
<i>E. foetida</i>	Petróleo crudo	Realizaron 5 experimentos con diferentes concentraciones (0.5, 1.0, 1.5, 2.0 y 2.5%) en 100 g de suelo a un pH 7.7 y se agregaron 5 lombrices en cada exp. Tolera y sobrevive a 1.5% Petróleo.	Safwat y col, 2002
<i>L. terrestris</i>	Petróleo crudo	Realizaron 4 experimentos con diferentes concentraciones (0, 0.5, 1, 1.5%) en 100 g de suelo a un pH de 7.7 y se agregaron 2 lombrices en cada exp. Es muy sensible, solo tolera hasta 0.5% de petróleo crudo.	Safwat y col, 2002
<i>E. foetida</i>	Antraceno, Criseno, Pireno y Be(a)pireno	La asimilación de estos compuestos aumenta en suelos con poca materia orgánica.	Tang y col, 2002
<i>E. foetida</i>	Difenilamina	Realizaron 7 experimentos con un suelo contaminado con difenilamina se usaron concentraciones de 55, 45, 40, 35, 30, 25 y 0% a un pH de 5.2 en 400 g de suelo, agregando 10 lombrices y 14 días de exposición. Las lombrices toleran hasta 35% de concentración.	Callahan y col, 1985
<i>L. terrestris</i>	20 HPAs y 12 BPCs	No hay diferencia en la asimilación por lombrices entre HPAs y BPCs. Tiempo de exposición 15 d. Realizaron 3 experimentos con 3 lombrices cada uno en 600 g de suelo. pH = 4.4-7.2 Temperatura 18°C	Krauss y col, 2000
<i>Lumbricus rubellus</i>	Fenantreno y flouranteno	Aumenta velocidad de desaparición, se aumenta la bioacumulación bajo estrés nutricional	Wei-Chun y col, 1995.
<i>E. andrei</i>	Hexabromobenceno, Octacloronaftaleno	Los compuestos son asimilados, al aumentar (contaminante) = aumenta (en tejido) con una lenta eliminación	Belfroid y col, 1995
<i>E. foetida</i>	Clorobenzenos	La eliminación de compuestos hidrofóbicos por organismos se aumenta con materia orgánica	Belfroid y Sijm, 1995
<i>E. foetida</i>	Carbaril, dieldrin, floureno, fenol, Cl-acetamida, 1,2-dicloropropano,etc	Carbaril y dieldrin aumenta crecimiento y reproducción (muerte), Cl-acetamida y 1,2-cloropropano no aumenta reproducción y crecimiento.	Neuhauser, 1990

1.4. SISTEMAS DE DISPOSICIÓN DE LODO RESIDUAL

Después del tratamiento de los lodos como resultado de la vermicomposta pueden solo tener uso restringido o ningún uso, dependiendo de los resultados obtenidos; es por ello que se deben buscar diferentes opciones de sistemas de disposición de los mismos. A continuación se presentan tres sistemas de disposición con sus ventajas y desventajas (tabla 1.7).

1.4.1. Relleno Sanitario

Es un método de disposición en el que el lodo es depositado en un área específica, con o sin residuos sólidos y enterrados debajo de una cubierta de suelo. El relleno es primeramente un método de disposición en el que no se recuperan nutrientes y a veces solo se recupera energía. En caso de contener cantidades excesivas de metales y tóxicos se entierran en sitios de confinamiento restringido.

1.4.2. Incineración

La incineración es el quemado de los sólidos volátiles de los lodos en presencia de oxígeno. En sí, la incineración no es un tratamiento que convierte el lodo en ceniza. Sin embargo, dado que la incineración reduce drásticamente el volumen y masa de los residuos sólidos materiales, éste ha sido considerado tradicionalmente como un método de disposición y es evaluado junto a la aplicación al suelo, composteo, relleno sanitario o disposición al mar, como una opción de uso o disposición.

1.4.3. Disposición al suelo

Se define como la disposición del lodo sobre o debajo de la superficie del suelo, es la opción de disposición más ampliamente utilizada. El lodo puede funcionar como acondicionador del suelo y como fertilizante. Generalmente el lodo es aplicado en una de las alternativas siguientes: En suelos agrícolas, suelos forestales y suelos erosionados. En estos tres tipos de aplicación al suelo, se utiliza el lodo como un recurso valioso para proporcionar ciertas características al suelo, como son: acondicionamiento que facilita la adherencia de nutrientes, incrementa la retención del agua, permite la penetración de las raíces y proporciona textura, con la cual se reduce la erosión y hace al suelo más manejable (Estrada, 1992).

Tabla 1.7. Ventajas y desventajas de los sistemas de disposición de lodos y biosólidos.

Sistemas	Ventajas	Desventajas
Rellenos Sanitarios	<ul style="list-style-type: none">➤ Es un sistema que no requiere procesamiento.➤ No requiere pretratamientos sofisticados.➤ Es una operación flexible.	<ul style="list-style-type: none">➤ Su localización en zonas residenciales pueden ocasionar un fuerte rechazo.➤ Requiere mantenimiento aun después de cerrado.➤ La producción de metano pueden ser un factor de alto riesgo.➤ Hay necesidad de tratar los lixiviados.
Incineración.	<ul style="list-style-type: none">➤ Reducción de volumen y masa.	<ul style="list-style-type: none">➤ Dependiendo de la tecnología se pueden producir emisiones
Disposición al suelo.	<ul style="list-style-type: none">➤ Uso como mejorador de suelos.	<ul style="list-style-type: none">➤ Riesgo de contaminar plantas y acuíferos con patógenos y elementos químicos.➤ Posible existencia de olores desagradables.

1.5. MARCO LEGAL

En nuestro país, el origen de toda legislación es la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Es ahí donde inicialmente se contempla la protección y el cuidado del entorno. Surge posteriormente la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, (LGEEPA) motivada por la necesidad de distribuir competencias entre las diferentes instancias de gobierno, establecer sanciones e incentivos económicos para los legislados y por otra parte, atendiendo a la necesidad que nace de la competencia, debido al intercambio económico con otros países. Los lineamientos que pueden ser aplicados para lodos se encuentran en las secciones sobre prevención y control de la contaminación de aguas epicontinentales o marinas y de suelos. La ley señala a las autoridades responsables de otorgar permisos y autorizaciones, de restringir, o bien, de establecer los parámetros y los criterios para utilizar las aguas y suelos nacionales como contenedores finales de diferentes tipos de residuos.

Las Normas Oficiales Mexicanas (NOMs) son emitidas para regular situaciones específicas en materia ambiental. En el caso de lodos y biosólidos, se aplica la NOM-004-SEMARNAT-2002, que tiene como objetivo establecer las especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes en los lodos y biosólidos provenientes de desazolves de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, con el fin de posibilitar su aprovechamiento o disposición final y proteger al medio ambiente y la salud humana.

Para efectos de esta Norma Oficial Mexicana los biosólidos se clasifican en tipo: excelente y bueno en función de su contenido de metales pesados y en clase: A, B y C en función de su contenido de patógenos y parásitos como se muestra en las tablas 1.8 y 1.9.

Tabla 1.8. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos.

Contaminante (determinado en forma total)	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: DOF (2003) NOM-004-ECOL-2002.

Tabla 1.9. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos.

Clase	Indicador bacteriológico de contaminación	Patógenos	Parásitos
	Coliformes fecales NMP/g de base seca.	<i>Salmonella spp.</i> NMP /g en base seca.	Huevos de Helminto/ g en base seca.
A	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 1 (a)
B	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2 000 000	Menor de 300	Menor de 35

(a) Huevo de helmintos viables.

NMP número más probable.

Fuente: DOF (2003) NOM-004-ECOL-2002.

El aprovechamiento de los biosólidos, se establece en función del tipo y clase, como se especifica en la tabla 1.10.

Tabla 1.10. Aprovechamiento de biosólidos.

Tipo	Clase	Aprovechamiento
Excelente	A	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación. ➤ Los establecidos para clase B y C.
Excelente o Bueno	B	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Usos urbanos sin contactos público directo durante su aplicación. ➤ Los establecidos en C.
Excelente o Bueno	C	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Uso forestales. ➤ Mejoramiento de suelos. ➤ Usos agrícolas.

Fuente: DOF (2003) NOM-004-ECOL-2002.

Se aclara que la aplicación de los biosólidos en terrenos con fines agrícolas y mejoramiento de los suelos se sujetará a lo establecido en la Ley Federal de Sanidad Vegetal y conforme a la normatividad vigente en la materia. Para la disposición final de los lodos y biosólidos, éstos deben cumplir con la especificación del trámite de No peligrosidad y con los límites máximos permisibles para el contenido de los indicadores de contaminación, patógenos y parásitos especificados en la tabla 1.9, para clase C.

En la norma se establece que los sitios para la disposición final de lodos y biosólidos, serán los que autorice la autoridad competente, conforme a la normatividad vigente en la materia. Esta norma permite que los lodos y biosólidos que cumplan con lo establecido en la presente Norma Oficial Mexicana, puedan ser almacenados hasta por un periodo de dos años. El predio en el que se almacenen debe ser habilitado para que no existan infiltraciones al subsuelo y contar con un sistema de recolección de lixiviados.

En cuanto a las características de los residuos peligrosos la norma NOM-052-ECOL-2001 es la que se aplica, en ella se encuentra el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. También comprenden las pruebas CRETIB³ (Corrosivo, Reactivo, Explosivo, Tóxico, Inflamable, Biológico-infeccioso) que ayudan a definir si un residuo es peligroso o no.

³ Las características CRETIB se encuentran en el Anexo II

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El desarrollo experimental de este estudio se dividió en 3 etapas: Caracterización, Bioensayos y Pruebas a escala piloto. En la figura 2.1 se presenta un diagrama con las etapas del desarrollo experimental.

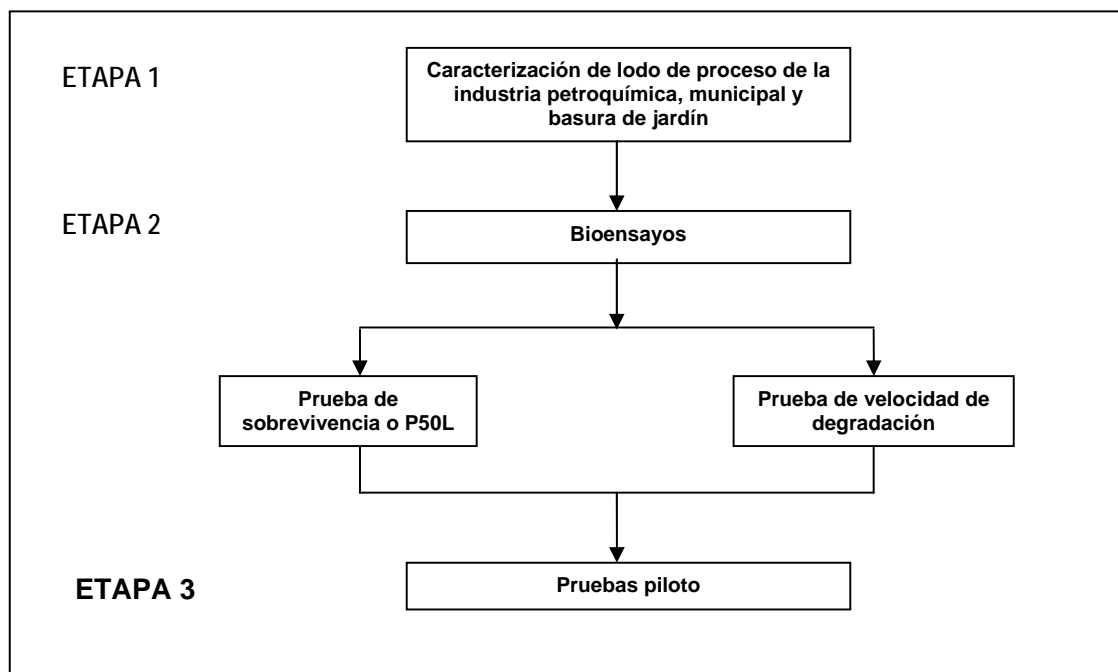


Figura 2.1. Etapas del desarrollo experimental.

A continuación se presentan los detalles de la metodología, el diseño y las instalaciones experimentales.

2.1 CARACTERIZACIÓN DE LODO DE LA PETROQUÍMICA, MUNICIPAL Y BASURA DE JARDÍN

Para la realización de este estudio se utilizaron lodos residuales municipales y de proceso de un complejo petroquímico. Los materiales a caracterizar son los siguientes: Lodo residual municipal proporcionado por la planta de tratamiento de aguas residuales del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) la cual cuenta con un sistema de lodos activados como tratamiento secundario y los lodos provienen del sistema de lechos de secado, el lodo de proceso de un complejo petroquímico es generado durante el proceso de producción del cloruro de vinilo y basura de jardín. Inicialmente se realizó la caracterización de los lodos y la basura de jardín. Esto permitió hacer un análisis comparativo de los parámetros y establecer los niveles de concentración de los contaminantes para este estudio.

La basura de jardín se utiliza como material acondicionador el cual funciona para acelerar el proceso aerobio además de que le proporciona estructura, textura y porosidad necesarias para permitir la aireación. El material

ac acondicionador, generalmente orgánico, puede funcionar como una fuente de carbono que proporciona energía adicional para las lombrices y microorganismos durante el proceso.

