



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Instituto de Ciencias

Centro de Agroecología

Maestría en Manejo Sostenible de Agroecosistemas

**Transformación de residuos orgánicos domiciliarios y eucalipto
bajo enfoque agroecológico por medio de lombricompostaje en
Puebla**

TESIS

Que para obtener el grado de

Maestro en Manejo Sostenible de Agroecosistemas

Presenta

Biól. Suriel Enrique Flores Cruz

Comité Tutoral

Director de Tesis

Dr. José Cinco Patrón Ibarra

Asesores

Dr. Dionicio Juárez Ramón

Dr. Antonino Báez Rogelio

Dr. Joel Pineda Pineda

Puebla, Puebla, Enero 2020



BUAP

La presente tesis, titulada: **“Transformación de residuos orgánicos domiciliarios y eucalipto bajo enfoque agroecológico por medio de lombricompostaje en Puebla.”**, realizada por el alumno **Biól. Suriel Enrique Flores Cruz**, bajo la dirección del Comité Tutorial indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN
MANEJO SOSTENIBLE DE AGROECOSISTEMAS**

COMITÉ TUTORAL:

DIRECTOR: _____


Dr. José Cinco Patrón Ibarra

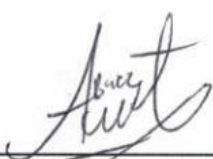
ASESOR: _____


Dr. Dionicio Juárez Ramón

ASESOR EXTERNO: _____

Dr. Joel Pineda Pineda

REVISOR EXTERNO: _____


Dr. Antonino Baez Rogelio

Puebla, Pue., Enero de 2020.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CoNaCyT), a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), al Instituto de Ciencias de la BUAP, y a VermiBUAP.

Con especial atención, le doy las gracias, a todos aquellos investigadores que me brindaron en algún momento su apoyo, ya sea con asesorías, instrumental, o con la gentileza de permitirme el ingreso a sus laboratorios. A mi tutor de tesis, el Dr. José Cinco Patrón Ibarra, perteneciente a la Maestría en Manejo Sostenible de Agroecosistemas. Asimismo, agradezco a mis asesores, al Dr. Antonino Baez Rogelio perteneciente al Centro de Ciencias Microbiológicas, asimismo para el Dr. Dionicio Juárez Ramón que es parte de la Maestría en Manejo Sostenible de Agroecosistemas, también al Dr. Joel Pineda Pineda que es parte de la Universidad Autónoma Chapingo, por último pero no menos importante se encuentra el Dr. Carlos Contreras responsable del Laboratorio de Cultivo de Tejidos Vegetales.

Quiero agradecer de igual forma al M.C. Cesar Calderón Fabián quien es parte del Departamento de Investigación de Ciencias Agrícolas por la realización de los análisis de los parámetros físico-químicos.

Por último y no menos importante agradezco la participación de la ciudadanía que se compromete a ser parte de una sociedad participativa en busca de soluciones para nuestras problemáticas ambientales.

Agradezco a la vida, a la causalidad de las cosas.

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico a mi madre, la señora María Josefa Cruz González, a mi padre, el señor José Macario Enrique Flores Figueroa, por ser mis primeros y eternos maestros, y por apoyar a este loco de la familia. Le brindo mi trabajo a mis hermanos Adair y Josué, por estar a mi lado y ser parte de mi camino y aprendizaje.

Este trabajo representa al equipo VermiBUAP, en especial a todos aquellos que en algún momento me apoyaron sin esperar nada a cambio, a Miguel, Justino, Adriana, Jonathan, Ingrid, Diego y a Jorge.

El proyecto va para cierto sector de la sociedad: al que está cansado de seguir en el mismo camino de autodestrucción e indiferencia ambiental.

RESUMEN

En este trabajo se caracterizó física, química y biológicamente el proceso de transformación de residuos orgánicos domiciliarios y hojarasca de *Eucalyptus sp.* por medio del lombricompostaje en tres etapas: vertido de materiales, precomposteo y obtención de lombricompostas. Se realizó un diseño de bloques completamente al azar con tres tratamientos, el primero con 100 % residuos domiciliarios, el segundo correspondió a 100 % hojarasca de *Eucalyptus sp.* y el tercero a la mezcla de ambos: se realizaron los perfiles de temperaturas, y la relación costo-beneficio. Los datos se analizaron por duplicado y triplicado. El T3 y el T1 son rentables y cumplen con los parámetros establecidos en la NMX-FF-109-SCFI-2008 para la determinación de la calidad con respecto al grado de pureza de las lombricompostas obtenidas, así como en los parámetros físico-químicos (excepto la humedad) y contenido de metales pesados. Las determinaciones biológicas muestran una gran carga de microorganismos en las lombricompostas: las densidades bacterianas van del orden de 10^5 a 10^7 UFC/g, mientras que las fúngicas del rango de 10^6 a 10^8 UFC/g; los tratamientos T3 y T1 comparten la presencia de los géneros *Fusarium*, *Trichoderma*, *Rizhopus* y *Aspergillus*, el T3 presenta además a *Penicillium* y otras dos posibles especies de los géneros *Trichoderma* y *Aspergillus*.

Palabras clave:

Eisenia andrei, Manejo de residuos, Residuos sólidos urbanos, Caracterización de residuos, Manejo Agroecológico, Calidad de lombricompostas, lombricompostaje en la ciudad.

ABSTRACT

In this work, the process of transformation of household organic waste and litter of *Eucalyptus sp.* was characterized physically, chemically and biologically by means of vermicomposting in three stages: pouring of materials, precomposting and obtaining vermicomposts. A completely randomized block design was performed with three treatments, the first with 100% household waste, the second with 100% litter from *Eucalyptus sp.* and the third with a mixture of both: the temperature profiles were performed, and the cost-benefit ratio. Data were analyzed in duplicate and triplicate. The T3 and T1 are cost effective and comply with the parameters established in the NMX-FF-109-SCFI-2008 for the determination of the quality with respect to the degree of purity of the vermicomposts obtained, as well as in the physical-chemical parameters (except moisture) and heavy metal content. Biological determinations show a large load of microorganisms in vermicomposts: bacterial densities range from the order of 10^5 to 10^7 CFU / g, while fungal densities range from 10^6 to 10^8 CFU / g; T3 and T1 treatments share the presence of the genera *Fusarium*, *Trichoderma*, *Rizhopus* and *Aspergillus*, T3 also presents *Penicillium* and two other possible species of the *Trichoderma* and *Aspergillus* genera.

Keywords:

Eisenia andrei, Waste management, urban solid waste, waste characterization, agroecological management, quality of vermicomposts, vermicomposting in the city.

<u>INTRODUCCIÓN</u>	1
<u>JUSTIFICACIÓN</u>	3
<u>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</u>	4
<u>OBJETIVOS</u>	6
OBJETIVO GENERAL	6
OBJETIVOS PARTICULARES	6
<u>HIPÓTESIS</u>	7
<u>REVISIÓN DE LITERATURA</u>	8
IMPLICACIONES DE LA GENERACIÓN DE RESIDUOS	9
LEYES SOBRE EL MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) A NIVEL NACIONAL	10
REGLAMENTACIÓN FEDERAL.....	10
REGLAMENTACIÓN ESTATAL	14
REGLAMENTACIÓN MUNICIPAL	15
RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)	16
RESIDUOS INORGÁNICOS (RI).....	18
RESIDUOS DE MANEJO ESPECIAL (RME)	18
RESIDUOS RECICLABLES (RR)	19
RESIDUOS PELIGROSOS (RP)	20
RESIDUOS DE DISPOSICIÓN FINAL.....	20
RESIDUOS CONSIDERADOS SÓLIDOS INERTES	21
RESIDUOS ORGÁNICOS (RO)	22
RESIDUOS AGROINDUSTRIALES	23
AGROECOLOGÍA EN EL MANEJO DE LOS ROD A NIVEL INDUSTRIALIZADO	24
PROBLEMÁTICA DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS DOMICILIARIOS EN LA LOCALIDAD	25
MANEJO AGROECOLÓGICO DE RESIDUOS ORGÁNICOS A NIVEL INDUSTRIAL: LA PROPUESTA	25
TRANSFORMACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS	27
COMPOSTAJE.....	27
BIOGÁS	28
LOMBRICOMPOSTAJE	31
PARÁMETROS DE CALIDAD SEGÚN LA NMX-FF-109-SCFI-2008	35
CALIDAD DE LA LOMBRICOMPOSTA	35
Propiedades Físico-químicas	36
<u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	38
LOCALIZACIÓN DEL EXPERIMENTO	38
FASE DE CAMPO	38

TEMPERATURA INTERNA Y PARÁMETROS AMBIENTALES	40
FASE DE LABORATORIO	41
FASE DE LABORATORIO: EVALUACIÓN FÍSICA	42
FASE DE LABORATORIO: EVALUACIÓN QUÍMICA.....	43
FASE DE LABORATORIO: EVALUACIÓN BIOLÓGICA	43
Conteo bacteriano en placa	43
Determinaciones fúngicas	45
Producción y calidad de la lombricomposta	45
RELACIÓN COSTO-BENEFICIO (C/B)	47
ANÁLISIS ESTADÍSTICOS	49
<u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	<u>49</u>
TEMPERATURAS INTERNAS Y PARÁMETROS AMBIENTALES	49
DETERMINACIONES FÍSICAS	52
PH.....	52
HUMEDAD	53
CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE)	54
DETERMINACIONES QUÍMICAS	56
MATERIA ORGÁNICA (MO).....	56
NITRÓGENO TOTAL (NT)	56
POTASIO	58
FÓSFORO.....	58
CARBONO	59
RELACIÓN C/N	60
METALES PESADOS Y OTROS METALES	60
PLOMO	60
CADMIO.....	62
CROMO	63
COBRE	63
NÍQUEL.....	65
ZINC.....	65
ALUMINIO.....	66
MANGANESO.....	67
DETERMINACIONES BIOLÓGICAS	69
CONTEOS BACTERIANOS.....	70
PRODUCCIÓN DE LOMBRICOMPOSTA Y REPRODUCCIÓN DE LOMBRICES	74
CALIDAD DE LA LOMBRICOMPOSTA	77
RELACIÓN COSTO-BENEFICIO (C/B)	79
<u>CONCLUSIONES</u>	<u>81</u>
<u>RECOMENDACIONES</u>	<u>86</u>
<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	<u>88</u>

<u>ANEXOS</u>	<u>107</u>
MEDIOS DE CULTIVO	107

Tabla 1. Legislaciones vigentes en los diferentes niveles del país. Modificado del Diagnóstico Básico para la gestión Integral de los Residuos. 12

Tabla 2. Plantas de compostaje presentes en el país. Tomado del Diagnóstico Básico para la gestión Integral de los Residuos (2012)..... 29

Tabla 3. Características biológicas y condiciones ambientales de algunas de las principales especies de lombrices utilizadas en lombricompostaje. 34

Tabla 4. Valores permisibles de los parámetros de calidad de la lombricomposta según la NMX-109-FF-SCFI-2008..... 36

Tabla 5. Especificaciones físico-químicas de la lombricomposta según la NMX-109-FF-SCFI-2008. 37

Tabla 6. Límites microbiológicos máximos permisibles según la NMX-109-FF-SCFI-2008 37

Tabla 7. Cantidades iniciales de ROD y hojarasca de *eucaliptus sp.* (kg) para cada tratamiento 39

Tabla 8. Parámetros de monitoreo en campo durante el proceso de precomposteo. 41

Tabla 9. Variables y metodologías para análisis de la transformación y calidad para lombricompostas basada en la NMX-109-FF-SCFI-2008..... 48

Tabla 10. Comparación de temperaturas en las camas de precomposteo de los diferentes tratamientos..... 51

Tabla 11. Valores obtenidos para los parámetros físicos y la diferencia de medias en las diferentes etapas del proceso para cada tratamiento 55

Tabla 12. Valores obtenidos para los parámetros químicos en las diferentes etapas del proceso de transformación de residuos orgánicos domiciliarios a través de lombricompostaje 61

Tabla 13. Conteos fúngicos y posibles géneros identificados en lombricompostas de los diferentes tratamientos. 73

Tabla 14. Diferencias de medias por tratamiento para los parámetros de calidad. 78

Tabla 15. Determinación de la calidad con respecto a la pureza de las lombricompostas obtenidas..... 79

Tabla 16. Determinación de la relación costo beneficio para cada tratamiento, indica la ganancia por unidad monetaria invertida 80

Figura 1. Hábitos ecológicos de las lombrices de tierra. Elaborada por Ma. Fernanda González 33

Figura 2. Visualización de la localidad, a) localización en el estado de Puebla (QGIS 2.12.3), b) vista satelital (Google Earth Pro 2017)..... 39

Figura 3. Diseño experimental para los tratamientos evaluados. Asimismo se muestran los puntos en dónde se tomó la temperatura interna..... 41

Figura 4. Cernidora utilizada para la obtención de la lombricomposta en dos granulometrías, a 2 y 5 mm, localizada en VermiBUAP 46

Figura 5. Muestreo para estimación de densidad poblacional de *E. andrei* antes de concluir el experimento 47

Figura 6. Perfiles promedio del comportamiento de la temperatura interna y temperatura ambiental, a) montaje del experimento, a) vertido de materiales en cama, b) Residuos Domiciliarios, b) Hojarasca de Eucalipto y c) Mezcla de ambas. El monitoreo se realizó durante 37 días consecutivos. 50

Figura 7. Matrices de correlación (Pearson) de los promedios de temperaturas por tratamiento y parámetros ambientales durante 37 días de monitoreo, a) Residuos Domiciliarios, b) Eucalipto y c) Mezcla. Mientras más asteriscos presenten la correlación es más fuerte 51

Figura 8. Concentraciones de metales pesados durante las tres etapas evaluadas: materiales frescos, precomposteo y lombricomposta, a) contenido de plomo, b) contenido de cadmio, c) contenido de cromo, d) contenido de cobre..... 64

Figura 9. Concentraciones de metales pesados durante las tres etapas evaluadas: materiales frescos, precomposteo y lombricomposta, a) contenido de plomo, b) contenido de cadmio, c) contenido de cromo, d) contenido de cobre..... 67

Figura 10. Contenido de metales en las lombricompostas obtenidas por tratamiento en comparación a los valores máximos permisibles según la norma mexicana, canadiense y de la unión europea..... 69

Figura 11. Tinciones de Gram para los diferentes medios y tratamientos en etapa inicial del vertido de los materiales orgánicos 72

Figura 12. Se muestran las imágenes asociadas a cada identificación, morfología en caja Petri y vista al microscopio (40 x). HN) Posible Rizhopus, HVP) Posible Trichoderma, HVF) Posible Aspergillus, HC) Posible Penicillium, HBA) Posible Fusarium y HVC) Posible Trichoderma. Fotografías tomadas por Luis Ángel Morales. 73

Figura 13. Se muestran las imágenes asociadas a cada identificación, morfología en caja Petri y vista al microscopio (40 x). HVC2 y HM) Posibles Aspergillus. Fotografías tomadas por Luis Ángel Morales..... 74

INTRODUCCIÓN

"No acepten lo habitual como cosa natural pues en tiempos de desorden sangriento, de confusión organizada, de arbitrariedad consciente, de humanidad deshumanizada, nada debe parecer imposible de cambiar"

Bertolt Brecht

La problemática ambiental asociada al manejo de residuos orgánicos domiciliarios (ROD) es en nuestro país un fenómeno creciente (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2015) y altamente preocupante (SEMARNAT, 2012). Los ROD que se disponen generalmente en tiraderos ocasionan diversos efectos negativos en su entorno, entre ellos podemos mencionar la atracción de un numeroso grupo de especies considerados como fauna nociva, mismos que pueden transformarse en vectores de enfermedades peligrosas a la salud de la población humana (SEMARNAT, 2012). Asimismo, estos cúmulos de residuos son agentes causales de deterioro ambiental en diferentes niveles (Benitez, 2001). Por otro lado las tecnologías utilizadas para la transformación de éste tipo de residuos resultan altamente costosas. Por tal motivo es necesaria la aplicación de estrategias asequibles que permitan prevenir condiciones y efectos secundarios por el mal manejo de los ROD.

Para disminuir la generación de cualquier residuo desde su origen es necesario realizar la planificación de lo que sucederá en la etapa final de la vida útil de cualquier satisfactor de alguna necesidad (diseñado o consumido) para su inserción en el ciclo económico de ser posible (Benitez, 2001). Para los ROD el lombricompostaje es considerado una tecnología de fácil implementación, bajo costo, altamente eficiente (Villegas-Cornelio y Laines-Canepa, 2017) en las diferentes escalas de su generación, desde el nivel casero hasta el industrializado. Complementariamente, ésta tecnología permite dar un valor agregado a lo que antes era considerado equívocamente como basura.

El presente trabajo abordó a nivel de literatura la problemática del manejo de los residuos sólidos urbanos (RSU) en México; por otra parte se realizó la transformación específicamente de los ROD generados por la ciudadanía, y se incorporó hojarasca de eucalipto de los parques municipales y áreas verdes urbanas. Se evaluó física, química y biológicamente la transformación de los dichos residuos en diferentes proporciones, y en el transcurso se desarrolló un plan de manejo bajo un enfoque agroecológico. Se realizó la determinación de los organismos fúngicos presentes en las lombricompostas obtenidas y sus densidades poblacionales. Asimismo, se realizó el conteo bacteriano en diferentes medios: Medio Mínimo 8 (MM8), Medio Mínimo 9 (MM9), Luria Bertani (LB) y Papa-Dextrosa- Agar (PDA). Por otra, parte se obtuvieron los rendimientos y la relación costo- beneficio (C/B) para cada tratamiento.

El experimento en la fase de campo se realizó en las instalaciones de la planta de lombricompostaje VermiBUAP localizada dentro de la Preparatoria Lic. Benito Juárez García en la ciudad de Puebla. La fase de laboratorio se realizó en las instalaciones del Instituto de ciencias, en el Departamento de Investigaciones en Ciencias Agrícolas, en el laboratorio Manejo agroecológico de Suelo y Agua, y en el laboratorio de Producción de Biológicos.

El trabajo realizado permite realizar el manejo y transformación de los ROD y la hojarasca de eucalipto. Dicha contribución se basa en un plan de aprovechamiento y manejo de los residuos por medio del lombricompostaje a escala industrial bajo un enfoque agroecológico, mismo que asegure la ausencia de fauna nociva y malos olores, al mismo tiempo brinde un valor agregado a lo que se consideraba anteriormente como basura. Por otra parte, se contribuye en el entendimiento de lo que sucede con algunos parámetros físicos y químicos de interés en el proceso de transformación de los residuos orgánicos antes mencionados en el proceso de lombricompostaje.

JUSTIFICACIÓN

El trabajo de investigación aborda la problemática del manejo de los residuos orgánicos domiciliarios y restos de podas, parques y jardines (en este caso así se consideró a la hojarasca de eucalipto), complementariamente busca ofrecer una alternativa de manejo para los mismos. Asimismo, se pretende implementar una tecnología que no genere pestilencia ni fauna nociva en el proceso de transformación de los residuos orgánicos. Simultáneamente se busca dar un valor agregado al producto obtenido de dicha transformación a través del lombricompostaje, atendiendo a los objetivos planteados dentro del marco jurídico nacional.

Indirectamente el trabajo de investigación beneficia en primer lugar al ambiente, afectado por el vertimiento de los ROD en áreas inadecuadas, por consecuencia las poblaciones humanas cercanas a estos lugares tendrán mejores condiciones de vida. Por otro lado, se busca obtener un fertilizante a partir de la transformación de los residuos orgánicos que pueda ser utilizado como insumo para la producción vegetal por diversos sectores de la población.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La problemática del mal manejo asociado a la generación y acumulación de residuos domiciliarios es creciente en nuestro país, de 2002 a 2012 aumentó la generación de éstos en 30 %, la generación *per cápita* aumentó 16 %: consecuencia al aumento del 23 % de la población humana para el mismo periodo (Worldometers, 2015). Entre los ROD más generados se encuentran los residuos de la comida, el papel y los residuos de jardinería (SEMARNAT, 2012). Cuando existe un mal manejo estos se disponen generalmente en tiraderos y ocasionan efectos negativos en su entorno, posteriormente son agentes causales de deterioro ambiental (Benitez, 2001) en diferentes niveles, por ejemplo, tienen un impacto directo en las condiciones edáficas en dónde son depositados, e intervienen en las interacciones de las cadenas tróficas del suelo, entre otras afectaciones. En México existen dos soluciones temporales (INEGI, 2015) para los residuos sólidos urbanos (entre ellos los ROD): los rellenos sanitarios y los tiraderos a cielo abierto, de éstos el primero es considerado el mejor pero ha habido casos en dónde por fallas en el diseño o construcción de los mismos se presentan problemas de lixiviación y en algunos casos explosiones por la cantidad de gases generados (Benitez, 2001).