En la caracterización del lodo residual municipal y lodo de petroquímica, se tomaron muestras simples. Los análisis fisicoquímicos y microbiológicos fueron realizados en el laboratorio de la FI Campus Morelos (tabla 2.1), en laboratorios del IMTA y en laboratorios externos como el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). Los parámetros analizados en el lodo residual municipal fueron: sólidos totales y volátiles, huevos de helminto, coliformes fecales, pH, conductividad eléctrica, porcentaje de humedad. Al lodo de petroquímica se analizó le realizó el análisis CRETIB, poder calorífico bruto y neto, sólidos totales y volátiles, humedad, pH y conductividad eléctrica. La basura de jardín solo se realizó análisis de sólidos totales y volátiles así como la humedad.

Tabla 2.1. Parámetros de caracterización del lodo de petroquímica, lodo municipal y basura de jardín.

Parámetro	Método
Sólidos totales y volátiles	NMX-034-SCFI-2001
Huevos de Helminto	NMX-AA-113-SCFI-1999
Coliformes fecales	NMX-AA-42-1987
Poder Calorífico Bruto	NMX-AA-033-1985
Poder Calorífico Neto	NMX-AA-033-1985
pH	NMX-AA-25-1984
Conductividad eléctrica	NMX-AA-093-SCFI-2000
CRETIB	NOM-053-SEMARNAT-1993

2.2. BIOENSAYOS

Los bioensayos de laboratorio son experimentos en los cuales un tejido vivo, un organismo o grupos de ellos, son empleados para determinar el potencial tóxico de una sustancia cualquiera, de actividad desconocida. Permiten resolver situaciones de incertidumbre respecto de los efectos ambientales de las descargas de sustancias de desechos.

En este estudio los bioensayos consistieron en pruebas de sobrevivencia de las lombrices con diferentes tipos de mezcla, tiempo de pre-estabilización y porcentaje de lodo de petroquímica.

Se seleccionó la especie *Eisenia foetida* porque es particularmente apropiada como organismo de prueba para la evaluación de la contaminación ambiental y pruebas químicas bajo condiciones de laboratorio, aunque no se encuentra de manera natural en varios tipos de suelos, es ampliamente usada como una especie modelo y es autorizado por la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) para

pruebas de toxicidad. Ésta se diferencia de las demás especies por su amplia sensibilidad a los metales y es considerada como una animal ideal de prueba en laboratorio por su fácil manejo y crianza (Reinecke y Reinecke, 2001).

2.2.1. Prueba de Supervivencia o P50L

En el proceso de la prueba de supervivencia se colocaron 50 lombrices adultos (con clitelium), de *E. foetida* encima de las mezclas propuestas (tabla 2.2). Después de 24 horas de exposición se contaron las lombrices sobrevivientes, la mezcla en la que se ubique la mayor cantidad de lombrices vivas es la mezcla óptima, debiendo haber 48 lombrices vivas como mínimo para ser aceptada la mezcla. Si mueren más de 2, el alimento no reúne las características adecuadas y se procede a realizar las correcciones oportunas. Por el contrario, si al menos 48 lombrices están vivas y se han distribuido en la mezcla el alimento ha sido correctamente preparado y se puede proceder a suministrar el alimento a las lombrices.

Tabla 2.2. Factores del proceso de la prueba de supervivencia y sus niveles.

Factores	Nomenclatura	Nivel bajo (-1)	Nivel alto (+1)
Tipo de mezcla	M	M1: Lodo municipal + Lodo tóxico	M2: Lodo municipal + lodo de petroquímica + material acondicionador
Tiempo de pre-estabilización	T	10 días	20 días
Porcentaje de lodo de petroquímica	LP	10%	20%

El tiempo de pre-estabilización es necesario ya que los microorganismos que se encuentran en el lodo municipal inician el proceso de respiración aeróbica, lo cual crea un ambiente menos agresivo para la lombriz y la función del material acondicionador es proporcionar textura y que el medio donde se desenvuelve la lombriz se encuentre aireado por haber más espacios donde puede pasar el aire. En la pre-estabilización se registró la temperatura, humedad, conductividad eléctrica y pH de los mismos (tabla 2.3).

Tabla 2.3. Parámetros de caracterización en la prueba P50L.

Parámetro	Método
Humedad	NMX-AA-016-1984
Temperatura	NMX-AA-007-SCFI-2000
Conductividad eléctrica	NMX-AA-093-SCFI-2000
pH	NMX-AA-25-1984

Las unidades experimentales donde se realizó la prueba de sobrevivencia fueron de forma cilíndrica y tienen las siguientes dimensiones Altura 14 cm, Diámetro (a) 18 cm, Diámetro (b) 12.8 cm., en la figura 2.2 se presenta la colocación de las unidades experimentales.

La especie *Eisenia foetida* (adulta) fue recolectada del sistema de vermicomposteo que se encuentra en las instalaciones del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

El peso base para la preparación de las mezclas fue 800 gramos de lodo municipal y la densidad de las mezclas con material acondicionador fue 0.6 g/l.



Figura 2.2. Unidades experimentales a escala laboratorio en la prueba de sobrevivencia con las mezclas propuestas.

Para el desarrollo de la prueba de sobrevivencia o P50L se realizó un diseño de experimentos factorial 2^3 con tres repeticiones, el objetivo es medir el efecto de los tres factores (tipo de mezcla, porcentaje de lodo de petroquímica y tiempo de pre-estabilización), conocer cual factor es el de mayor efecto y obtener como resultado la mezcla óptima para la lombriz. En la tabla 2.2 se presentan los factores y niveles del diseño propuesto.

Una vez completado el trabajo experimental se realizó el análisis estadístico y se obtuvieron las superficies de respuesta así como las correlaciones entre los factores. Se utilizó el software Minitab v15 (Montgomery, 2004).

2.2.2. Prueba de velocidad de degradación

La prueba de velocidad de degradación indica la velocidad en que las lombrices degradan el alimento que se les provee. Esta velocidad es controlada por dos variables: (1) La velocidad de alimentación individual de

cada organismo y (2) la densidad de lombrices. El producto de estos dos valores proporciona un criterio del tamaño de la velocidad de descomposición por unidad de volumen o unidad de área.

En el vermicomposteo, una expresión lógica para la velocidad de alimentación podría ser el peso seco del lodo consumido por día por el peso de las lombrices. Esta relación de alimentación puede ser expresada de la siguiente manera:

$$\text{Relación lodo : lombriz} = \frac{(\text{Peso seco del lodo})}{(\text{Peso húmedo de la lombriz})(\text{Días de conversión total})} \quad (1)$$

El término relación lodo-lombriz o radio L: L puede ser aplicado a cualquier operación de vermicomposteo, a pesar del contenido de humedad que el lodo recibió o de la profundidad a la que el lodo es aplicado.

La relación L: L puede servir como criterio principal en el diseño de futuros sistemas de vermicomposteo de lodo y está relacionado directamente con los requerimientos del proceso.

Cabe hacer mención que la relación L: L depende mucho de la definición de "conversión total" que es el punto en el cual la conversión del lodo a humus es completa (Camp y col., 1981). Con el conocimiento de los días de conversión total, de la cantidad de material que pasa a través del tubo digestivo de la lombriz por unidad de tiempo, para determinado tipo de lodo, permite la predicción de la cantidad de lodo que se puede tratar por unidad de tiempo.

En el desarrollo de la prueba de velocidad de degradación se colocaron 500 g de mezcla seleccionada (óptima) en la prueba P50L y 100 g de Lombrices *E. foetida*, (gramos de biomasa). Se tomaron muestras iniciales de cada mezcla para la determinación de sólidos (ST y STV). La duración de la prueba fue de 30 días, durante los cuales se tomaron muestras para ST y STV una vez por semana para evaluar el proceso de degradación, que será medido con la relación STV/ST, también se midió la profundidad y peso de la mezcla así como el incremento de la biomasa, (peso en gramos de lombrices) y humedad.

Al final de la prueba se evaluó la degradación mediante el incremento del peso de las lombrices (biomasa), reducción final de sólidos volátiles, STV/ST, obtención de la relación L: L (fórmula 1), pH y conductividad eléctrica.

Al finalizar esta etapa se obtuvo la proporción del material o mezcla adecuada para la alimentación de una población de lombrices de *E. foetida*, la cual reunió las siguientes características:

- Mayor velocidad de degradación,
- Mayor producción de biomasa,
- Mayor reducción del volumen de la mezcla inicial.

2.3. PRUEBAS PILOTO

En esta etapa se realizó el diseño, instalación y operación de un modelo piloto para probar la mezcla seleccionada. El sistema a escala piloto es en caja y cuenta con las siguientes dimensiones: 270 cm de largo x 75 cm de ancho x 10 cm de profundidad (cantidad de lodo alimentado por 10 días).

El sistema de vermicomposteo propuesto se presenta en la figura 2.3, el cual se dividió en tres módulos cada uno de 90 cm. para probar el efecto de diferentes densidades de lombrices en cada módulo. La profundidad del sistema esta dividida en dos zonas, la zona más profunda esta compuesta de lodo residual municipal ya que estas fueron agregadas con anterioridad al sistema y la zona de vermicomposteo que es de 10 cm donde se agregó la mezcla óptima. Las lombrices generalmente se alimentan en lechos con un espesor menor a 40 cm., ascendiendo siempre tras el alimento (Shuldt, 2004).

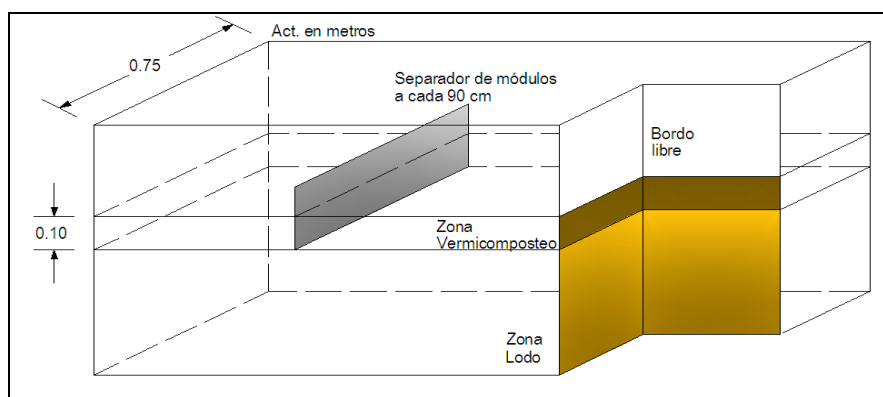


Figura 2.3. Sistema de vermicomposteo a escala piloto.

Para realizar el conteo de las lombrices por lecho se construyó un extractor de muestras la cual es una tecnología desarrollada por Shuldt (2004) el cual consta de un marco de 7.5 cm con hierro angulo o "T". Sobre este marco se puso una serie de clavos laterales (4 clavos por lado, cada uno con 7.5 cm de largo) formando una jaulita cúbica (Ver figura 2.4). Para realizar el muestreo con el extractor, éste se introduce con los clavos hacia abajo en el lodo, se procede a sacarlo sin que se pierda el contenido. Y se coloca en una bandeja, donde se cuentan las lombrices. Se realizaron 5 puntos de muestreo en cada lecho.



Figura 2.4. Extractor de muestra para el conteo de lombrices.

Para realizar el cálculo de lombrices/ m² Lecho se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones; el extractor equivale a una superficie de 0.005625 m², el lecho cuenta con 0.675 m² y se utiliza la fórmula 2 para obtener las lombrices/ Lecho.

$$\frac{(\text{Núm. de lombrices}) \times 0.675}{0.005625} = \text{Núm. de lombrices / Lecho} \quad (2)$$

Al inicio de operación del sistema piloto se realizó una caracterización de la mezcla donde se tomó una muestra inicial para la determinación de sólidos (totales y volátiles, ST y STV).

Al finalizar el vermicomposteo se caracterizó el humus obtenido con los siguientes parámetros: Macronutrientes: nitrógeno, fósforo y potasio, micronutrientes: hierro, magnesio, zinc, cobre, coliformes fecales, huevos de helminto, pH, conductividad eléctrica, humedad, sólidos totales y volátiles. En la tabla 2.4 se encuentra las técnicas empleadas para el análisis de cada parámetro.

En esta etapa se obtuvo un prototipo para el vermicomposteo de lodos de la industria petroquímica.

Tabla 2.4. Parámetros de la caracterización final del la vermicomposta.

Parámetro	Método
Nitrógeno total*	Proceso especial 054 (NMX-AA-026-SCFI-2001)
Fósforo*	NOM-021-RECNAT-2000
Potasio*	NOM-021-RECNAT-2000
Hierro*	NOM-021-RECNAT-2000
Magnesio*	NOM-021-RECNAT-2000
Zinc*	NOM-021-RECNAT-2000
Cobre*	NOM-021-RECNAT-2000
Coliformes fecales*	IMTA CAM6-03 (NMX-AA-42-1987)
Huevos de helminto*	IMTA-CAM6-16 (NMX-AA-113-SCFI-1999)
pH	NMX-AA-25-1984
Conductividad eléctrica	NMX-AA-093-SCFI-2000
Humedad	NMX-024-SCFI-2001
Sólidos	NMX-034-SCFI-2001

*Análisis realizados por el laboratorio de calidad del agua del IMTA.