Según información del INEGI (2015) y lo reportado por el Sistema Nacional de Información Ambiental y Recursos Naturales (SNIARN citado en SEMARNAT, 2015) se sabe que 86 % de las casas tienen servicio de colecta de desechos, mientras que el 14 % no lo tienen y disponen sus residuos en tiraderos a cielo abierto. También se sabe (INEGI, 2015) que 57 % de las casas en México realiza algún tipo de separación de sus residuos orgánicos. La composición de los residuos residenciales consta de un 52.4 % de orgánicos (comida, residuos de podas, y otros residuos similares), 34.4 % son reciclables (papel, cajas corrugadas, otro tipo de papel y demás reciclables) y el 12.1 % son no reciclables (pañales desechables, residuos finos y otros) (SEMARNAT, 2015). Este gran porcentaje de generación de residuos orgánicos en los domicilios exige estrategias de manejo adecuadas.

Los sistemas de compostaje son una de estas estrategias que se adaptan al enfoque agroecológico; sin embargo, existen estudios que demuestran que, dependiendo del

de la materia prima y las fallas en la tecnología, se pueden generar agentes patógenos (bacterias: *Salmonella*, *Shigella*, *Escherichia coli*, *Enterobacter*, *Yersinia*, *Streptococcus* y *Klebsiella*, y hongos: *Aspergillus fumigatus*), así como sustancias nocivas al medio ambiente como bioaerosoles, metales pesados y sustancias orgánicas tóxicas (Pepe *et al.*, 2013).

Asimismo, los sistemas de lombricompostaje pueden estar sometidos a las mismas problemáticas, por ende es necesaria la determinación de los contenidos nutrimentales, metales pesados, parámetros físicos así como de la diversidad presente en las lombricompostas con el fin de conocer si ésta resulta adecuada para su uso, si es inocuo (Benzing, 2001) o presenta organismos benéficos.

En este trabajo se propone el manejo de los ROD y hojarasca de eucalipto por medio del lombricompostaje a través de un diseño con la menor cantidad de insumos externos, accesible económicamente (Villegas-Cornelio y Laines-Canepa, 2017) y en concordancia con el enfoque agroecológico. Dicho diseño está orientado al manejo de los residuos en ausencia de fauna nociva, aromas pestilentes, y para la obtención de un producto final que cumpla con los parámetros de calidad establecidos en la NMX-FF-109-SEMARNAT-2008 para su posible inserción al mercado nacional.

La evaluación de la relación entre los parámetros ambientales y la etapa de precomposteo permite saber si éstas afectan al proceso. Al conocer los valores de los parámetros analizados en el material final con respecto a los materiales orgánicos iniciales se puede entender mejor dicho proceso. Por todo lo anteriormente mencionado se plantea el siguiente cuestionamiento: ¿es factible la transformación de los ROD y eucalipto a través de la tecnología del lombricompostaje en la ciudad de Puebla, Puebla?, ¿es rentable dicho manejo?

Objetivos

Objetivo general

- Evaluar y comparar la transformación de los residuos orgánicos domiciliarios con y sin hojarasca de *Eucalyptus sp.* por medio del lombricompostaje en el marco de la agroecología en Puebla, Puebla.

Objetivos particulares

- Caracterizar física y químicamente diferentes momentos del proceso de la transformación de los ROD (llegada, precomposteo, obtención de lombricompostas).
- Evaluar la relación entre los parámetros ambientales y el proceso de transformación de los materiales orgánicos, mediante lombricompostaje.
- Determinar las propiedades físicas, químicas y biológicas del material resultante de la transformación de ROD y hojarasca de eucalipto, así como su relación con la materia prima inicial.
- Evaluar la densidad de la población de bacterias, asimismo, determinar los hongos presentes a nivel de género, así como su densidad poblacional en la lombricomposta obtenida.
- Elaborar la relación costo-beneficio (C/B) para los diferentes tratamientos.

Hipótesis

- Las propiedades físicas, químicas y biológicas de los materiales orgánicos y sus proporciones influyen en la velocidad de transformación de los mismos y la calidad del producto final.
- Los parámetros ambientales influyen en el cumplimiento de las etapas de transformación de los residuos orgánicos.
- El producto final del proceso de lombricompostaje se encuentra dentro de los parámetros de inocuidad establecidos en la NMX-109-FF-SCFI-2008.
- Los materiales orgánicos influyen en el desarrollo de diferentes microorganismos y en la densidad poblacional de los mismos en el producto final.
- Los materiales orgánicos y el manejo de los mismos influyen en la utilidad por unidad monetaria invertida en el proceso de lombricompostaje.

Revisión de literatura

Durante la etapa de la revolución industrial se tenía la visión (en los países que estaban desarrollando su industria o industrializando a su país) de que los recursos naturales eran infinitos y que la tecnología debía domesticar el medio natural (McDonough, 1998), además se consideraba que el medio ambiente tenía una gran capacidad para absorber los residuos generados por la relación sociedad- naturaleza (Flores y Sarandón, 2014), y en este sentido se podría incluso mencionar que fue la relación consumo-satisfacción (Max-Neef *et al.*, 1993) llevada al extremo una de las mayores contribuyentes a dicho problema, aunque tal vez sea mejor mencionar a dicha relación como necesidad-transformación del recurso-consumo- satisfacción propia de la economía de cada país (Hoorweg y Bhada-Tata, 2012).

En México el proceso de industrialización que se presentó durante la segunda mitad del siglo XX tuvo repercusiones secundarias previsibles directamente en la población, por ejemplo, se generó una mayor demanda de materias primas para satisfacer los patrones de consumo cambiantes y cada vez más demandantes de bienes y servicios de una población en aumento exponencial (Hoorweg y Bhada- Tata, 2012; SEMARNAT, 2012), como consecuencia se incrementó la generación de residuos por la interacción dinámica entre las supuestas necesidades del consumo y la tergiversación del satisfactor de cada una de ellas.

Como lo mencionan Flores y Sarandón (2014), en los últimos años las problemáticas ambientales se hicieron presentes en la opinión pública, y esto llevó a los gobiernos al reconocimiento del problema (tuvieron que reconocerlo porque no había otro camino) de la generación de un gran número de residuos o externalidades inherentes a la lógica del sistema capitalista de producción (pero no exclusivo de dicho sistema). Derivado de esto, se generaron los primeros planes de normatividad en México y con esto se iniciaron los primeros esfuerzos de la industria y la academia para desarrollar nuevos procesos más amigables con el medio ambiente, para formular sustancias de menor toxicidad, para dar un control y manejo a sus residuos, y de ser posible adicionar un valor agregado a los mismos.

Implicaciones de la generación de residuos

Antes que nada es importante señalar que a diferencia del concepto de “residuos”, la “basura” o los “desechos” no pueden ser insertados a un proceso de valorización, por esta razón son considerados como inservibles (SEMARNAT, 2006; Monteiro, 2006; Saval, 2012). Un residuo por el contrario es susceptible a ser valorizado (SEMARNAT, 2006; Saval, 2012), por tanto la connotación de “basura” que se le atribuye a un residuo es el resultado de la percepción individual, la cual está fundamentada en el entendimiento de la tecnología para aprovechar la energía disponible (Benitez, 2001; Monteiro, 2006) o de la potencial funcionalidad del mismo una vez cumplida su función primaria.

Las problemáticas asociadas a la generación de residuos tienen influencia en las esferas económica, social, ambiental, y por consecuencia, en la salud humana, y como lo menciona Benitez (2001), en la mayoría de los casos es muy difícil definir los límites entre una y otra. A nivel ambiental la acumulación de residuos es un foco creciente de fauna nociva, es un medio de crecimiento bacteriano y viral, son generadores de grandes cantidades de gases de efecto invernadero y dependiendo de su composición pueden ser propensas a explosiones; además en caso de producir lixiviados éstos pueden infiltrarse hasta los mantos freáticos (Benitez, 2001) dañando en su camino algunas propiedades de los suelos.

En el ámbito social y de la salud humana, la acumulación de los residuos y la basura ofrecen una imagen indeseable en los asentamientos poblacionales, en dichos sitios las condiciones de salubridad son precarias, la fauna nociva aumenta y por consecuencia aquellos considerados como vectores de enfermedades agudizan los brotes de las mismas (Benitez, 2001), malos olores, y desgraciadamente una vez que la gente acepta un tiradero a cielo abierto es difícil frenar su crecimiento. Sin embargo, todo ello no es una limitante para el establecimiento de asentamientos humanos que a falta de alternativas de subsistencia deciden establecerse y depender económicamente de actividades realizadas en los tiraderos.

Aunado a esto, el sector económico nacional se ve afectado ya que el dinero que se destina para el manejo de los residuos podría ser utilizado en otro tipo de actividades más importantes (Benitez, 2001) para el desarrollo del país. Por si fuera poco no existe una clara conciencia ambiental ni en el gobierno ni en la sociedad en general para la reducción y manejo de los residuos. Por otro lado, falta mucha capacidad técnica y tecnológica, así como recursos económicos para darles un destino final adecuado y seguro, así como una legislación específica para promover una gestión y financiamiento (Saval, 2012) que asegure un buen manejo desde su generación hasta su disposición final.

Leyes sobre el manejo de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) a nivel nacional.

Antes que nada debemos considerar que las legislaciones en materia de generación, disposición y manejo de residuos son determinantes para la aplicación de estrategias de manejo, la gestión de apoyos económicos, y por consiguiente para el éxito de cualquier alternativa aplicable (Benitez, 2001). A manera de resumen en la Tabla 1 se pueden observar las legislaciones vigentes en los diferentes niveles de estructuración nacional.

Es importante mencionar que el marco legislativo vigente en el país con respecto a los RSU busca una Gestión Integral de los mismos (GIR). El enfoque de la gestión integral reconoce como necesario un manejo sustentable de los diversos tipos de residuos, así como la formulación y aplicación de una serie de procedimientos, metodologías y acciones que busquen minimizar la generación de los mismos; asimismo, busca incentivar el aprovechamiento, la valorización, y el reciclaje: estrategias clave para un manejo sustentable de los residuos (Bernache, 2015).

Reglamentación Federal

A nivel federal, el marco legislativo que se aplica a la gestión integral de los RSU comprende como Ley Marco a la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección del Ambiente (LGEEPA) de 1988 y como Ley del Sector a la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPIR) del 2003 (Bernache, 2015).

La LGEEPA (1988) se estructura a partir de cuatro temáticas básicas: se busca *una política ecológica, el manejo de los recursos naturales, la protección al ambiente y la participación social*. Ésta ley tiene como objetivo, entre otras cosas, *el garantizar el derecho al desarrollo de la vida de los ciudadanos en un ambiente adecuado, en donde es primordial la preservación, la restauración y el mejoramiento de la diversidad y el ambiente, así como el aprovechamiento de los recursos de manera sustentable. Es necesaria la prevención y el control de la contaminación de aire, agua y suelo, es imperante fomentar la participación corresponsable del sector social, y es parte del deber/ser de los gobiernos correspondientes a la Federación, a la ciudad de México (CDMX), a los Estados y Municipios (bajo el principio de concurrencia) el establecimiento de mecanismos de conciliación, de control y de seguridad que garanticen el cumplimiento de la misma, además de determinar el ejercicio de las atribuciones que en materia ambiental se refieren.*

En la LGPGIR (2003) se establece que ésta ley es el eje conductor para el desarrollo de las legislaciones en los niveles de gestión nacional inferiores, asimismo, se menciona en el Artículo 1° que:

Sus disposiciones son de orden público e interés social y tienen por objeto garantizar el derecho de toda persona al medio ambiente sano y propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos peligrosos, de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial; prevenir la contaminación de sitios con estos residuos y llevar a cabo su remediación....

En la misma ley se conceptualizan a los residuos como aquellos materiales o productos cuyos poseedores desechan. Éstos pueden encontrarse en diferentes estados de la materia (estado sólido o semisólido, líquido o gaseoso) y se contienen en recipientes o depósitos; además, pueden ser susceptibles a valorización (LGPGIR, 2003) como se ha mencionado con anterioridad.

Tabla 1. Legislaciones vigentes en los diferentes niveles del país. Modificado del Diagnóstico Básico para la gestión Integral de los Residuos.

INSTRUMENTO JURÍDICO	NIVEL	AÑO DE PUBLICACIÓN
Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos	Federal	1917 (Última reforma en 2014)
Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente - LGEEPA	Federal	1988 (Última Reforma 2015)
Reglamento de la LGEEPA	Federal	1988
Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos- LGPGIR	Federal	2003 (Última Reforma 2015)
Reglamento de la LGPGIR	Federal	2006
Norma NOM-083-SEMARNAT-2003	Federal	2003
Norma NOM-052-SEMARNAT-2005 sobre Residuos Peligrosos	Federal	2005
Norma NOM-161-SEMARNAT-2001 sobre Residuos de Manejo Especial	Federal	2011
Constitución Política del Estado Libre y Soberano de Puebla	Estatad	1982 (Última reforma en 2015)
Ley para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial para el Estado de Puebla.	Estatad	2006
Reglamento de la Ley para la prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos y de manejo especial para el Estado de Puebla.	Estatad	2008 (Última modificación en 2014)
Programa de Prevención y Gestión Integral de Residuos para el Estado de Puebla	Estatad	2011-2017

A los residuos se les clasifica en tres grandes grupos dependiendo de su origen y características: Residuos Sólidos Urbanos (RSU), Residuos de Manejo Especial (RME) y Residuos Peligrosos (RP). En algunos casos los residuos requieren sujetarse a algún tipo de tratamiento o a su correspondiente disposición final según lo establecido en el Diario Oficial de la Federación (DOF) de México en 2003. Dicha ley contempla la determinación de aquellos residuos que podrán sujetarse a planes de manejo, basados en los criterios siguientes:

- *Que los materiales que los componen tengan un alto valor económico;*
- *Que se trate de residuos de alto volumen de generación, producidos por un número reducido de generadores;*
- *Que se trate de residuos que contengan sustancias tóxicas persistentes y bioacumulables, y*
- *Que se trate de residuos que representen un alto riesgo a la población, al ambiente o a los recursos naturales.*

La LGPGIR (2003) presenta otros aspectos importantes, como el aprovechamiento de residuos (artículo 5 fracción II), el manejo integral (artículo 5 fracción XVII), el plan de manejo (artículo 5 fracción XXI) y la valorización (artículo 5 fracción XLIV) como bien lo menciona Saval (2012).

En el caso de la NOM-083-SEMARNAT-2003 se establecen las especificaciones de selección del sitio, el diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de RSU y de RME (residuos de construcción, aluminio, orgánicos, llantas, entre otros). En la misma se establece como necesario el apoyo institucional a las localidades en la preparación de sus planes de manejo, así como en el diseño de proyectos que les permitan cumplir con la ley general y con ésta Norma Oficial Mexicana.

Por otro lado, en la NOM-052-SEMARNAT-2005 se establecen las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. Mientras que la NOM-161-SEMARNAT-2001 establece los criterios para clasificar a los RME y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo; en esta ley se incluye el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho

listado,

así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo pertinentes (Bernache, 2015).

Reglamentación Estatal

A nivel estatal, el marco legislativo que se aplica a la gestión integral de los residuos sólidos urbanos comprende como Ley Marco a la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos para el Estado de Puebla del 2006 y se fundamenta con el Reglamento de la Ley para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial para el Estado de Puebla elaborado en 2012.

En la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos para el Estado de Puebla se comparte el Artículo 1 con la LGPGIR, sin embargo, en la primera se hace referencia en la gestión integral de residuos de competencia estatal y municipal. Ésta gestión integral se basa en el manejo integral de los residuos y en la LGPGIR para el estado de Puebla se enuncia del siguiente modo:

El Manejo Integral... de residuos son todas aquellas... actividades de reducción en la fuente, separación, reutilización, reciclaje, co- procesamiento, tratamiento biológico, químico, físico o térmico, caracterización, acopio, transferencia, almacenamiento, barrido, recolección, transporte y disposición final de residuos, individualmente realizadas o combinadas de manera apropiada, para adaptarse a las condiciones y necesidades de cada lugar, cumpliendo objetivos de valorización, eficiencia sanitaria, ambiental, tecnológica, económica y social.

Asimismo, ésta ley debe servir (Art. 10) como marco para que los ayuntamientos que corresponden a los 217 municipios del Estado de Puebla elaboren los programas municipales para la prevención, reducción, gestión y manejo integral de los RSU, los cuales deberán observar lo dispuesto en el Programa Estatal para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Además, para la aplicabilidad de los diferentes programas se debe trabajar bajo un desarrollo coordinado basado en el principio de concurrencia.

Reglamentación Municipal

A nivel municipal, el marco legal en materia de RSU se fundamenta principalmente en disposiciones emitidas por los ayuntamientos de los municipios. Según Bernache (2015) los reglamentos municipales en los que se sustenta la gestión de los residuos sólidos urbanos en nuestro país deben comprender las siguientes modalidades:

- *Reglamento de Limpia o Limpieza; y de Limpia y Sanidad*
- *Reglamento de Prevención y Gestión Integral de Residuos*
- *Reglamento del Servicio Público de Limpia y Disposición de Desechos*
- *Reglamento de Recolección y Transporte de Residuos Sólidos*
- *Reglamento de Ecología*
- *Reglamento de Aseo Publico*
- *Reglamento de Aseo, Limpia, Desechos Peligrosos y Potencialmente Peligrosos*
- *Reglamento de Limpia, Aprovechamiento y Manejo de Residuos Sólidos Urbanos*
- *Reglamento de Ecología y Protección Ambiental, Reglamento de Protección Ambiental*
- *Reglamento de Residuos*
- *Reglamento de Servicios Públicos*

En el estado de Puebla exceptuando a la capital sólo un municipio ha implementado la aplicación del Reglamento Municipal para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial para el Estado de Puebla (San Pedro, Cholula), el dictamen de aprobación del Plan de Manejo de Residuos Sólidos fue emitido el 5 de Febrero de 2015. En dicho Plan de Manejo, la educación ambiental es parte central para la generación de la conciencia ambiental, sin ésta última no es posible dar:

...“un destino final adecuado a los residuos que se generan, toda vez que la población no ha sido capacitada, ni concientizada para conservar y mejorar nuestro medio ambiente”.

Residuos Sólidos Urbanos (RSU)

Con la publicación de la LGPGIR, los Residuos Sólidos Municipales (RSM) como los había clasificado la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) en 1993 cambiaron su denominación a la de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) (SEMARNAT, 2012). Según la LGPGIR los RSU son:

... todos aquellos residuos generados en las residencias domiciliarias como resultado de la eliminación de los materiales que se utilizan en cada una de las actividades domésticas (p. e., de los productos de consumo y sus envases, embalajes o empaques) y/o los que provienen también de cualquier otra actividad que se desarrolla dentro de los establecimientos o en la vía pública, con características domiciliarias, y los resultantes de las vías y lugares públicos siempre y cuando no sean agrupados en otra categoría.

Los residuos urbanos, son una consecuencia inherente a cualquier etapa del proceso de desarrollo de las actividades productivas o no productivas en el camino de la satisfacción de nuestras necesidades (Hoorweg y Bhada-Tata, 2012), es decir la generación de residuos es inevitable durante cada etapa del desarrollo de nuestra vida. Ahora bien, la cantidad y el tipo de residuos que se genera en cada lugar depende, entre otros factores, del grado de desarrollo industrial (Monteiro, 2006; Hoorweg y Bhada-Tata, 2012; INEGI, 2012; OECD, 2013), de los productos y servicios que se presentan en cada país y de los patrones de consumo poblacionales (OECD, 2013), entre otros factores más.