3. RESULTADOS

3.1. CARACTERIZACIÓN

En la tabla 3.1 se presentan los resultados de la caracterización fisicoquímica de los diferentes lodos y la basura de jardín utilizados en el trabajo experimental para el presente estudio. El lodo municipal se define como moderadamente ácido por su pH (5.31) y el lodo de petroquímica como neutro (7.13). El alto contenido de sales en el lodo de petroquímica proporciona valores altos de la conductividad eléctrica (46.6 mS/cm) y el lodo municipal (0.07 mS/cm) cuenta con condiciones ambientales aceptables para el desarrollo de las lombrices. La humedad del lodo de petroquímica es del 20% y del lodo municipal del 80% así como la basura de jardín cuenta con una humedad de 8.85%. El poder calorífico bruto y neto solo se realizó al lodo de petroquímica porque para conocer la energía disponible en el material. La basura de jardín solo se le realizó los análisis de sólidos totales y volátiles y porcentaje de humedad. El lodo de petroquímica se conservó en un envase sellado de 50 litros en refrigeración.

Tabla 3.1. Caracterización de los diferentes lodos y basura de jardín.

Parámetro	Lodo residual municipal	Lodo de petroquímica	Basura de Jardín
Conductividad eléctrica (mS/cm))	0.07	46.6	----
pH	5.31	7.13	----
Sólidos Totales (mg/g)	192.92	156.8	0.90468
Sólidos Totales volátiles (mg/g)	78.54	20.04	0.73537
% Humedad	80	20	8.85
Poder calorífico Bruto (cal/g)	----	773	----
Poder Calorífico Neto (cal/g)	----	760	----
CRETIB	Biológico-Infecioso	Tóxico	----

Los resultados de los análisis CRETIB muestran que el lodo de petroquímica es tóxico por los compuestos que contiene, los valores obtenidos se encuentran en la tabla 3.2. Los límites máximos permisibles (LMP) están establecidos en la NOM-052-ECOL-2001. El lodo municipal se clasifica como biológico-infeccioso por la presencia de huevos de helminto y coliformes fecales.

Tabla 3.2. Resultados de análisis CRETIB de los diferentes lodos.

Parámetro	Lodo residual municipal	Lodo de petroquímica	LMP
Tricloroetileno (mg/L)	---*	0.02058	0.500
1,1,2-tricloroetano (mg/L)	---*	0.01092	1.2
Tetracloroetileno (mg/L)	---*	0.06649	0.700
Clorobenceno (mg/L)	---*	0.01818	0.140
Huevos de Helminto (HH/ g de base seca)	9	---*	Ver tabla 1.9
Coliformes fecales (NMP/ g de base seca)	5.4 x10 ⁹	---*	Ver tabla 1.9

* Análisis no realizados ya que el lodo residual municipal desde su origen no presenta contaminación de alguna fuente con características tóxicas y el lodo de petroquímica de proviene de un proceso químico.

3.2. BIOENSAYOS

Durante esta etapa se desarrollaron dos pruebas: la prueba de sobrevivencia o P50L y la prueba de velocidad de degradación.

Prueba de sobrevivencia o P50L

Esta prueba inició con la preparación de los diferentes tipos de mezclas, las cuales se colocaron en las unidades experimentales descritas en la sección 2.2.1.de la metodología, e inicio el periodo de pre-estabilización. Al finalizar los periodos de pre-estabilización (10 y 20 días), se colocaron 50 lombrices en los diferentes tratamientos y se esperó 24 horas, posteriormente se contaron el número de lombrices sobrevivientes.

En la tabla 3.3 se encuentran los resultados obtenidos de esta prueba; en ella se observa que los tratamientos 1, 2, 5 y 6 presentan resultados favorables ya que obtuvieron mayores cantidades de lombrices sobrevivientes. Los tratamientos 3, 4, 7 y 8 presentan los resultados más desfavorables en ellos se utilizó 30% de lodo de petroquímica. El tratamiento 2 que tiene 10% de lodo de petroquímica, 20 días de pre-estabilización y la mezcla es tipo 1 (lodo de petroquímica + lodo municipal), y el tratamiento 5 que tiene 10 % de lodo de petroquímica, 10 días de pre-estabilización y mezcla tipo 2 (lodo de petroquímica + lodo municipal+ material acondicionador) son los que muestran los mejores resultados, todas las lombrices colocadas sobrevivieron.

Tratamiento	Tipo de Mezcla	Porcentaje lodo de petroquímica	Tiempo de pre-estabilización	Lombrices sobrevivientes (Y1)	Lombrices sobrevivientes (Y2)	Lombrices sobrevivientes (Y3)
1	M1	10	10	48	50	50
2	M1	10	20	50	50	50
3	M1	30	10	15	25	35
4	M1	30	20	15	31	27
5	M2	10	10	50	50	50
6	M2	10	20	49	47	50
7	M2	30	10	12	21	14
8	M2	30	20	34	14	27

M1: Lodo de petroquímica + lodo municipal; M2: Lodo de petroquímica + lodo municipal + material acondicionador

Al realizar la prueba de sobrevivencia se colocaron tres testigos a los cuales se colocaron 50 lombrices y sobrevivió el 100%. Los testigos constaban de lodo residual municipal, se mantuvieron bajo las mismas condiciones que los tratamientos.

En la figura 3.1 A se muestran las lombrices expuestas a los tratamientos con 10% de lodo de petroquímica (tratamientos 1 2, 5 y 6), las cuales sobrevivieron, no siendo así las de la figura 3.1 B con un porcentaje de lodo de petroquímica de 30 (tratamientos 3, 4, 7 y 8).

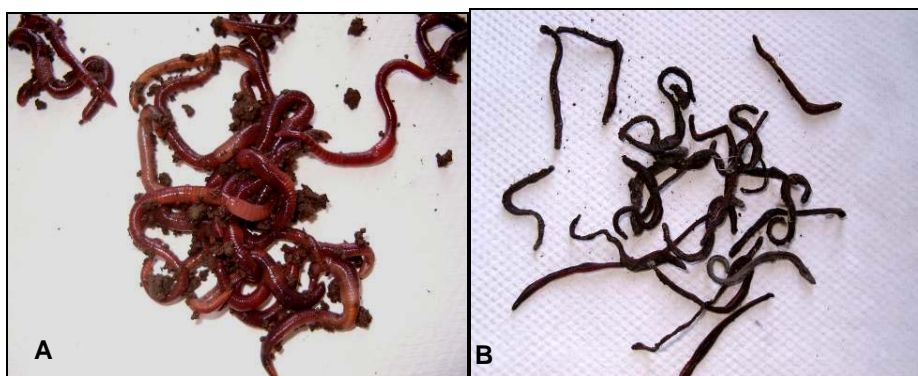


Figura 3.1. Lombrices con 24 horas de exposición al lodo de petroquímica. La figura A es con un porcentaje de 10 y la figura B de 30%.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los parámetros determinados en los diferentes tratamientos. En la tabla 3.4 se presenta la nomenclatura empleada en las figuras 3.2 y 3.3. Cada punto presentado en estas figuras es un valor promediado ya que se realizaron 3 replicas de cada tratamiento, en el anexo III se presentan los valores.

Tabla 3.4 Nomenclatura de los tratamientos realizados en la prueba de sobrevivencia.

Tratamiento	Tipo de Mezcla	Porcentaje lodo de petroquímica	Tiempo de pre-estabilización
1	M1	10	10
2	M1	10	20
3	M1	30	10
4	M1	30	20
5	M2	10	10
6	M2	10	20
7	M2	30	10
8	M2	30	20

En la figura 3.2 se presenta el comportamiento del pH en los 8 tratamientos durante el desarrollo de la prueba de sobrevivencia. Los tratamientos 1, 3 5 y 7 tuvieron 10 días de pre-estabilización. La mayoría de los tratamientos presenta el mismo comportamiento ya que no hay variaciones drásticas de los valores de pH. Al aumentar el porcentaje de lodo tóxico de 10% a 30 % los valores de pH y conductividad eléctrica se incrementan, esto se debe a la concentración de sales que contiene el lodo de petroquímica (tratamientos 3, 4, 7 y 8).

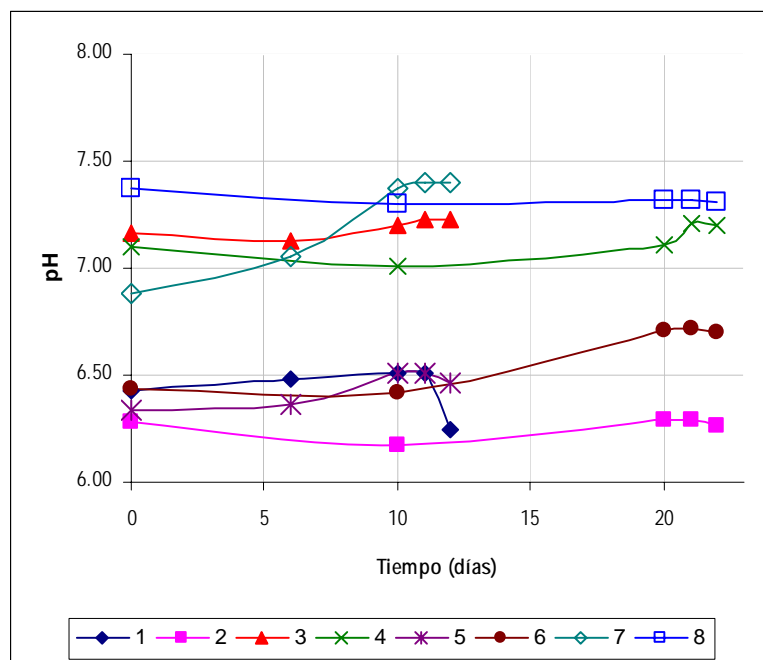


Figura 3.2. Comportamiento del pH de los 8 tratamientos durante la prueba de sobrevivencia.

La conductividad eléctrica (CE) en los diferentes tratamientos se presenta en la figura 3.3 en ella se observa que todos los tratamiento excepto el 7, se comportaron de manera constante durante el desarrollo de la prueba, esto se debe a que las lombrices solo estuvieron expuestas a estos tratamientos 24 horas por lo cual no se presentan diferencias en el comportamiento de los parámetros presentados.

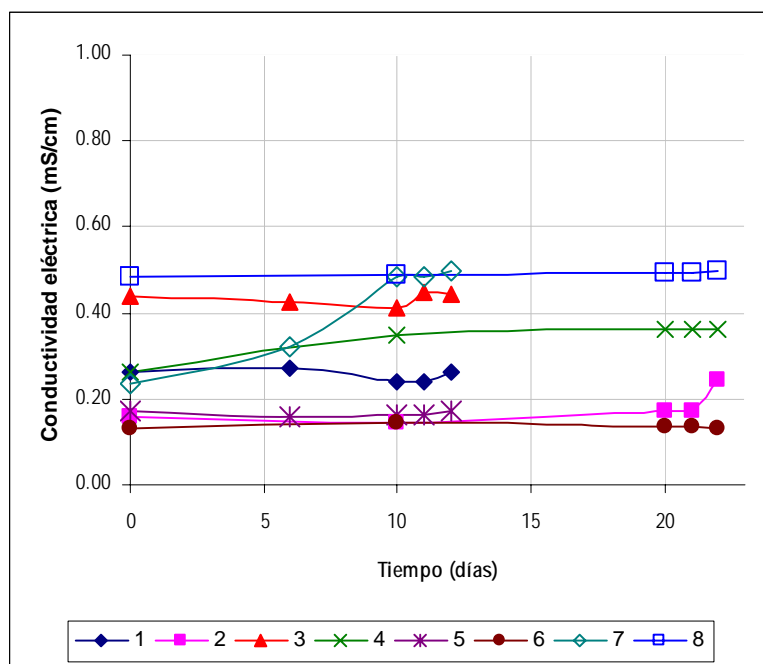


Figura 3.3. Comportamiento de la conductividad eléctrica de los 8 tratamientos durante la prueba de sobrevivencia.

La humedad se mantuvo en un intervalo del 75 al 80% en todos los experimentos, se observó que el tipo de mezcla 2 (Lodo Municipal + Lodo de Petroquímica + Material Acondicionador), tendió a perder humedad con mayor facilidad lo cual indica que se requerirán mayores cantidades de agua para mantener la humedad. Contreras y Col, 2005 (tomado de Edwards y Bohem 1996; Domínguez y Edwards, 1997) menciona que el material acondicionador reduce el agua disponible en el medio.

Diseño de experimentos estadístico

Se realizó un diseño factorial 2^3 en el programa Minitab (Montgomery, 2004). Se manejaron 2 límites o valores para cada variable, se utilizaron 3 variables o factores (tipo de mezcla, tiempo de pre-estabilización y porcentaje de lodo de petroquímica) y se realizaron 3 replicas.

Tabla 3.5. Probabilidades para la distribución normal

Factor	P
Constante	0.000
Mezcla	0.368
Tiempo	0.439
Porcentaje	0.000
Mezcla-Tiempo	0.439
Mezcla-Porcentaje	0.439
Tiempo-Porcentaje	0.368

En la figura 3.4 y tabla 3.5 se presenta los efectos de Pareto. Los efectos que se extienden más allá de la línea de referencia son significativos en el nivel predeterminado de 0.05. La columna A que es el porcentaje de lodo de petroquímica (LP) es el único factor que pasa la línea de referencia. En el Anexo IV se encuentra el desarrollo completo del diseño factorial realizado en el software Minitab v15.