En el año 2010, cerca del 44% de los RSU producidos en el planeta correspondieron a los países con las economías más desarrolladas de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE, 2013). Otro dato interesante y alarmante a la vez fue el brindado por Hoorweg y Bhada-Tata (2012), quienes estimaron que en ese mismo año la producción mundial de RSU se calculó en 1 300 millones de toneladas diarias, y estimaron que en 2015 podría aumentar hasta los 2 200 millones diariamente.

En el 2011 las estimaciones de SEDESOL (citado en SEMARNAT, 2014) conforme a lo establecido en la norma NMX-AA-61-1985 para la Determinación de la Generación de Residuos Sólidos arrojaron que se generaron 41 millones de toneladas de RSU (SEMARNAT, 2012; OECD, 2013), es decir, 112.5 mil toneladas al día. A nivel nacional según SEDESOL (citado en SEMARNAT, 2014) en 2013 la generación de RSU se incrementó notablemente entre 1997 y 2012, éste aumentó 43.8%, asimismo, la generación de residuos *per cápita* pasó de 301 a 361.4 kilogramos por habitante al año. Éste aumento se encuentra íntimamente ligado al desarrollo industrializado, y a los cambiantes hábitos de consumo (Hoornweg y Bhada-Tata, 2012; SEMARNAT, 2012) de las poblaciones.

Las entidades federativas que generaron los mayores volúmenes de RSU en 2012 fueron el Estado de México con el 16% del total nacional (6.789 millones de toneladas), seguido de la CDMX con el 12% (4.949 millones de toneladas), Jalisco generó el 7% (3.051 millones de toneladas), mientras que Veracruz y Nuevo León tuvieron el 5% (2.301 y 2.153 millones de toneladas, respectivamente). Las zonas metropolitanas generaron el 42.8% del total nacional de RSU, seguidas por las ciudades medias con el 37.4% del volumen nacional, las localidades rurales generaron 11.5% del total y las ciudades pequeñas el 8.4% del volumen total de residuos generados (INEGI, 2012): dicha generación de residuos a nivel *per cápita* es influenciada por factores de índole cultural, por el nivel de ingreso, así como por el grado de urbanismo de la localidad, entre otros factores (SEMARNAT, 2012).

Para el 2014 según la Encuesta Nacional de los Hogares (ENH) en el país habitaban 119, 729,273 personas y de acuerdo con el Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales de 2015 (referido a 2014), el promedio diario a nivel nacional de recolección de RSU fue de 103, 125,830 kg; es decir aproximadamente se recolectan 0.86 Kg de residuos por persona al día en nuestro país. Aunado a esto, el marco jurídico referente a la gestión y al manejo integral de los RSU dista mucho de ser el ideal: en el país aún es demasiado común encontrar vertederos de residuos en espacios cercanos a las vías de comunicación, en depresiones naturales del terreno o en las calles (SEMARNAT, 2012).

Según el INEGI (2015), la cifra más reciente para la generación de RSU fue de 53.1 millones de toneladas, lo que representó un aumento del 61.2% con respecto a 2003, y por habitante en promedio se generan diariamente 1.2 kilogramos. Los RSU en cuanto a su composición se refiere, han cambiado de manera importante en las últimas décadas, y generalmente la composición depende, entre otros factores, de los patrones de consumo de la población (SEMARNAT, 2012).

Residuos Inorgánicos (RI)

Los residuos inorgánicos son todos aquellos residuos que se derivan de materiales o procesos no vivos. En este sentido se entiende que existe una gran diversidad de ellos. Según el INEGI en el año 2012 en el país se enviaron a tratamiento 6, 083,199 kg de residuos inorgánicos. En ese mismo año el porcentaje de residuos inorgánicos fue del 47.6 %, lo interesante de este porcentaje generado es que en su mayoría son residuos susceptibles a reciclamiento (SEMARNAT, 2012).

Residuos de Manejo Especial (RME)

Los RME son aquellos generados en los procesos productivos que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos, o aquellos que son producidos por grandes generadores (aquellos que generan más de 10 t al año) de residuos sólidos urbanos según la LGPGIR (2003). Éstos son:

- *Residuos de las rocas o los productos de su descomposición que sólo puedan utilizarse para la fabricación de materiales de construcción o se destinen para este fin, así como los productos derivados de la descomposición de las rocas, excluidos de la competencia federal conforme a las fracciones IV y V del artículo 5 de la Ley Minera;*
- *Residuos de servicios de salud, generados por los establecimientos que realicen actividades médico-asistenciales a las poblaciones humanas o animales, centros de investigación, con excepción de los biológico-infecciosos;*

- *Residuos generados por las actividades pesqueras, agrícolas, silvícolas, forestales, avícolas, ganaderas, incluyendo los residuos de los insumos utilizados en esas actividades;*
- *Residuos de los servicios de transporte, así como los generados a consecuencia de las actividades que se realizan en puertos, aeropuertos, terminales ferroviarias y portuarias y en las aduanas;*
- *Lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales;*
- *Residuos de tiendas departamentales o centros comerciales generados en grandes volúmenes;*
- *Residuos de la construcción, mantenimiento y demolición en general;*
- *Residuos tecnológicos provenientes de las industrias de la informática, fabricantes de productos electrónicos o de vehículos automotores y otros que al transcurrir su vida útil, por sus características, requieren de un manejo específico;*
- *Pilas que contengan litio, níquel, mercurio, cadmio, manganeso, plomo, zinc, o cualquier otro elemento que permita la generación de energía en las mismas, en los niveles que no sean considerados como residuos peligrosos en la norma oficial mexicana correspondiente;*
- *Los neumáticos usados, y*
- *Otros que determine la Secretaría de común acuerdo con las entidades federativas y municipios, que así lo convengan para facilitar su gestión integral.*

Residuos Reciclables (RR)

Según la LGPGIR, el reciclaje es la transformación de los residuos a través de distintos procesos que permiten restituir su valor económico, evitando así su disposición final, siempre y cuando esta restitución favorezca un ahorro de energía y materias primas sin perjuicio para la salud, los ecosistemas o sus elementos.

En México el volumen de RSU que se recicla se ha incrementado desde 1997 (Benitez, 2001). En 2011 se recicló el 4.8% del volumen de RSU generados, sin embargo,

según

SEMARNAT (2012) si existieran procesos eficientes de recuperación antes de la etapa de disposición final el porcentaje de reciclamiento para ese año hubiera sido del 10 %. Según SEMARNAT (2012) para el volumen total de RSU reciclados en 2011, el mayor porcentaje correspondió a papel, cartón y productos de papel con el 42.2 %, seguido del vidrio con 28.6 %, posteriormente los metales con un 27.8 %, y por último los plásticos y textiles con el 1.2 % y 0.2 %, respectivamente.

En la actualidad el mercado del material reciclable crece rápidamente; sin embargo, debe mejorar pues si existe una clasificación y separación correcta de los residuos, y se asegura la limpieza de los mismos el proceso de reciclaje sería más adecuado y comercializable (Monteiro *et al.*, 2006).

Residuos Peligrosos (RP)

A los RP la ley los define como aquéllos que poseen alguna de las características llamadas CRETIB, es decir, que sean Corrosivos, Reactivos, Explosivos, Tóxicos, Inflamables o Biológico-infecciosos. Dentro de éstos se consideran los envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados por ellos (LGPGIR, 2003; SEMARNAT, 2012).

Los residuos peligrosos, en cualquier estado físico, por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, inflamables, tóxicas, y biológico-infecciosas, y por su forma de manejo pueden representar un riesgo para el equilibrio ecológico, el ambiente y la salud de la población en general (SEMARNAT, 2012).

Residuos de Disposición Final

La disposición final de los residuos tiene que ver con su depósito o confinamiento permanente en sitios e instalaciones que permitan evitar su diseminación y las posibles afectaciones a los ecosistemas y a la salud de la población (Duran, 2013). La Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 define las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.

En el país se cuenta con dos tipos de sitios de disposición final: los rellenos sanitarios y los rellenos de tierra controlados; de éstos según la SEMARNAT (2012) los primeros constituyen la mejor solución para la disposición final de los residuos sólidos urbanos. Aunque pueden no serlo sino se toman las consideraciones adecuadas para su construcción (Duran, 2013).

Los problemas de generación de gases de efecto invernadero, y la producción de lixiviados están presentes en las alternativas descritas anteriormente; sin embargo, de los métodos antes mencionados los métodos tecnificados permiten una mayor reducción de riesgo asociado y el aprovechamiento (idealmente) de los residuos resultantes del proceso (Duran, 2013).

De acuerdo a lo establecido en la LGPGIR, este tipo de infraestructura debe incorporar obras de ingeniería particulares y métodos que permitan el control de lixiviados y el adecuado manejo de los biogases generados. De acuerdo con SEMARNAT (2012) en 2011 se estimó que el 72 % del volumen generado del total de RSU en el país se dispuso en rellenos sanitarios y sitios controlados, el 23 % se depositó en sitios no controlados y el restante 5 % se recicló. Para 2013 según el INEGI, a nivel nacional la disposición final en rellenos sanitarios y sitios controlados alcanzó poco más del 74.5 % del volumen de RSU generado, lo que representa un incremento de alrededor del 82.7 % con respecto al año 1997, en el cual se disponía cerca del 40.7 % de los residuos. Mientras tanto, de los residuos generados, el 21% se depositó en sitios no controlados y el 5 % restante fue reciclado.

Residuos considerados sólidos inertes

Los residuos sólidos inertes son los residuos que, por sus características intrínsecas, no ofrecen riesgos para la salud ni para el medio ambiente y que, al ser muestreados de forma representativa, según las normas adecuadas, y sometidos a contacto estático o dinámico con agua destilada o des-ionizada a temperatura ambiente (pruebas de disolución), no tuvieran ninguno de sus componentes disueltos en concentraciones superiores a los patrones de potabilidad del agua, excepto los que se refieren a aspecto, color, turbidez y sabor.

Gran parte de los residuos generados por las diversas actividades humanas deriva de los procesos de construcción. La composición de los residuos generados por la industria de la construcción varía dependiendo del tipo de actividad (construcción/demolición), además del tipo de metodología para realizar su trabajo utilizada (Monteiro *et al.*, 2006).

Según el mismo autor el método de tratamiento mayormente utilizado para los sólidos inertes según es la segregación o la limpieza, trituración y reutilización (ya sea semi-automatizado o automatizado) para la misma industria de la construcción. Éste mismo grupo de investigación menciona las siguientes ventajas que surgen a partir del tratamiento de los sólidos inertes:

- *Reducción del volumen de extracción de la materia prima.*
- *Conservación de materia prima no renovable.*
- *Solución de los problemas ambientales urbanos generados por la descarga indiscriminada de residuos de la construcción en la vía pública.*
- *Comercialización en el mercado de materiales de construcción más baratos.*
- *Creación de puestos de trabajo para la mano de obra menos calificada.*

Residuos Orgánicos (RO)

Los residuos orgánicos son aquellos residuos que se originan directamente de materiales de la naturaleza pertenecientes en algún momento a un organismo con vida (Benitez, 2001), en éste sentido podemos hablar de una gama muy diversa de éstos. Según la SEDESOL del total generado en 2012 el 52.4 % correspondió a residuos de comida, jardines y materiales orgánicos similares. Esta gran generación de residuos orgánicos a nivel nacional tiene que ver según el INEGI (2012) entre otros muchos factores a los patrones de consumo poblacionales, como ejemplo, los países con menores ingresos producen menos residuos, dentro de los cuáles dominan los de composición orgánica, a la inversa de países con mayores ingresos. En México en los años 50 el porcentaje de residuos orgánicos oscilaba entre el 65-70 %, mientras que lo reportado por el INEGI para 2012 fue 54 %, dichas cifras son la evidencia de nuestro camino hacia la industrialización nacional comenzado hace 57 años.

Entre estos residuos tenemos a los de origen animal que son aquellas estructuras que fueron en algún momento parte de un organismo animal, los estiércoles y los purines (Nieto-Garibay *et al.*, 2010). De los estiércoles generados actualmente en la producción primaria el 70 % corresponde al de bovino (Bernal y Gondar, 2008).

Otro gran grupo es el concerniente a los residuos de origen vegetal, estos son estructuras que en algún momento fueron parte de un organismo de origen vegetal, entre estas se consideran las que se producen por desprendimiento natural, aquellas que son el resultado de labores culturales agrícolas, el resultante de las podas de parques y jardines, la merma de mercados o cosechas que no cumplen con requisitos de aceptación de calidad (Nieto-Garibay, 2010).

Los residuos orgánicos domiciliarios, son el resultado de las actividades realizadas en cocinas propias, restaurantes, hoteles, y conllevan una mezcla de los dos anteriores y en ocasiones contienen estructuras pertenecientes a otros grupos animales.

Residuos Agroindustriales

Los residuos agroindustriales por su tipo de constitución primaria son considerados orgánicos; en sus características son demasiado variados (Saval, 2012) ya que existe una amplia variedad de agroindustrias tan solo en nuestro país. Los residuos sólidos agroindustriales han ocasionado impactos ambientales negativos por su disposición inadecuada y porque cada vez son más (Saval, 2012). Éste aumento en la generación está asociado al incremento de la población humana, a los procesos de transformación industrial (globalización), y a los hábitos de consumo de los individuos (Saval, 2012; Piña-Guzmán *et.al.*, 2017).

Algunos de estos residuos son quemados o vertidos en rellenos sanitarios, ahí existe una gran liberación de dióxido de carbono, contaminación de cursos de aguas, molestias por presencia de olores, proliferación de ratas, moscas y otros insectos (Saval, 2012).

Por otro lado, la biotecnología es un área del conocimiento que ha permitido la conversión de residuos agroindustriales en productos de interés comercial mediante procesos de extracción directos o de transformación (Saval, 2012). Dentro de este campo existe un amplio interés económico ya que su manejo supone mejoras para la producción de productos de mayor valor añadido (enzimas, proteína unicelular, pigmentos, antibióticos, polifenoles, etc.) (Barragan *et al.*, 2008; Saval, 2012).

Agroecología en el manejo de los ROD a nivel industrializado

La perspectiva agroecológica nos puede ofrecer algunas ventajas con respecto a la perspectiva biotecnológica, aunque es prudente mencionar que estas perspectivas se deben considerar como no excluyentes y en muchas ocasiones como complementarias.

Según Abraham *et al.* (2007) al buscar una oportunidad de aprovechamiento de los residuos agroindustriales se deben considerar tres aspectos para su utilización: caracterización biológica y química, y otra para la obtención de biocombustibles. En el caso de los ROD son aceptables las caracterizaciones mencionadas, más la caracterización de sus propiedades físicas. Antes de tomar la decisión de utilizar algún residuo para su manejo e incorporación del valor agregado al mismo se debe considerar (modificado de Saval, 2012) que:

- *El residuo debe estar disponible localmente y en las cantidades necesarias para asegurar la fabricación de un producto de interés.*
- *Que no requiera pretratamiento, y en caso de requerirlo, que éste sea sencillo y económico.*
- *Que la disponibilidad del residuo permita planificar el proceso para el cual se va a utilizar.*

Es lógico que después del aprovechamiento de un residuo se genere otro residuo el cual podría tener otra aplicación, o convertirse en un desecho (Saval, 2012). En este sentido el lombricompostaje reduce al mínimo los residuos resultantes del proceso de transformación.

Complementariamente, en palabras de Villegas-Cornelio y Laines-Canepa (2017):

En la actualidad la academia está en la búsqueda de una tecnología que se “económicamente viable” (más barato y al alcance de todas las naciones), “ambientalmente sostenible” (amigable con el medio ambiente, la flora, la fauna, el suelo, las autoridades encargadas de aire y el agua, sin ningún efecto sobre ellos) y “socialmente aceptable” (beneficioso para la sociedad sin ningún efecto adverso sobre la salud). En este sentido, la tecnología de la lombricultura combina estas virtudes y cualidades juntas.

Problemática de los residuos orgánicos domiciliarios en la localidad

Para el municipio de Puebla la SEMARNAT (2013) reportó un aumento en la generación de residuos de cocina, jardines y materiales orgánicos similares desde al año 1990 hasta 2012. Según el Instituto Municipal de Planeación (2013) en el 2000 la generación *per cápita* diaria de residuos sólidos urbanos fue de 0.88 kg/hab/día de estos el 0.54 kg correspondieron a residuos orgánicos, para el 2010 la misma institución reportó un aumento de 0.10 kg/hab/día. En cuanto a la generación diaria de RSU en el municipio se estimaron 1350 t para el año 2000, en el 2011 fue de 1700 t diarias (IMPLAN, 2013). Los datos mencionados fueron obtenidos en el pesaje al ingreso del Relleno Sanitario de la Ciudad de Puebla llamado Chiltepeque. Este aumento es explicado por un efecto de minimización en la generación de los residuos desde los domicilios.

Manejo agroecológico de residuos orgánicos a nivel industrial: la propuesta

En la capital del estado de Puebla es necesaria la realización de acciones para reducir la acumulación de ROD y su manejo inadecuado. Las autoridades encargadas de mediar dichas situaciones solo han recurrido a la sanción económica, medida poco eficiente. Por otro lado los pobladores una vez que aceptan un tiradero de residuos en su localidad acuden a tirar sus propios residuos a dicho sitio: situación que agrava las condiciones de insalubridad y el riesgo de contaminación ambiental (Benitez, 2001).

La Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) ha desarrollado una estrategia que busca vincular e integrar a la sociedad en el manejo de residuos orgánicos domiciliarios. Dentro de dicho proyecto se propone el manejo por medio del lombricompostaje de los ROD y diversas especies vegetales: entre ellas la hojarasca de eucalipto, a través de un diseño en concordancia con el enfoque agroecológico que busque la utilización de la menor cantidad posible de insumos externos, y a la vez sea accesible económicamente (Villegas-Cornelio y Laines-Canepa, 2017). Dicho diseño está orientado al manejo de los residuos en ausencia de fauna nociva, malos olores, y para la obtención de un producto final que cumpla con la calidad requerida por la NMX-FF-109-SEMARNAT-2008 para su posible inserción al mercado nacional.

Como caso de ejemplo se cuenta con la información obtenida de la experiencia exitosa del municipio de Teocelo, éste es un municipio veracruzano que en condiciones de desigualdad social decidió la administración pública y la comunidad, con la asesoría de la Universidad Veracruzana emprender una serie de proyectos sustentables. La producción de lombricomposta es la iniciativa más exitosa e imitada entre los municipios de la región, la cual surgió por problemas ambientales generados por depositar sus residuos en un vertedero a cielo abierto. Después del desarrollo de un plan integral de manejo de RSU por parte de las autoridades, posterior a su divulgación realizada por estudiantes teocelanos, y a la aplicación del mismo, los trabajadores del sector de limpieza pública y los vecinos aprendieron a separar la basura. Los residuos reciclables se venden y los residuos orgánicos se utilizan para lombricomposta con fines de venta. Parte fundamental de dicho proyecto es el rol que desempeña el Consejo Ciudadano quienes son la voz del pueblo y vigilantes del mismo (Suárez, 2003; Hernández, 2013).

Transformación y aprovechamiento de los residuos orgánicos

Según el INEGI, en el año 2012 en el país se enviaron a tratamiento 2 748 727 Kg de residuos orgánicos; sin embargo, dicho dato numérico no informa acerca de las cifras correspondientes para los diversos tipos de tratamiento de los mismos.

La importancia del aprovechamiento de los residuos orgánicos empieza a adquirir una mayor dimensión por el acelerado crecimiento urbano y la necesidad de reutilizar materias primas desechadas. El proceso de compostaje de los residuos orgánicos como biofertilizantes y acondicionadores de suelos, la producción de gas, la producción de lombricomposta mediante lombricompostaje, los biocombustibles, entre otros, son técnicas mediante las cuales se pueden aprovechar éste tipo de residuos (Monteiro *et al.*, 2006).

Para que se realice un buen manejo de los ROD se parte del entendido de la correcta separación desde la fuente de generación, de tal manera que se busquen alternativas óptimas de manejo desde la fuente (Monteiro *et al.*, 2006).