El modelo matemático para este diseño factorial es el siguiente:

$$Y = 67 + 6.83x_M - 0.26x_T - 1.70x_{LP} - 0.40x_{M^*T} - 0.55x_{M^*LP} + 0.02x_{T^*LP} + 0.03x_{M^*T^*LP}$$

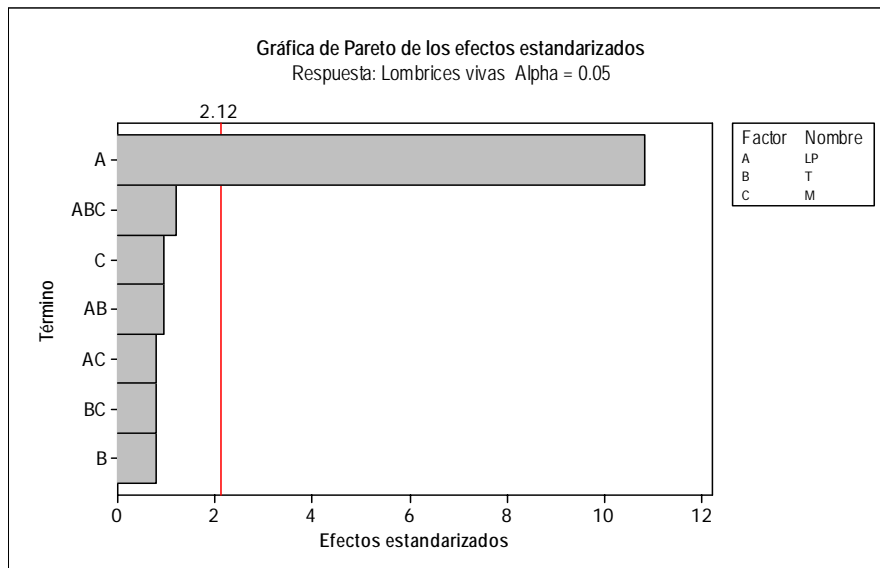


Figura 3.4. Gráfica de Pareto.

En la figura 3.5 se presenta la gráfica de probabilidad de los efectos estandarizados, los términos significativos se identifican con un símbolo cuadrado. El porcentaje de lodo de petroquímica (LP) es significativo ($\alpha = 0.05$).

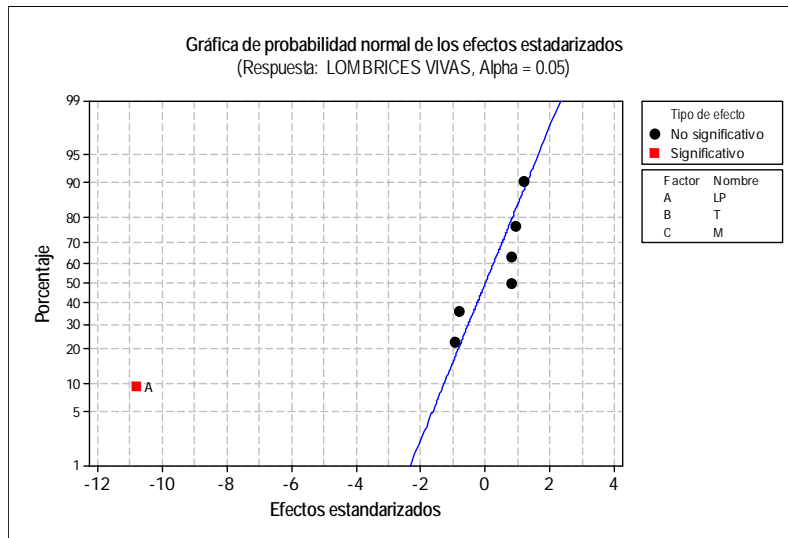


Figura 3.5 Gráfica de probabilidad normal de los efectos estandarizados.

En la figura 3.6 se encuentra la gráfica de contornos donde se observa la interacción entre el porcentaje de lodo de petroquímica y el tiempo de pre-estabilización y lombrices vivas después de la prueba de sobrevivencia, conforme más oscuro se encuentren los contornos más lombrices sobreviven, esto es a menor porcentaje de lodo de petroquímica más lombrices sobreviven, diferentes tiempos de pre-estabilización no afectan de manera directa a la sobrevivencia de las lombrices.

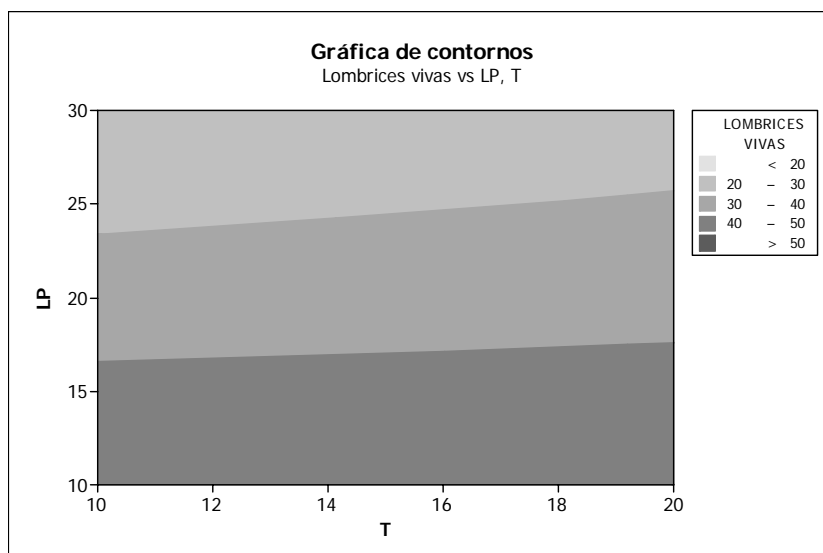


Figura 3.6 Gráfica de contornos

En la figura 3.7 se observa la interacción entre el lodo de petroquímica (eje x), tiempo de pre-estabilización (eje z) y lombrices vivas (eje y) después de la prueba de sobrevivencia; al aumentar el porcentaje de lodo de petroquímica (LP) y tiempo de pre-estabilización menos lombrices sobreviven.

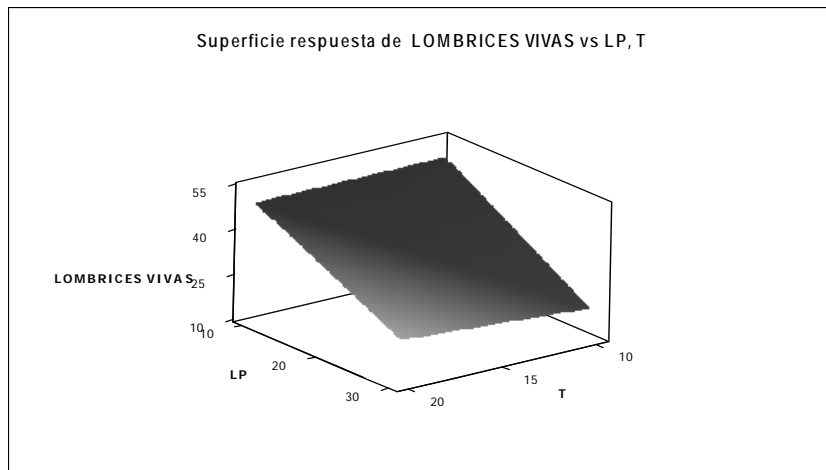


Figura 3.7. Superficie respuesta. Interacción entre lombrices vivas, porcentaje de lodo de petroquímica y tiempo

En la figura 3.8 se aprecia la interacción entre el porcentaje de lodo de petroquímica (LP), el tipo de mezcla (M1= -1 y M2=1) y lombrices vivas; se observa que al aumentar el LP el número de lombrices vivas disminuye y el tipo de mezcla no afecta en la sobrevivencia de las lombrices.

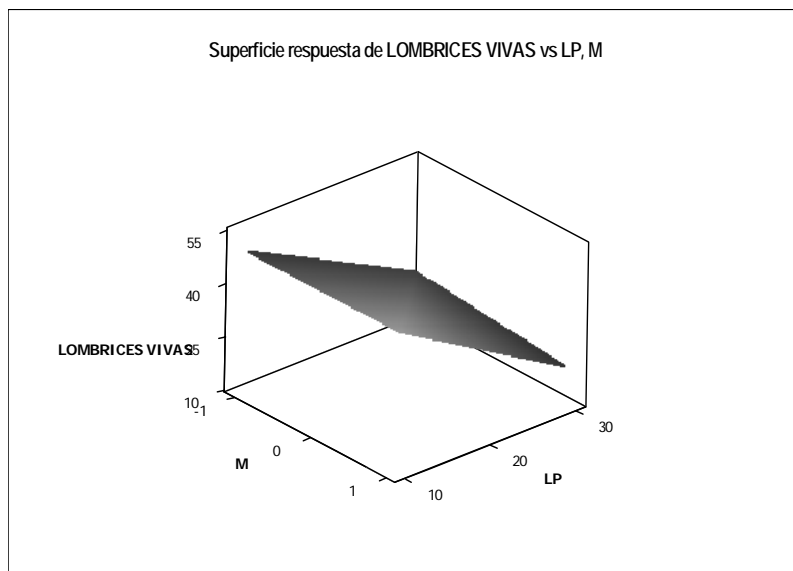


Figura 3.8. Superficie respuesta. Interacción entre lombrices vivas, porcentaje de lodo de petroquímica y tipo de mezcla.

En la figura 3.9 se observa la interacción entre el tiempo de pre-estabilización y el tipo de mezcla, en la cual se observa que no hay un efecto significativo con respecto al número de lombrices vivas; es decir el tipo de mezcla y el tiempo de pre-estabilización no afecta a las lombrices.

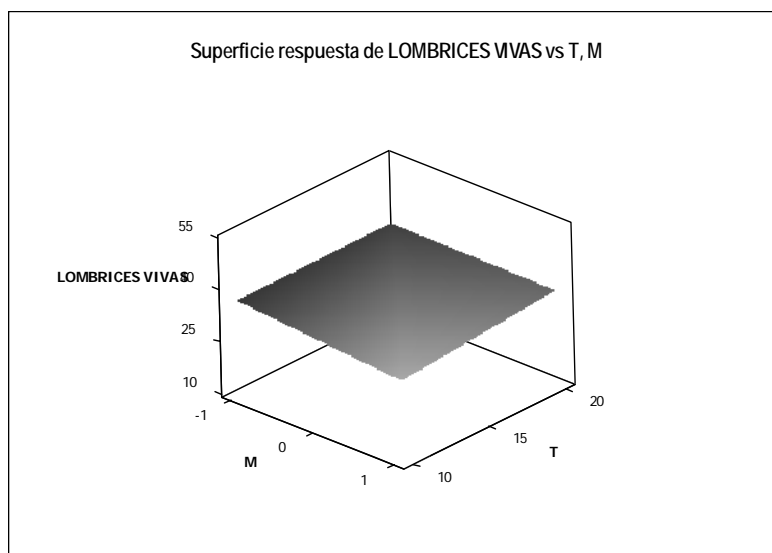


Figura 3.9. Superficie respuesta. Interacción entre lombrices vivas, tiempo y tipo de mezcla

PRUEBA DE VELOCIDAD DE DEGRADACIÓN

En la prueba de velocidad de degradación se utilizó la mezcla óptima obtenida de la etapa anterior. Después de la preparación de la mezcla se esperó el tiempo de pre-estabilización antes de agregar las lombrices. Se prepararon 500 gramos de mezcla y se agregaron 100 g de lombrices. Se realizó por triplicado (Lote A, B y C) con un testigo.

La mezcla para esta prueba se preparó con un lote diferente de lodo tóxico procedente de la petroquímica, en el cual no se presentaron las mismas características fisicoquímicas estudiadas ya con anterioridad. Este lodo presentaba una conductividad eléctrica mucho mayor, la cual no cumplía con las condiciones aceptables para que vivieran las lombrices. Se prepararon mezclas con 10%, 7%, 5%, 3%, 1% y 0%. Como se observó en los resultados del análisis estadístico de la fase anterior el tipo de mezcla y el tiempo de pre-estabilización no tienen efectos significativos no siendo así con el porcentaje de lodo tóxico el cual si presenta efectos significativos.

Tabla 3.6. Características del nuevo lote de lodo de petroquímica con diferentes porcentajes de concentración de lodo de petroquímica.

Porcentaje de lodo tóxico (%)	pH	Conductividad eléctrica (mS/cm)
10	8.16	4.66
7	8.11	3.08
5	8.05	2.53
3	7.81	1.09
1	7.63	0.53
0	7.30	0.09

En las pruebas de sobrevivencia realizadas anteriormente el rango de valores de los parámetros utilizados fueron: pH 6-7.40 y conductividad eléctrica 0.13-0.50 mS/cm; Bollo 2001 menciona que las condiciones en las cuales la lombriz tiene un nivel adecuado para vivir son: un pH entre 6.0 y 8.0 y una conductividad eléctrica de 3.0 mS/cm; en base a esto se decidió utilizar el porcentaje de lodo del 3% ya que cuenta con un valor de pH de 7.81 y conductividad eléctrica de 1.09 mS/cm como lo muestra la tabla 3.6. El valor de la conductividad eléctrica es más alto que en el experimento anterior y las lombrices se aclimataron a estas nuevas condiciones.

El periodo de prueba de velocidad de degradación constó de 40 días, 10 días de pre-estabilización y 30 días de vermicomposteo.

En las figuras 3.10-3.12 se observan los resultados de los sólidos totales y sólidos totales volátiles así como la relación entre ellos durante el periodo de la prueba, en el cual se muestra el mismo comportamiento en los tres lotes (réplicas).