Compostaje

Las pilas para composta constituyen un medio de descomposición de la materia orgánica, en la que “no interviene la mano del hombre”, en ésta el reciclaje es 100% natural y en el proceso participan los microorganismos presentes en los mismos residuos. La elaboración de composta es una técnica ancestral muy utilizada para la estabilización de los residuos orgánicos donde el producto obtenido es rico en los nutrientes necesarios para abonar las tierras de cultivo (Saval, 2012).

Las altas temperaturas durante el proceso de compostaje no siempre logran el objetivo de reducir las poblaciones de agentes patógenos, por lo que las pilas estáticas aireadas son la mejor opción que garantiza la higienización del compost según Bustamante *et al.* (2008a).

A pesar de las complicaciones que se presentan en el proceso de compostaje existen diversos casos de éxito: Benito *et al.* (2005) prepararon composta a partir de residuos de la poda de hierbas y hojas. En Portugal, Ribeiro *et al.* (2007) reportan el

compostaje

a nivel piloto de residuos forestales y estiércol de cerdo en pilas aireadas, para obtener un sustrato para la producción de plántulas de tomate y lechuga. Bustamante *et al.* (2008a, 2008b) sometieron a compostaje el orujo de uva con estiércol de ganado vacuno y de aves de corral. Sánchez *et al.* (2008) utilizaron residuos de la extracción de aceite de oliva, estiércol de oveja, paja de corrales de ganado y tallos de uvas en diferentes proporciones, con éste material de origen obtuvieron una composta que fue mezclada con un suelo para la evaluación de la permanencia del carbono en el suelo, dicho estudio se realizó a nivel piloto en España.

En México los ROD tienen un potencial importante como materia prima para el proceso de compostaje (Ozores-Hampton, 2006) y para constituir una actividad productiva para generar ingresos extra. Se ha tenido la necesidad de reciclar dichos desechos y subproductos orgánicos mediante tecnologías innovadoras para la producción de abonos orgánicos de alta calidad a partir de procesos de descomposición de desechos sólidos (Alonso *et al.*, 2011). En lo que se refiere a las plantas de composta, de acuerdo a la información disponible (Tabla 2), existen 98 instalaciones en el país (INE-SEMARNAT, 2006; INEGI, 2012), sin embargo, no se sabe si siguen en operación.

Biogás

El biogás es una mezcla conformada principalmente por CH₄ (50%-70%) y por CO₂ (25% - 40%), que se genera por el proceso de biodigestión anaerobia (SEMARNAT, 2012), que consta de una serie de reacciones bioquímicas en la que residuos orgánicos son degradados o consumidos por un conjunto de microorganismos.

Asimismo, la acción de los microorganismos produce calor y mantiene el proceso en la temperatura adecuada (35 °C). En el proceso también se generan efluentes líquidos y sólidos que pueden ser utilizados como fertilizantes orgánicos (Red Mexicana de Bioenergía, 2017).

Tabla 2. Plantas de compostaje presentes en el país. Tomado del Diagnóstico Básico para la gestión Integral de los Residuos (2012).

Plantas de composta existentes en el país.				
Ubicación	Capacidad instalada	Capacidad de operación	Fuente	Observaciones
Bordo Poniente	73000 ton/año	32120 ton/año	SOS-GDF, 2011	
Álvaro Obregón, DF	1836 ton/año	1836 ton/año	SOS-GDF, 2011	
Cuajimalpa, DF	1200 ton/año	960 ton/año	SOS-GDF, 2011	
Iztapalapa, DF	1838 ton/año	1127 ton/año	SOS-GDF, 2011	
Milpa Alta, DF	1380 ton/año	1380 ton/año	SOS-GDF, 2011	
Xochimilco, DF	1295 ton/año	446 ton/año	SOS-GDF, 2011	
55 plantas de composta a lo largo del país (SF)	ND	ND	SEDENA, 2012	Hojarasca que se genera por la poda de árboles y de césped, así como el empleo de residuos orgánicos de los comedores y el de estiércol.
FONATUR, Benito Juárez, Quintana Roo	100 m ³ /día	15 m ³ /día	FONATUR, 20	Lodos de tratamiento de aguas residuales y residuos orgánicos
Centro de Educación Ambiental Ecoguardas	ND	ND	SMA-GDF, 2009-2010	

Plantas de composta existentes en el país.

Ubicación	Capacidad instalada	Capacidad de operación	Fuente	Observaciones
Centro de Educación Ambiental de Xochimilco, DF	ND	ND	SMA-GDF, 2009-2011	
Unidad Habitacional Nonoalco-Tlatelolco	ND	ND	Cornejo Moreno-Valle y Gonzalo-Ortega, 2010	
CU-UNAM, DF		24 m ³ /día	DGOC-UNAM, SF	ramas, pasto y hojas (SF: no se reporta el año de publicación)
Aguascalientes, Ags.	2 ton/día	ND	PMPGIR	
Querétaro, Qro.	ND	ND	PMPGIR	
Cooperativa Orgánica del Centro Ecol. Akumal, Quintana Roo	ND	ND	CEAKUMAL, SF	
Xcaret, Quintana Roo	ND	ND	XCARET, 2012	
Zacatepec de Hidalgo, Morelos	ND	ND	PEPGIR	
Tepoztlán, Morelos	ND	ND	PEPGIR	
Yautepec, Morelos	ND	ND	PEPGIR	
Cuernavaca, Morelos	48 m ³ /día	24 m ³ /día	PEPGIR	

Plantas de composta existentes en el país.				
Ubicación	Capacidad instalada	Capacidad de operación	Fuente	Observaciones
Mérida, Yucatán	1,200 ton/año	25 m ³ /h	Mérida, 2011	
Nicolás Romero. Edo. México	ND	ND	BioSistemas, 2012	Bioabono

ND: No disponible
SF: Sin fuente

En la actualidad existen algunos ejemplos de producción de biogás como energético a nivel mundial: en Grecia se realizó un estudio en reactores anaerobios, se utilizaron aguas residuales provenientes de la producción de aceite de oliva, estiércol de vaca y suero de queso con las bacterias presentes en los residuos; el residuo resultante se utiliza como fertilizante (Dareitoti *et al.*, 2009). El grupo de investigación de Parawira *et al.*, (2008), bajo las mismas condiciones reporta el uso de residuos de papa y remolacha azucarera; los estudios se llevaron a cabo en Zimbawue.

Lombricompostaje

La lombricultura inicia su desarrollo en América Latina a principios de 1980 (Aranda *et al.*, 1999). Ésta biotecnología es una tecnología innovadora de fácil implementación, bajo costo, y altamente eficiente en cuanto a la transformación de los residuos orgánicos (Rodríguez-Aragónes, 1998; Garg *et al.*, 2005; Villegas- Cornelio y Laines Canepa, 2017).

Entre las diversas estrategias de manejo de los diferentes tipos de residuos existen grandes diferencias, entre éstas podemos mencionar los costos, la accesibilidad, la eficiencia energética y de trabajo, la funcionalidad, las labores del manejo, el número de gente necesaria, el riesgo de trabajo, el tipo de insumos requeridos, la vida útil de los mismos, la localización de éstos, el terreno para trabajar, la proximidad a las fuentes de abastecimiento, el volumen de recepción, los beneficios ambientales, los

beneficios económicos, el reparto de la utilidad, todos éstos por mencionar solo algunos. Si comparamos dos tipos de manejo biológico de los residuos que pudieran adecuarse a bases agroecológicas, es decir el compostaje y el lombricompostaje, en éste último el material obtenido está mayormente enriquecido química y biológicamente (Ferrera y Alarcón, 2001; Nogales *et al.*, 2005).

El lombricompostaje es un proceso de oxidación, degradación y estabilización de la materia orgánica realizada por la acción conjunta de lombrices y microorganismos en condiciones mesófilas y aerobias (Vargas-Machuca, 2010). Éste proceso no debe confundirse con la lombricultura, ya que el objetivo de ésta última es maximizar el cultivo de lombrices sin perseguir una óptima estabilización del residuo (Moreno *et al.*, 2014).

En su mayoría las lombrices utilizadas en el proceso de lombricompostaje son lombrices saprófagas con hábitos epigeos (Aranda *et al.*, 1999) (Figura 1); sin embargo, algunas investigaciones han mostrado que existe un gran potencial en la utilización de lombrices anécicas (Rodríguez-Aragónes, 1998) para dicho propósito.

Las lombrices más utilizadas comprenden a *Eisenia andrei* (Bouché, 1972), *Eisenia foetida* (Savigny, 1826), *Dendrobaena veneta* (Savigny, 1826), y en menor medida *Perionyx excavatus* (Perrier, 1872) y *Eudrilus eugeniae* (Kinberg, 1867; Domínguez y Pérez-Losada, 2010; Domínguez y Edwards, 2011); aunque potencialmente se pueden utilizar otras especies (Suthar y Singh, 2007). En la Tabla 3 se pueden observar comparaciones entre algunas de estas especies de lombrices. Las lombrices antes mencionadas cumplen con ciertos requisitos (Villegas-Cornelio y Laines-Canepa, 2017) como:

- Pueden vivir en cautiverio.
- Tienen un alto poder reproductivo.
- No son depredadoras de otras lombrices.
- Pueden vivir en acumulaciones de materia orgánica.
- Presentan alta voracidad.

- Son longevas.
- Pueden vivir en grandes concentraciones poblacionales.

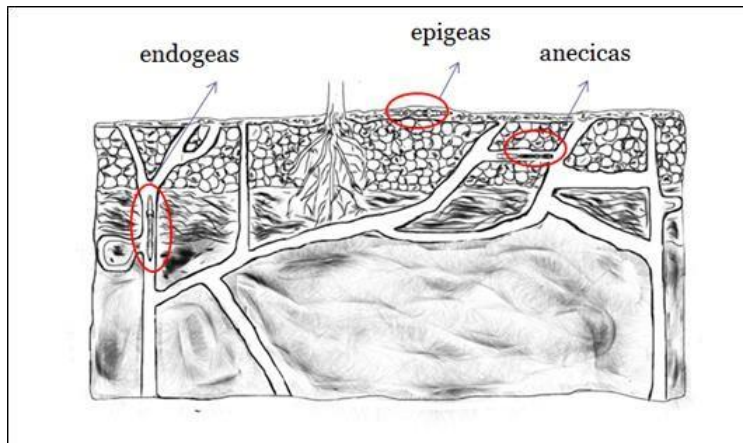


Figura 1. Hábitos ecológicos de las lombrices de tierra. Elaborada por Ma. Fernanda González.