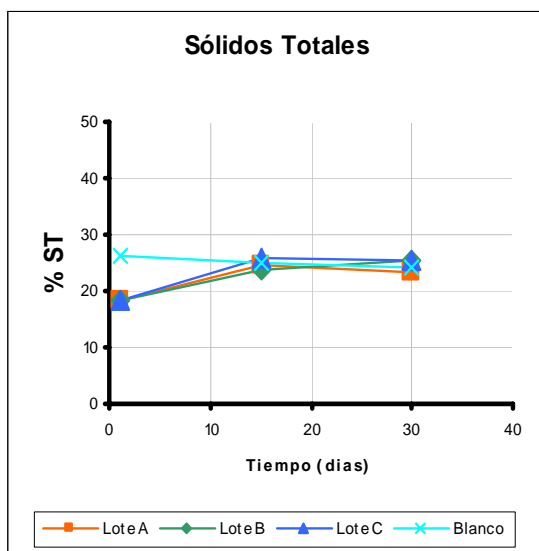


Figura 3.10. Porcentaje de ST en la prueba de de velocidad de degradación a escala laboratorio.

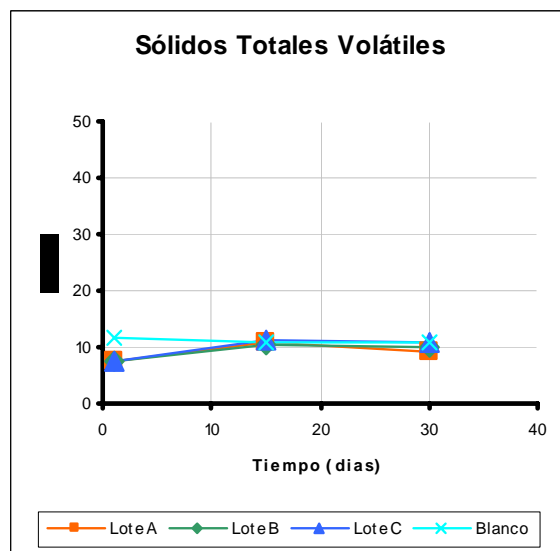


Figura 3.11. Porcentaje de STV en la prueba de de velocidad de degradación a escala laboratorio.

El porcentaje de materia volátil es medido con la relación STV/ST ; como se muestra en las figuras durante los primeros 15 días tiende a aumentar pero al finalizar la prueba éste disminuyó. La relación STV/ST en los lotes del 40% al 39.45% en promedio de los tres lotes nos indica que hay una biodegradación muy baja.

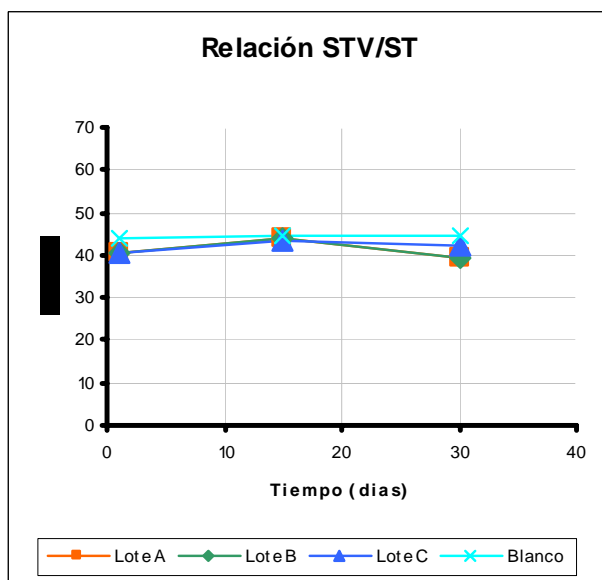


Figura 3.12. Relación STV/ST en la prueba de velocidad de degradación en un sistema a escala laboratorio.

Los parámetros de monitoreo del sistema medidos durante el desarrollo de esta prueba fueron conductividad eléctrica, pH y porcentaje de humedad. En las figuras que a continuación se muestran los tres lotes y como se

puede observar presentan el mismo comportamiento, durante los primeros 15 días la conductividad eléctrica no varía pero al finalizar la prueba ésta tiende a aumentar de 1.37 mS/cm a 1.7 mS/cm lote A, 1.37 mS/cm a 2.21 mS/cm Lote B y 1.37 mS/cm a 2.11 mS/cm en el lote C. En el anexo III se encuentran los valores que se presentan en las figuras.

El pH durante el desarrollo de toda la prueba tiende a ir disminuyendo y se presentó el mismo comportamiento en los tres lotes. Albanell y col (1988) mencionan que el proceso de vermicomposteo es el resultado de la combinación de la acción de las lombrices y la microflora que vive en el intestino de la lombriz y del medio. Los valores de pH del humus disminuyen, esto se debe al CO₂ y a los ácidos orgánicos producidos durante el metabolismo microbiano.

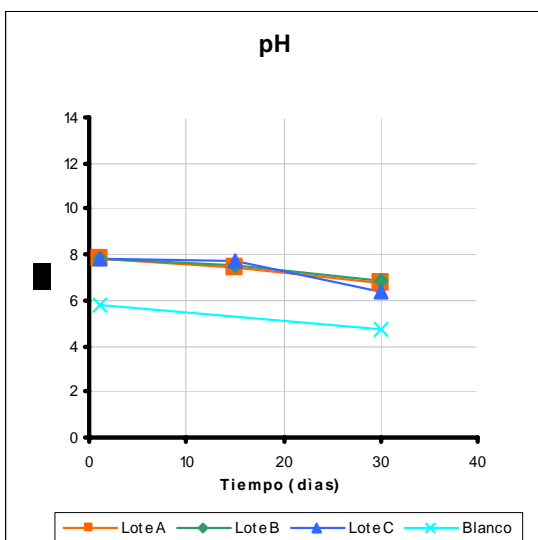


Figura 3.13. pH obtenido en la prueba de velocidad de degradación en un sistema a escala laboratorio

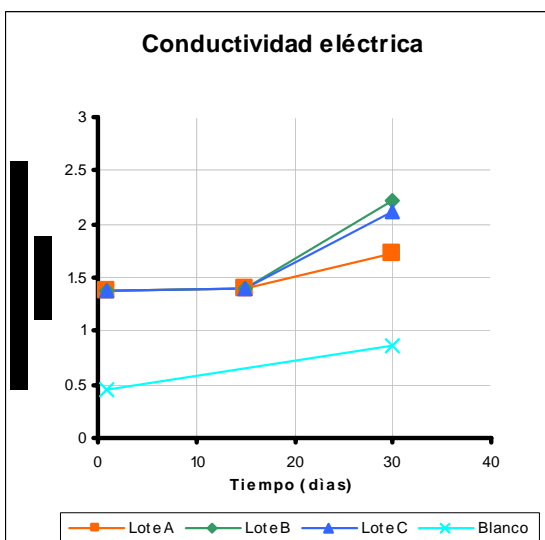


Figura 3.14. CE obtenida en la prueba de velocidad de degradación en un sistema a escala laboratorio.

El testigo también se comportó de la misma forma que las muestras pero en menor proporción; esto se debe a la acción de los microorganismos (bacterias y hongos) los cuales realizan una biodegradación aerobia.

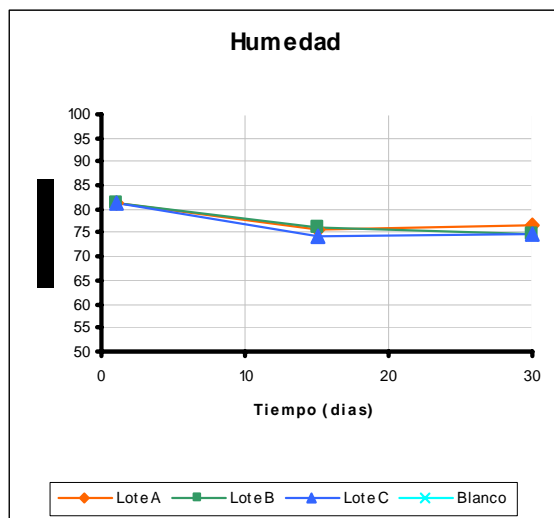


Figura 3.15. Porcentaje de humedad durante el desarrollo de la prueba de velocidad de degradación a escala laboratorio.

El porcentaje de humedad inicial en las tres muestras fue de 81% y se mantuvo en 75% hasta finalizar la prueba.

El cálculo de la relación L:L de los lotes A, B y C de la prueba de velocidad de degradación se muestran en la tabla 3.7 en la cual los tres lotes presentan velocidades muy bajas esto basándose en los experimentos realizados por Camp y col., (1981); ellos asumen que un radio de L: L de 0.20 es óptimo para los costos de un sistema de vermicomposteo.

Tabla 3.7. Relación L:L de los lotes A, B y C.

Lote	Peso seco de la mezcla inicial (g)	Porcentaje de sólidos totales	Peso humedo de lombrices (g)	Días de conversión total	Relación L:L
Lote A	500	18.53	115	15	0.05
Lote B	500	18.53	128	15	0.05
Lote C	500	18.53	109	15	0.06
Promedio	500	18.53	117	15	0.053

3.3 PRUEBAS PILOTO

Durante esta etapa se procedió a la instalación y operación de un sistema piloto de vermicomposteo con la mezcla seleccionada. Se prepararon 65 kg. de mezcla con 10 días en pre-estabilización.

Las lombrices se sembraron en el sistema 15 días antes de que se agregara la mezcla y se mantuvieron en condiciones óptimas de humedad, se estuvieron alimentando con lodo residual municipal únicamente. La densidad de las lombrices en cada lecho fue la indicada en la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Diferentes densidades de siembra de lombrices en las pruebas piloto para un sistema de vermicomposteo de lodo de proceso de la industria petroquímica

Tratamiento	Densidad de siembra
Lote A	4000 lombrices/ Lecho
Lote B	6000 lombrices/ Lecho
Lote C	12000 Lombrices/Lecho

Para obtener la densidad de lombrices deseada en cada lecho se realizaron varios conteos semanales con el dispositivo creado y de acuerdo al procedimiento ya mencionado en el capítulo anterior. Durante el conteo en cada lecho se tomaron 5 muestras aleatorias y se promediaron, si había una cantidad menor de lombrices se agregaban o si había de más se retiraban; todo esto realizado de forma manual.

Cuando se alimentó a las lombrices se agregaron 0.0666 m³ de mezcla a partir de ese momento inició el proceso de vermicomposteo, con un segundo periodo de alimentación, agregando el mismo volumen de mezcla. A continuación se presentan los resultados obtenidos durante este experimento.

Como se puede observar en la figura 3.16 el comportamiento del pH es el mismo que se ha ido observando en los anteriores experimentos, esto se debe a la acción de las lombrices. Los valores iniciales de pH en estas pruebas son de 8.08 y finales de 5.05, 4.89 y 4.16. Camp y col., (1981) observaron el mismo comportamiento con los valores iniciales de pH de 7.0 – 7.1 en el lodo a tratar y llegaron a valores 6.4-6.5 al finalizar el vermicomposteo; la mayoría de la bibliografía reporta un efecto opuesto a lo que se obtuvo ya que ocurre un aparente incremento en los valores de pH y esto se debe a la degradación de los ácidos orgánicos de cadena corta y la amonificación de N orgánico. La estabilización del pH, es atribuido a la oxidación del amonio por las bacterias nitrificantes y a la precipitación del carbonato de calcio (Tognetti y col., 2007).

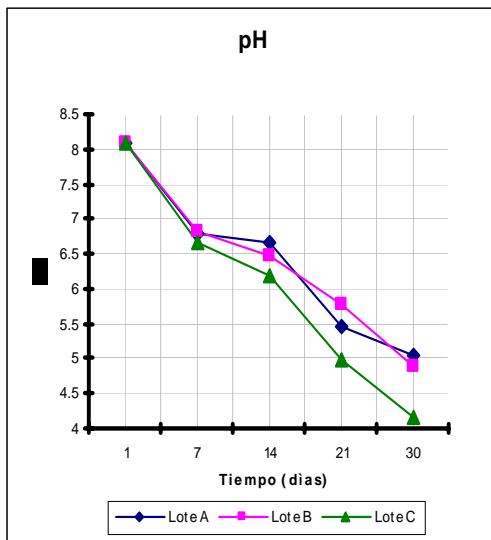


Figura 3.16. pH en tres lotes con diferentes densidades de lombrices a escala piloto.

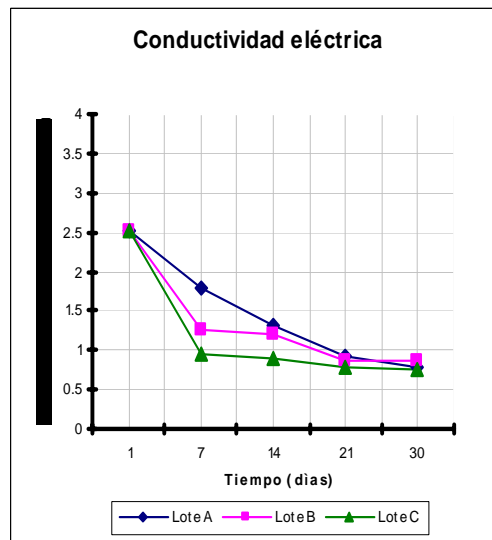


Figura 3.17. CE en tres lotes con diferentes densidades de lombrices a escala piloto.

Haimi y Huhta (1990) reportaron el decremento de los valores de pH en sistemas con *L. rubellus*. El efecto positivo de las lombrices en el pH está relacionado con la alimentación y la actividad del humus. También el posible efecto de las lombrices que actúa en el pH es la excreción de NH_4^+ . También encontraron que si el valor inicial de pH era menor que 7, esta tiende a disminuir el pH del humus. Hartenstein y Hartenstein (1981) notaron que *Eisenia foetida* disminuye el pH en lodo precedente de un sistema de lodos activados.

Los valores de conductividad eléctrica tienden a disminuir conforme las lombrices actúan y esto se ve reflejado en los valores obtenidos. Los valores iniciales de conductividad eléctrica son de 2.53 mS/cm y finalizaron con 0.78, 0.88 y 0.75 mS/cm respectivamente (Ver figura 3.17).

Los valores de conductividad eléctrica reflejan el contenido de sales solubles, que de esta manera representa un potencial para efectos fitotóxicos en el crecimiento de plantas si es aplicado al suelo. En sistemas abiertos como pilas de composteo o camas, la conductividad eléctrica disminuye durante el proceso debido a disolución de las sales cuando se realiza la humificación del sistema (Tognetti y col., 2007).

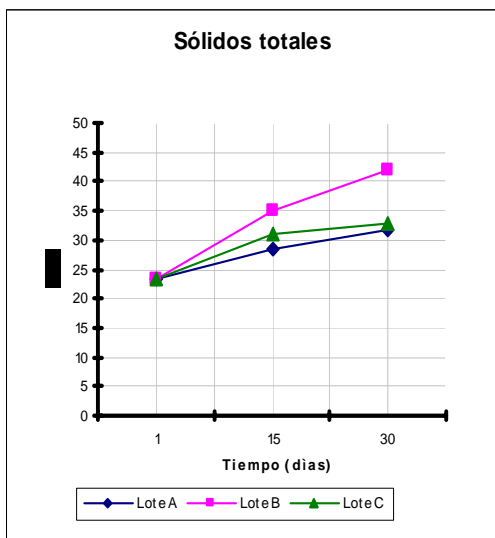


Figura 3.18. Porcentaje de ST en los lotes con diferentes densidades de lombrices a escala piloto.

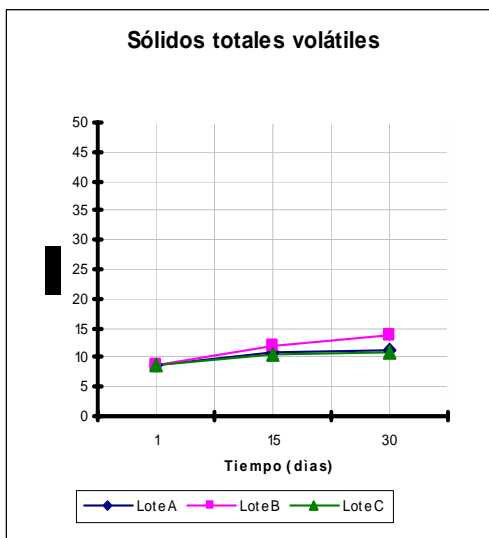


Figura 3.19. Porcentaje de STV en lotes con diferentes densidades de lombrices a escala piloto.

El porcentaje de los sólidos totales con respecto al tiempo fue aumentando como se puede observar en la figura 3.18, en los tres diferentes lotes se observa el mismo comportamiento pero el lote B fue el que obtuvo mayor porcentaje de sólidos totales; recordando que cada lote cuenta con diferente densidad de lombrices.

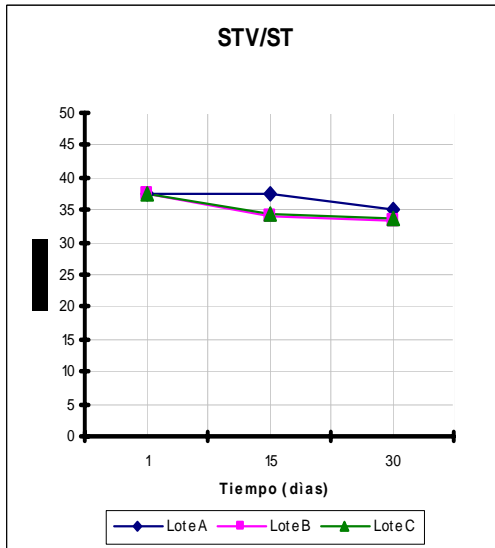


Figura 3.20. Relación STV/ST en tres lotes con diferentes densidades de lombrices a escala piloto.

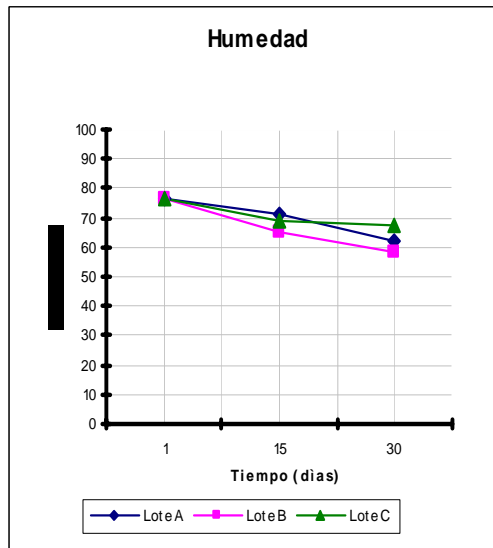


Figura 3.21. Porcentaje de Humedad en tres lotes con diferentes densidades de lombrices a escala piloto.

La relación STV/ST en los tres lotes fue muy similar y baja, se puede observar un decremento durante los primeros 15 días y posteriormente permanece constante hasta llegar al día 30. Este decremento que se

observó nos indica que comienza a realizarse la biodegradación de la mezcla. En el lote B y C se observa el mayor porcentaje de reducción (Ver tabla 3.10).

La humedad inicial del lodo fue del 76.64% conforme el lodo se fue transformando en humus, éste fue perdiendo humedad hasta llegar a valores 61.86%, 58.09% y 67.24% respectivamente (Tabla 3.9); Camp y col., (1981) mencionan que el humus pierde humedad de 1.5 a 2.1 veces más rápido que el lodo residual. También observaron que las lombrices secretan en el humus una membrana que sirve de protección a ellas mismas (lombrices) de sus heces (el humus es generalmente tóxico a las lombrices que lo producen). Es un efecto secundario de este proceso y esto incrementa la exposición de la superficie del humus al aire lo cual provoca que pierda humedad. En la tabla 3.9 se muestra un resumen de los parámetros iniciales y finales obtenidos del sistema piloto.

Tabla 3.9. Resumen de los parámetros iniciales y finales de sistemas pilotos de vermicomposteo para el tratamiento de lodo de proceso de un complejo petroquímico con diferentes densidades de lombrices.

Lote	Tiempo (días)	% ST	%STV	%STV/%ST	% Humedad	CE (mS/cm)	pH
Lote A	0	23.36	8.8	37.67	76.64	2.53	8.08
	30	31.79	11.19	35.19	61.86	0.78	5.05
Lote B	0	23.36	8.8	37.67	76.64	2.53	8.08
	30	41.91	13.92	33.21	58.09	0.88	4.89
Lote C	0	23.36	8.8	37.67	76.64	2.53	8.08
	30	32.76	11.04	33.69	67.24	0.75	4.16

Tabla 3.10. Porcentajes de reducción de CE, pH y la relación STV/ST en el tratamiento de lodo de proceso de un complejo petroquímico con diferentes densidades de lombrices.

Lote	% de reducción de STV/ST	% de reducción de CE	% de reducción de pH
Lote A	6.58	69.16	37.5
Lote B	11.83	65.21	39.48
Lote C	10.56	70.35	48.51

Al realizar las pruebas piloto se obtiene un mejor sistema de prueba para las lombrices a diferencia de la escala laboratorio ya que cuentan con un hábitat más estable para vivir y esto se ve reflejado en los resultados obtenidos. Los porcentajes de reducción de la conductividad eléctrica fueron mayores al 65% y los del pH mayores al 35%. Y esto se debe a la interacción de las lombrices y a las poblaciones microbianas con la mezcla, el pH tiende a la acidez debido a la acumulación de ácidos orgánicos del metabolismo microbiano o de la producción de ácido fúlvico y húmico durante la descomposición. (Albanell y col. 1988).

Se realizó el análisis de los micronutrientes y macronutrientes de los lotes A, B y C. Como se puede observar el valor inicial del Nitrógeno Total Kjeldahl fue 32,070 mg/kg y en los tres lotes se observa una disminución

esto se debe a que durante la actividad de alimentación de la lombriz *Eisenia foetida* acelera las velocidades de mineralización y reducción del nitrógeno. La disminución del contenido de nitrógeno total se debe a las pequeñas partes que la lombriz toma, así como a la desnitrificación bacteriana y la pérdida de amonio a la atmósfera (Camp y col., 1981). También puede deberse a que se tuvo una relación más fuerte entre el N-total y los fijadores de N₂ (Santamaría y col., 2001)

Como se puede observar en la tabla 3.11 los lotes A y B cumplen como excelentes biosólidos de acuerdo a los valores obtenidos en los metales pesados Zn y Cu. Camp y col, 1981 mencionan que las concentraciones de potasio y fósforo no producen un efecto directo en el crecimiento de la lombriz.

Tabla 3.11. Micronutrientes y macronutrientes presentes en los lotes A, B y C en las pruebas piloto.

Parámetros (mg/kg)	Mezcla inicial	Lote A	Lote B	Lote C	NOM-004-SEMARNAT-2002	
					Excelente (mg/kg) B.S.	Bueno (mg/kg) B.S.
NTK	32070	23007	23538	24506		
CO	16.55	11.48	10.48	9.75		
PT	9377	1654.92	1057.83	823.08		
K		1392.11	1556.13	1968.76		
Fe		25289.19	31880.55	30116.73		
Mg		3188.74	3590.60	3496.65		
Zn		979.52	942.48	971.94	2800	7500
Cu		1374.06	1484.28	1568.82	1500	4300

En cuanto a los indicadores biológicos los lotes A, B y C fueron clasificados clase C (Tabla 3.12) con base en la normatividad mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 para biosólidos. Contreras (2005, tomado de Pierre y col. 1982; Sinha y col. 2002) menciona que el sistema de vermicomposteo reduce el número de patógenos, esto debido a que las lombrices al producir el humus secretan una membrana, que también tiene propiedades antibacteriales y mata a los patógenos. En el lote C se presentó la mayor remoción de coliformes fecales (99.99%) siendo este lote el de mayor densidad de lombrices. El Lote A presenta una remoción del 99.99 % y el lote B 99.99% de coliformes fecales.

Tabla 3.12. Coliformes Fecales y Huevos de Helminto presentes en los lotes A, B y C.

Indicador	Mezcla inicial	Lote A	Lote B	Lote C	NOM-004-SEMARNAT-2002		
					Clase A	Clase B	Clase C
CF**	5.4x10 ⁹	470	380	230	<1000	<1000	<2,000,000
HH***	9	3	3	2	< 1	< 1	< 35

** Número más probable/g de base seca *** Huevos de helminto/g en base seca

El lote A y B presentan una reducción de 66.66% de huevos de helminto, el lote C, 77.77%. Cardoso y Ramírez (2002) realizaron 4 experimentos a escala piloto con una duración de 45 días con diferentes densidad de lombrices en mezclas de lodo residual y basura de jardín, la concentración inicial de coliformes fecales fue de 10,000 NMP/g de base seca y las concentraciones finales fueron 900, 700, 400, 680 NMP /g de base seca lo que indica una reducción aproximada del 93% de coliformes fecales, la concentración inicial de huevos de helminto fue de 0.63 HH/ g de base seca y las concentraciones finales fueron 0 dando un 100% de remoción después del aplicar el vermicomposteo. Realizaron un diseño experimental donde las variables fueron: lodo residual municipal, basura de jardín y densidad de lombrices.

4. CONCLUSIONES

La utilización de *Eisenia foetida* en un sistema de vermicomposteo para el tratamiento de lodos de proceso de un complejo petroquímico obtuvo como resultado un biosólido tipo excelente, clase C esto de acuerdo a la normatividad mexicana (NOM-004-SEMARNAT-2002) esto bajo las siguientes condiciones: pH: 8, CE: 2.53 mS/cm, humedad: 76.64% lodo de petroquímica: 3%, tipo de mezcla: lodo de petroquímica + lodo municipal, tiempo de pre-estabilización: 10 días, tiempo de vermicomposteo 30 días, ST: 23%, STV: 8.8%.

Este biosólido puede ser utilizado para uso forestal, y mejoramiento de suelos. En el mejoramiento de suelos, la aplicación de éste es para casos de derrames de productos químicos y derivados del petróleo. Para uso agrícola no se recomienda el uso de este biosólidos ya que este puede contener trazas de compuestos tóxicos. Las lombrices ya aclimatadas a este tipo de compuestos también pueden ser utilizadas en biorremediación de suelos contaminados.

En la caracterización inicial de los lodos utilizados se puede apreciar que el lodo municipal es adecuado para la sobrevivencia de las lombrices no siendo así el lodo de petroquímica el cual cuenta con una conductividad eléctrica muy alta y esto afecta directamente a las lombrices por lo que se utilizaron 2 porcentajes (10%,30%). En los resultados del análisis CRETIB el lodo de petroquímica es tóxico por la presencia de compuestos químicos como tricloroetileno, 1,1,2-tricloroetano, clorobenceno, tetracloroetileno; aunque todos estos compuestos se encuentran por debajo del límite máximo permisible que marca la NOM-052-ECOL-2001 y el lodo municipal se clasifica como biológico infeccioso.

Para la evaluación del mejor medio en la producción de vermicomposta con *Eisenia foetida* se utilizó la prueba de sobrevivencia en la cual se realizó un diseño experimental factorial 2³, con diferentes tipos de mezcla, porcentaje de lodo de petroquímica y tiempo de pre-estabilización y se obtuvo como resultado que la mejor mezcla en la cual sobrevivieron las lombrices fue la mezcla 1 (lodo de petroquímica + lodo municipal) con un tiempo de pre-estabilización de 10 días y porcentaje de lodo de petroquímica de 10%. También se evaluó la velocidad de degradación con la mezcla obtenida la cual nos indico que la velocidad es lenta (0.053), en comparación con 0.20, que es la velocidad óptima según Camp y col., (1981); por lo tanto las lombrices necesitan más tiempo para degradar este tipo de mezcla.

El estudio del efecto de las densidades de lombrices dió como resultado que no hay diferencias significativas entre las densidades de lombrices utilizadas (4000, 6000, 12000 lombrices/lecho) con los resultados

obtenidos, se recomienda utilizar la menor de estas. Los mismos resultados obtuvieron Coward y col., (1996) en donde probaron 45,000, 60,000 y 75,000 lombrices/m³.

En esta última evaluación se obtuvo una alta remoción de conductividad eléctrica (Lote A 69.16%, Lote B 65.21%, Lote C 70.35%) así como de coliformes fecales (Lote A 99.99% Lote B 99.99% y Lote C 99.99%). El pH y los huevos de helminto también presentaron una menor remoción. También se observó la biodegradación de la mezcla con la relación STV/ST (Lote A 6.58%, Lote B 11.83 % y Lote C 10.56%).

ANEXO I

Densidad aparente basado en NMX-AA-019-1985

Los pasos para la determinación de la densidad se describen a continuación:

1. Tomar una muestra de la mezcla recién hecha. La mezcla se puede tomar en una cubeta, con el volumen necesario para llenar una probeta o un vaso de precipitado de 1000 ml.
2. Se pesa la probeta o el vaso de 1000 ml vacíos, se anota el peso.
3. Se coloca en la probeta de 1000 ml la mezcla hasta el punto de aforo, se golpea levemente la probeta 10 veces sobre un lienzo de laboratorio, para permitir que las partículas se asienten y se vuelve a llenar con más mezcla hasta el punto de aforo.

Nota: Este punto es rebatible, ya que en opinión de algunos especialistas, la muestra debe colocarse en un vaso de precipitado, llenar a punto de aforo y no golpear el recipiente.

4. Se pesa la probeta con la mezcla, se descuenta el peso de la probeta vacía.
5. Se calcula la densidad de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$D.A. = P/V \quad (1)$$

Donde:

D.A.= Densidad aparente de la mezcla, g/ml

P= Peso de la mezcla en gramos por mililitro, (g/ml)

V= Volumen de la probeta en mililitros.

La densidad de la mezcla debe estar en un rango de 0.5 a 0.7 g/ml para asegurar una porosidad adecuada. Si la mezcla no está dentro de este rango se tiene que ajustar adicionando materiales acondicionadores.

ANEXO II

Características CRETIB según la norma NOM-004-ECOL-2002

Denominación	
Corrosividad (C)	<p>En estado líquido o en solución acuosa presenta un pH sobre la escala menor o igual a 2.0, o mayor o igual a 12.5.</p> <p>En estado líquido o en solución acuosa y a una temperatura de 55 °C es capaz de corroer el acero al carbón (SAE 1020), a una velocidad de 6.35 milímetros o más por año.</p>
Reactividad (R)	<p>Bajo condiciones normales (25 °C y 1 atmósfera), se combina o polimeriza violentamente sin detonación.</p> <p>En condiciones normales (25 °C y 1 atmósfera) cuando se pone en contacto con agua en relación (residuo-agua) de 5:1, 5:3, 5:5 reacciona violentamente formando gases, vapores o humos.</p> <p>Bajo condiciones normales cuando se ponen en contacto con soluciones de pH; ácido (HCl 1.0 N) y básico (NaOH 1.0 N), en relación (residuo-solución) de 5:1, 5:3, 5:5 reacciona violentamente formando gases, vapores o humos.</p> <p>Posee en su constitución cianuros o sulfuros que cuando se exponen a condiciones de pH entre 2.0 y 12.5 pueden generar gases, vapores o humos tóxicos en cantidades mayores a 250 mg de HCN/kg de residuo o 500 mg de H₂S/kg de residuo.</p> <p>Es capaz de producir radicales libres.</p>
Explosividad (E)	<p>Tiene una constante de explosividad igual o mayor a la del dinitrobenceno.</p> <p>Es capaz de producir una reacción o descomposición detonante o explosiva a 25°C y a 1.03 kg/cm² de presión.</p>
Toxicidad al ambiente (T)	<p>Cuando se somete a la prueba de extracción para toxicidad conforme a la norma oficial mexicana NOM-053-ECOL-1993.</p>
Inflamabilidad (I)	<p>En solución acuosa contiene más de 24% de alcohol en volumen.</p> <p>Es líquido y tiene un punto de inflamación inferior a 60°C.</p> <p>No es líquido pero es capaz de provocar fuego por fricción, absorción de humedad o cambios químicos espontáneos (a 25°C y a 1.03 kg/cm²).</p> <p>Se trata de gases comprimidos inflamables o agentes oxidantes que estimulan la combustión.</p>
Biológico-infeccioso (B)	<p>Cuando el residuo contiene bacterias, virus u otros microorganismos con capacidad de infección.</p> <p>Cuando contiene toxinas producidas por microorganismos que causen efectos nocivos a seres vivos.</p> <p>La mezcla de un residuo peligroso conforme a esta norma con un residuo no peligroso será considerada residuo peligroso.</p>

ANEXO III
Prueba P50L de sobrevivencia.

Las tablas A.1-A.8 cuentan con la mezcla 1 LP + LM durante el tiempo de pre-estabilización.

Tabla A.1. pH Tiempo de pre-estab.= 10 % de LP =10

Tiempo (días)	Lote A	Lote B	Lote C
1	6.54	6.3	6.44
6	6.6	6.45	6.39
10	6.68	6.54	6.3

Tabla A.2. Conductividad eléctrica (mS/cm).
Tiempo de pre-estab. = 10 % de LP= 10

Tiempo (días)	Lote A	Lote B	Lote C
1	0.12	0.3	0.37
6	0.29	0.31	0.22
10	0.2	0.25	0.27

Tabla A.3. pH Tiempo de pre-estab.= 20. % de LP = 10

Tiempo (días)	Lote A	Lote B	Lote C
1	6.32	6.27	6.25
10	6.33	6.12	6.07
20	6.37	6.29	6.22

Tabla A.4. Conductividad eléctrica (mS/cm).
Tiempo de pre-estab. = 20 % de LP= 10

Tiempo (días)	Lote A	Lote B	Lote C
1	0.08	0.23	0.17
10	0.09	0.19	0.16
20	0.11	0.21	0.2

Tabla A.5. pH Tiempo de pre-estab.= 10 % de LP = 30

Tiempo (días)	Lote A	Lote B	Lote C
1	7.1	7.18	7.2
6	7.16	7.09	7.13
10	7.28	7.11	7.21

Tabla A.6. Conductividad eléctrica (mS/cm).
Tiempo de pre-estab. = 10 % de LP= 30

Tiempo (días)	Lote A	Lote B	Lote C
1	0.43	0.49	0.4
6	0.41	0.47	0.4
10	0.34	0.48	0.42

Tabla A. 7. pH Tiempo de pre-estab.= 20 % de LP = 30

Tiempo (días)	Lote A	Lote B	Lote C
1	7.2	7	7.09
10	7.22	7.2	6.62
20	7.22	7.2	6.92

Tabla A.8. Conductividad eléctrica (mS/cm).
Tiempo de pre-estab. = 20 % de LP= 30

Tiempo (días)	Lote A	Lote B	Lote C
1	0.12	0.3	0.37
10	0.3	0.31	0.44
20	0.34	0.32	0.42

Las tablas A.9-A.17 cuentan con la mezcla 2 LP+LM+MA durante el tiempo de pre-estabilización.

Tabla A.9. pH Tiempo de pre-estab.= 10
% de LP = 10

Tiempo (días)	Lote A	Lote B	Lote C
1	6.35	6.22	6.43
6	6.36	6.33	6.4
10	6.68	6.4	6.45

Tabla A.10. Conductividad eléctrica (mS/cm).
Tiempo de pre-estab. = 10 % de LP= 10

Tiempo (días)	Lote A	Lote B	Lote C
1	0.18	0.15	0.18
6	0.17	0.13	0.18
10	0.18	0.12	0.19

Tabla A.11. pH Tiempo de pre-estab.= 20
% de LP = 10

Tiempo (días)	Lote A	Lote B	Lote C
1	6.52	6.43	6.35
10	6.45	6.39	6.42
20	6.5	6.77	6.86

Tabla A.12. Conductividad eléctrica (mS/cm).
Tiempo de pre-estab. = 20 % de LP= 10

Tiempo (días)	Lote A	Lote B	Lote C
1	0.14	0.11	0.14
10	0.13	0.15	0.16
20	0.14	0.16	0.11

Tabla A.13. pH Tiempo de pre-estab.= 10
% de LP = 30

Tiempo (días)	Lote A	Lote B	Lote C
1	7.23	6.8	6.62
6	7.3	6.89	6.98
10	7.69	7.29	7.13

Tabla A.14. Conductividad eléctrica (mS/cm).
Tiempo de pre-estab. = 10 % de LP= 30

Tiempo (días)	Lote A	Lote B	Lote C
1	0.22	0.29	0.19
6	0.35	0.33	0.29
10	0.49	0.5	0.46

Tabla A.15. pH Tiempo de pre-estab.= 20
% de LP = 30

Tiempo (días)	Lote A	Lote B	Lote C
1	7.69	7.29	7.13
10	7.45	7.32	7.13
20	7.5	7.32	7.13

Tabla A.16. Conductividad eléctrica (mS/cm).
Tiempo de pre-estab. = 20 % de LP= 30

Tiempo (días)	Lote A	Lote B	Lote C
1	0.49	0.5	0.46
10	0.51	0.49	0.47
20	0.51	0.5	0.47

Tabla A.17 Parámetros de control de la prueba P50L.

Mezcla 1: LP + LM.

Tipo de mezcla		pH			Conductividad eléctrica (mS/cm)		
Tiempo= 10 d %LP= 10	Inicial	6.68	6.54	6.30	0.20	0.25	0.27
	Final	6.20	6.30	6.24	0.12	0.3	0.37
Tiempo= 20 d %LP= 10	Inicial	6.37	6.29	6.22	0.11	0.21	0.2
	Final	6.34	6.30	6.14	0.12	0.24	0.37
Tiempo= 10 d %LP= 30	Inicial	7.28	7.20	7.21	0.44	0.48	0.42
	Final	7.27	7.21	7.20	0.44	0.49	0.40
Tiempo= 20 d %LP= 30	Inicial	7.22	7.21	7.20	0.34	0.32	0.42
	Final	7.21	7.20	7.20	0.43	0.49	0.40

Tabla A.18. Parámetros de control de la prueba P50L.

Mezcla 2: LP + LM + MA

Tipo de mezcla		pH			Conductividad eléctrica (mS/cm)		
Tiempo= 10 d %LP= 10	Inicial	6.68	6.40	6.45	0.18	0.12	0.19
	Final	6.60	6.39	6.40	0.19	0.13	0.2
Tiempo= 20 d %LP= 10	Inicial	6.50	6.80	6.86	0.14	0.16	0.11
	Final	6.51	6.77	6.83	0.13	0.15	0.12
Tiempo= 10 d %LP= 30	Inicial	7.69	7.29	7.21	0.49	0.50	0.46
	Final	7.65	7.32	7.22	0.51	0.50	0.48
Tiempo= 20 d %LP= 30	Inicial	7.50	7.32	7.13	0.51	0.50	0.47
	Final	7.49	7.31	7.12	0.50	0.51	0.49

RESULTADOS DE LA PRUEBA DE VELOCIDAD DE DEGRADACIÓN

LOTE A

Tabla A.19. Resultados obtenidos durante la prueba de velocidad de degradación en el lote A.

Tiempo (días)	%ST	% STV	% STV/%ST	% H	pH	Conductividad eléctrica (uS/cm)	Temperatura °C	Profundidad cm	Peso de Biomasa g
0	18.53	7.54	40.71	81.47	7.82	1.37	24.2	8	100
15	24.49	10.70	43.69	75.51	7.4	1.39	25	---	---
30	23.25	9.17	39.45	76.75	6.75	1.72	24.8	6.5	108

LOTE B

Tabla A.20. Resultados obtenidos durante la prueba de velocidad de degradación en el lote B.

Tiempo (días)	%ST	% STV	% STV/%ST	% H	pH	Conductividad eléctrica (uS/cm)	Temperatura °C	Profundidad cm	Peso de Biomasa g
0	18.53	7.54	40.71	81.47	7.82	1.37	24.2	8	100
15	23.85	10.46	43.88	76.15	7.5	1.4	25	---	---
30	25.53	10.05	39.37	74.47	6.86	2.21	24.8	7.1	102.5

LOTE C

Tabla A.21. Resultados obtenidos durante la prueba de velocidad de degradación en el lote C.

Tiempo (días)	%ST	% STV	% STV/%ST	% H	pH	Conductividad eléctrica (uS/cm)	Temperatura °C	Profundidad cm	Peso de Biomasa g
0	18.53	7.54	40.71	81.47	7.82	1.37	24.2	8	100
15	25.89	11.16	43.10	74.11	7.71	1.39	25	----	---
30	25.35	10.68	42.12	74.65	6.34	2.11	24.8	6.2	93.4

TESTIGO

Tabla A.22. Resultados obtenidos durante la prueba de velocidad de degradación en el Blanco.

Tiempo (días)	%ST	% STV	% STV/%ST	% H	pH	Conductividad eléctrica (uS/cm)	Temperatura °C	Profundidad cm	Peso de Biomasa g
0	26.25	11.62	44.25	73.75	5.84	0.46	24.2	8	100
30	24.85	11.00	44.28	75.15	4.71	0.87	24.8	7	97

ANEXO IV

DESARROLLO DEL DISEÑO FACTORIAL 2³ POR EL PROGRAMA MINITAB v15

Factorial Fit: LOMBRICES VIVAS versus LP, T, M

Estimated Effects and Coefficients for LOMBRICES VIVAS (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		36.00	1.247	28.88	0.000
LP	-27.00	-13.50	1.247	-10.83	0.000
T	2.00	1.00	1.247	0.80	0.434
M	-2.33	-1.17	1.247	-0.94	0.363
LP*T	2.33	1.17	1.247	0.94	0.363
LP*M	-2.00	-1.00	1.247	-0.80	0.434
T*M	2.00	1.00	1.247	0.80	0.434
LP*T*M	3.00	1.50	1.247	1.20	0.246

S = 6.10669 PRESS = 1342.5
R-Sq = 88.44% R-Sq(pred) = 73.99% R-Sq(adj) = 83.38%

Analysis of Variance for LOMBRICES VIVAS (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	4430.67	4430.67	1476.89	39.60	0.000
2-Way Interactions	3	80.67	80.67	26.89	0.72	0.554
3-Way Interactions	1	54.00	54.00	54.00	1.45	0.246
Residual Error	16	596.67	596.67	37.29		
Pure Error	16	596.67	596.67	37.29		
Total	23	5162.00				

Unusual Observations for LOMBRICES VIVAS

Obs	StdOrder	LOMBRICES VIVAS	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
3	18	15.0000	25.0000	3.5257	-10.0000	-2.01R
9	16	14.0000	25.0000	3.5257	-11.0000	-2.21R
18	2	35.0000	25.0000	3.5257	10.0000	2.01R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Estimated Coefficients for LOMBRICES VIVAS using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	67.0000
LP	-1.70000
T	-0.266667
M	6.83333
LP*T	0.0233333
LP*M	-0.550000
T*M	-0.400000
LP*T*M	0.0300000

REFERENCIAS

Albanell, E., Plaixats, J., Cabrero, T. (1988) Chemical changes during vermicomposting (*Eisenia fetida*) of sheep manure mixed with cotton industrial wastes. *Biology and fertility of Soil*. 6 pp 266-269)

Arnaud, C., Saint-Denis, M., Narbonne, J.F., Soler, P., Ribera, D. (2000) Influences of different standardised test methods on biochemical responses in the earthworm *Eisenia foetida andrei*. *Soil Biology & Biochemistry* 32 pp 67-73.

Atiyeh, R., Dominguez J., Subler S. y Edwards C. (2000) Changes in biochemical properties of cow manure during processing by earthworms (*Eisenia andrei*, *Bouché*) and effects on seedling growth. *Pedobiología* 44, pp 709-724.

Blakemore, R. (1995). The use of earthworms for bioconversion of sewage sludge and municipal waste. Compiled for act department of urban services waste management. Division of Entomology. Canberra.

Belfroid, A., Meiling J., Drenth, H.J., Seinen, W., Van Gestel K. (1995) Dietary uptake of superlipophilic compounds by earthworms (*Eisenia andrei*). *Ecotoxicology and Environmental Safety* vol 31: pp 185-1991.

Belfroid, A.C. and Sijmn; (1995) Influences of soil organic matter content on elimination rates of hydrophobic compounds in the earthworm: possible causes and consequences. *Chemosphere*, 37 (7) : pp 1221-1234.

Bollo, T., (2001). LOMBRICULTURA una alternativa de reciclaje; Soboc Grafic, Quito, Ecuador. ISBN: 9978-40-812-6.

Callahan, C., Russell, K., Peterson S., (1985). A comparison of three earthworm bioassay procedures for the assessment of environmental samples containing hazardous wastes. *Biology and fertility of soils* 1: 195-200.

Camp, Dresser and McKee Inc. (1981). Engineering Assessment of Vermicomposting Municipal Wastewater Sludges. USEPA, Cincinnati, Ohio.

Cardoso, L, Ramírez E. (2002). Vermicomposting of sewage sludge: a new technology for México. *Water Science and Technology* Vol. 46, No. 10 pp 153-158. IWA Publishing.

Cardoso, L., (2005). Tratamiento y disposición y aprovechamiento de lodos residuales. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Red Iberoamericana de potabilización y depuración de Agua, Centro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México. Jiutepec, Morelos. ISBN: 968-5536-67-8.

Cardoso L, Ramírez E. (2006) Biodegradación de desechos de curtiduría y lodo residual por composteo y vermicomposteo. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XXI no. 2 pp 95-105 abril-junio.

Chapela G., (2001). Prospectiva de la investigación y desarrollo tecnológico del sector petrolero al año 2025; Instituto Mexicano del Petróleo.

Castaldi, F.J.; Ford, D.L. (1992). Slurry bioremediation of petrochemical waste sludges. *Water science and technology*. 25(3):207-12.

Contreras R., (2004). Tesis de doctorado: Asimilación y acumulación de HPA's en *Eisenia foetida*; Centro de investigación y de Estudios Avanzados del IPN, México.

Contreras R., Escamilla S., Dendooven (2005). Vermicomposting of biosolids with cow manure and oat straw. *Biol. Fert. Soil.* 41: pp 190-198.

Coward J., Alvarado G., Briceño J., (1996) X Congreso Nacional Agronómico / II Congreso de Suelos. Evaluación de cuatro densidades poblacionales de Lombrices (*Eisenia foetida*), en el vermicompostaje de Broza de café. Universidad de Costa Rica.

Davis, A., Hodson E., Black., (2002). Changes in Toxicity and Bioavailability of Lead in Contaminated Soils to the Earthworm *Eisenia foetida* (Savigny 1826) After Bone Meal Amendments to the Soil. *Environmental Toxicology and Chemistry*. Vol. 21 pp. 2685-2691

DOF (1993) Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993, que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

DOF (2003) Norma Oficial Mexicana NOM-004-ECOL-2002, Protección ambiental.- Lodos, y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.

Dominguez J., Parmelee, R.W. and Edwards C. (2003). Interactions between *Eisenia andrei* (Oligochaeta) and nematode populations during vermicomposting. *Pedobiología* 47: pp 53-60

Estrada, V., (1992). Tesis de Licenciatura en Ingeniería Industrial en Química: Tratamiento de Lodos Residuales por Composteo. Instituto Tecnológico de Zacatepec. Morelos.

Elvira C., Sampedro L., Benitez E., Nogales R., (1998) Vermicomposting of sludge from paper mill and dairy industries with *Eisenia andrei*. A pilot-scale study. *Bioresour Technol* 63: pp 205-211.

Haimi J., y Huhta V., (1990). Effects of earthworms on decomposition processes in raw humus forest soil: A microcosm study. *Biology and fertility of soils* 10: pp 178-183

Instituto Mexicano de tecnología del Agua, (1991) Manual para el composteo de lodos residuales. 1 edición.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, (2002) Estudio de pre-tratabilidad de las aguas residuales de Petroquímica Pajaritos, S.A. de C.V. en los Complejos Petroquímicos de Cangrejera y Morelos.

Jager, T., (1998). Mechanistic Approach for Estimating Bioconcentration of Organic Chemicals in Earthworms (Oligochaeta). *Environmental Toxicology and Chemistry*. Vol. 17 No. 10 pp 2080-2090.

Jiménez B. (2001). La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada. Limusa, México ISBN: 6042-X

Krauss, Martin; Wilcke Wolfgang y Zech Wolfgang. (2000). Availability of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Polychlorinated Biphenyls (PCBs) to Earthworms in Urban Soils. *Environmental Science Technology*, 34 pp. 4334-4340.

Labrador, J. (1997). La materia orgánica en los agrosistemas. Ministerio de Agricultura y Pesca. Mundi-Prensa. Madrid, España.

Langdon, C., Pearce Pierce T., Meharg, A., Semple, K., (2003). Interactions Between Earthworms and Arsenic in the Soil Environment: a Review. *Environmental Pollution*, (124) 361-373.

Ley Federal del Equilibrio Ecológico y de la Protección del Ambiente (1998) México.

Legall, J., Dicovski, L., Valenzuela, Z.,(2002). (en línea) Manual básico de lombricultura para condiciones tropicales. Escuela de Agricultura y Ganadería de Estela, Nicaragua. Accesada en Noviembre 2004. <http://usuarios.arnet.com.ar/mmorra/CPNPrincipal.html>

Liste H.H. and Alexander, M; (2002) Butanol extraction to predict bioavailability of PAH's in soil. *Chemosphere*, 46: pp 1011-1017.

López J. M., Hernández S. M. y Elorza M. P., (2003). Evaluación de la densidad de población de la lombriz compostera (*Eisenia andrei* Savigni). *Revista UDO Agrícola* 3 (1): pp 12-16.

Martínez, C., (1999). Potencial de la lombricultura. Elementos básicos para su desarrollo. Texcoco, Estado de México.

Martínez, C., (2004). Lombricultura, alternativa en la agricultura sustentable. III Curso Teórico-Práctico de Lombricultura y Abonos orgánicos.

Montgomery, D. (2004). Diseño y análisis de experimentos. Limusa Wiley, New York. ISBN: 968-18-6156-6.

Myers, P. (2001). Annelida (on line) Animal Diversity web. Accesada Octubre 2004. <http://animaldiversity.ummz.umich.edu/site/accounts/information/Annelid.html>

Neuhauser, E.F., Callahan, C.A; (1990); Growth and reproduction of the earthworm *Eisenia fetida* exposed to sublethal concentrations of organical chemicals. *Soil Biology and Biochemistry*, 22(2): pp 175-179

Norma Mexicana NMX- AA-034-SCFI-2001. Determinación de sólidos y sales disueltas.

Norma Mexicana NMX-AA-042-1987 Determinación de numero más probable de Coliformes totales, Coliformes fecales (Termotolerantes) y *Escherichia coli* (Presuntiva).

Norma Mexicana NMX-AA-25-1984. Determinación de pH. Método Potenciometrico.

Norma Mexicana NMX-AA-24-1984. Determinación de Nitrógeno Total.

Norma Mexicana NMX- AA- 016-1984. Determinación de Humedad.

Norma Mexicana NMX-AA-033-1985. Determinación de poder calorífico superior.

OECD, (1984). Test 207: Earthworms, Acute toxicity Test. In: Organization for Economic Co-operation and Development (ed), OECD Guidelines for testing of Chemical, Paris.

Pierre V. Phillip R, Margnerite L, Pierrelle C. (1982). Antibacterial activity of the haemolytic system from the earthworms *Eisenia foetida andrei*. *Invertebr Phatol* 40: pp 21-27

Reinecke, A.J. Reinecke S.A., Maboeta, M.S. (2001). Cocoon production and viability as endpoints in toxicity testing of heavy metals with three earthworms species. *Pedobiología* 45: pp 61-68.

Reséndez Alejandro Moreno , Valdés Perezgasga María Teresa y Zarate López Tito (2005) Desarrollo de tomate en sustratos de vermicompost/arena bajo condiciones de invernadero. *Agricultura Técnica*, Vol. 65, No. 1, pp. 26-34

Safwat, H., Hanna, S. And Weaver, R; (2002) Earthworms survival in oil contaminated soil. *Plant and soil*, 240: pp127-132.

Santamaría, R.S., Ferrera, C.R., Almaraz, S.J., Galvis, S.A., Barois, B.I., (2001). Dinámica y relaciones de microorganismos, C-orgánico y N-Total durante el composteo y vermicomposteo. *Agrociencia* 35: pp 377-384.

Shuldt, Miguel;(2004) Lombricultura fácil; Buenos Aires, Argentina. ISBN: 987-43-7070-X

Sinha RK, Heart S, Agarwal S, Asadi R, Carretero E. (2002). Vermiculture and waste management: study of action of earthworms *Elsinia foetida*, *Eudrilus euginae* and *Perionyx excavatus* on biodegradation of some community waste in India and australia. *Environmentalist* 22: 261-268.

Tang, J. Liste, H., Alexander, M (2002) Chemical assays of availability to earthworms of polycyclis aroamtic hydrocarbons in soil. *Chemosphere*, 48 : pp 35-42.

Tognetti, C., Mazzarino, M., Laos F., (2007) Cocomposting biosolids and municipal organic waste: effects of process management on stabilization and quality. 43: pp 387-397.

USEPA. (2003) Enviromental Regulations and Technology. Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge (Including Domestic Septage) Under 40 CFR Part 503.

Volkes S.T., Velasco J.A., (2002). Tecnologías de remediación para suelos contaminados. INE-SEMARNAT, México.

Wei-Chun Ma, Immerzeel J., Bodt J. (1995). Earthworm and foof interactions on bioaccumulation and disappareance soil of polycyclic aromatic hydrocarbons: studies on phenanthrene and flouranthene. *Ecotoxicol Environ Saf.* 32(3): pp 226-232.