El proceso no genera malos olores ni fauna nociva (Villegas-Cornelio y Laines-Canepa, 2017) si es él adecuado. Ésta estrategia tiene la finalidad de aprovechar y reducir los volúmenes de residuos orgánicos, que generan problemas ambientales y al mismo tiempo permiten otorgar un valor agregado al producto final estabilizado, el cual se considera homogéneo y de granulometría fina (Moreno *et al.*, 2014; Villegas-Cornelio y Laines-Canepa, 2017); éste último punto puede incluso diferenciarse a diferentes granulometrías.

Por las razones anteriormente mencionadas los países desarrollados se preocupan y reconocen la importancia de utilizar los residuos como recursos, en lugar de desecharlos en vertederos, o en algún otro sitio de disposición final: países como Estados Unidos de América, Reino Unido, Nueva Zelanda, y Australia poseen algunas de las plantas para vermicompostaje más grandes del mundo (Villegas-Cornelio y Laines-Canepa, 2017), ejemplo que debemos considerar.

Para realizar un buen diseño de un módulo de lombricompostaje se deben considerar las siguientes condicionantes (modificado de Rodríguez-Aragónes, 1998):

- El área debe estar situada a las proximidades de los probables consumidores.
- Debe estar situado en un lugar de fácil acceso y contar con una fuente cercana de agua no contaminada.
- Las camas o lechos deben tener una pendiente no mayor al 10 % y tener un buen drenaje.
- De ser posible ubicar las camas bajo sombra natural, de no ser así considerar el realizar un sombreado artificial.
- Si es el caso considerar la probabilidad de expansión en el área destinada.

Tabla 3. Características biológicas y condiciones ambientales de algunas de las principales especies de lombrices utilizadas en lombricompostaje.

Características	<i>E. andrei</i>	<i>E. foetida</i>	<i>D. rubidus</i>	<i>L. rubellus</i>
Tamaño adultos (mm)	4-8*50-100	4-8*50-100	3-4*35-60	4*70-100
Peso medio adultos (g)	0.55	0.55	0.25	0.80
Ciclo de vida (días)	45-51	45-51	75	120-170
Tiempo de maduración (días)	28-30	21-26	54	74-91
Número cápsulas día ⁻¹	0.35-0.5	0.35-0.5	0.2	0.07-0.35
Viabilidad eclosión (%)	73-80	72	80	60-80
Número descendientes/cápsula	2.5-3.8	2.5-3.8	1.67	1
Temperatura óptima y límites (° C)	25 (0-35)	25 (0-35)	25 (15-25)	-
Humedad óptima y límites (%)	80-85 (70-90)	80-85 (70-90)	75 (65-85)	-

Nota: Modificado de Moreno *et al.* (2014).

En general el proceso de transformación de residuos mediante lombricompostaje consta de cuatro etapas: recepción-vertido, precomposteo, inoculación y extracción (comunicación personal, Patrón-Ibarra). Las materias primas generalmente utilizadas bajo esta tecnología son estiércoles animales, restos de cultivos, residuos domiciliarios, residuos agroindustriales y lodos residuales. La calidad nutricional

del producto final obtenido depende en gran medida de los materiales utilizados desde el origen (Aranda *et al.*, 1999; Álvarez, 2004; Garg *et al.*, 2005).

Parámetros de calidad según la NMX-FF-109-SCFI-2008

La NMX-FF-109-SEMARNAT-2008 establece las especificaciones de los parámetros de calidad que debe cumplir la lombricomposta producida, comercializada o con fines de integración al mercado nacional. Esta norma mexicana únicamente reconoce como vermicomposta aquellos materiales que cumplen con los parámetros establecidos en la misma. Una vez que el material obtenido es considerado como lombricomposta, el mismo está sujeto a su categorización (extra, primera y segunda), la cual depende de los valores obtenidos en cuanto a la pureza del material.

La granulometría de la vermicomposta es un parámetro que no demerita la calidad del producto obtenido; sin embargo, es un factor importante a la hora de la compra por parte del consumidor. Complementariamente, todos los grados de calidad se debe presentar cierto color característico (del negro al café: según la Tabla de colores de Munsell). Por último el producto obtenido debe estar libre de olores desagradables y presentar en mayor o menor medida un olor a “tierra húmeda”.

Calidad de la lombricomposta

La calidad de las enmiendas consideradas orgánicas se deben determinar a través de las propiedades físicas, químicas y biológicas (Lasaridi *et al.*, 2006) que estas presentan. Para Leblanc *et al.* (2007), la calidad de un abono se determina a partir de su contenido nutricional y de su capacidad de proveer nutrientes a un cultivo. Benzing (2001) ha reportado que este contenido está directamente relacionado con las concentraciones de esos nutrientes en los materiales utilizados para su elaboración. Asimismo, la importancia de evaluar dichos contenidos permitirá saber si es pertinente el enriquecimiento de los abonos (Santos, 2004) obtenidos con otras fuentes que contengan mayor carga nutrimental (Pérez *et al.*, 2008) o por el contrario utilizar materiales con menor contenido nutrimental.

Debido a los diferentes tipos de materiales orgánicos utilizados para la elaboración de las compostas y lombricompostas es de esperarse que exista variación en sus diversas propiedades (Álvarez *et al.*, 2004). Es muy importante conocer esa variación para hacer un mejor manejo de las mismas como fertilizante (N, P, K, C) y/o fuente de microorganismos que tengan actividad mineralizadora o que tenga actividad supresora de fitopatógenos del suelo (Hoitink *et al.*, 1996) o incluso puedan ser vectores de organismos patógenos.

Para cualquier material que pretenda ser reconocido como lombricomposta según la NMX-FF-109-SCFI-2008 se debe evaluar la pureza del mismo, para tal efecto es necesario conocer los valores del material extraño, el material orgánico no digerido, el material inorgánico, el porcentaje de semillas viables, y el número de lombrices vivas (Tabla 4).

Tabla 4. Valores permisibles de los parámetros de calidad de la lombricomposta según la NMX-109-FF-SCFI-2008.

ATRIBUTOS		EXTRA	PRIMERA	SEGUNDA
Material mineral	extraño	0 % - .5 %	1.51 % - 3 %	3.01 % - 5 %
Material orgánico no digerido		0 % - 3 %	3.01 % - 6 %	6.01 % - 10 %
Material inerte		< 0.5 %	0.51 % - 1 %	1.01 % - 1.5 %
Semillas viables		≤ 1	> 1 - ≤ 1.5	> 1.5 - ≤ 2
Lombrices vivas		< 0,2 (una/5L)	0,2 (una/ 5L)	0,4 (dos por cada 5L)

Propiedades Físico-químicas

Para la NMX-FF-109-SCFI-2008 el contenido de humedad es uno de los componentes principales en la lombricomposta y en muchos casos se desestima, esto da lugar productos con humedad en demasía y en otros casos, materiales rescos. En todos sus grados de calidad de la vermicomposta obtenida se debe

especificar el contenido

de agua y el rango porcentual en peso (Tabla 5).

Tabla 5. Especificaciones físico-químicas de la lombricomposta según la NMX-109-FF-SCFI-2008.

CARACTERÍSTICA	VALOR
NITRÓGENO TOTAL	1 - 4 % (base seca)
MATERIA ORGÁNICA	20 - 50 % (base seca)
RELACIÓN N/C	≤ 20
HUMEDAD	20 - 40 % (base húmeda)
pH	5.5 - 8.5
CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	$\leq 4 \text{ dS m}^{-1}$
CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO	$> 40 \text{ Cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$
DENSIDAD APARENTE	0.40 a 0.90 g mL^{-1}
MATERIALES ADICIONADOS	Ausente

Tabla 6. Límites microbiológicos máximos permisibles según la NMX-109-FF-SCFI-2008.

MICROORGANISMO	TOLERANCIA
<i>Escherichia coli</i>	$\leq 1000 \text{ NMP / g}$ (base seca)
<i>Salmonella sp.</i>	3 NMP / 4 g (base seca)
Huevos viables de helminto	1 / 4 g (base seca)
Hongos fitopatógenos	Ausente

Para determinar la madurez de la lombricomposta según ésta norma se deben evaluar la relación C/N y la capacidad de intercambio catiónico. Los valores obtenidos se deben encontrar en el rango que se muestra en la Tabla 5.

Para complementar el análisis químico de determinaron las concentraciones en partes por millón (ppm) de algunos metales pesados.

Materiales y métodos

Con el fin de realizar una comparación entre las tres etapas presentes en el proceso de lombricompostaje (recepción de material, precomposteo, material final) se efectuó la determinación de los mismos parámetros en cada momento, dichos parámetros están basados en la propuesta de evaluación que propone la NMX-FF- 109-SCFI-2008 para la lombricomposta obtenida. Aunque esta norma mexicana evalúa la calidad con respecto a los grados de pureza de las lombricompostas obtenidas (Capistran, *et al.*, 1999; Etchevers, 1999; Soto, 2000; Romero, 2000; Romero *et al.*, 2000; Aranda, *et al.*, 2001; Soto y Melendez, 2004; Faihtfull, 2005) se propone su complementación con otras pruebas que brinden mayor seguridad al momento de utilizar un material de esta naturaleza (Tabla 8).

Localización del experimento

Se instaló el experimento en la planta de lombricomposta VermiBUAP localizada en las coordenadas 19°15'20.73"N y 97°48'26.28"O. (Figura 2). Los experimentos se realizaron con desechos orgánicos provenientes de ciudadanía y con hojarasca de eucalipto, esta última fue recolectada del parque municipal localizado en Amalucan.

Fase de Campo

Se evaluaron tres tiempos en la transformación de los residuos orgánicos: inicio, precomposteo y término de proceso. Asimismo, se evaluaron tres tratamientos por triplicado en los materiales utilizados, éstos fueron definidos de la siguiente forma:

Tratamiento 1 (T1 = 100% ROD)

Tratamiento 2 (T2 = 100% Hojarasca de *Eucalyptus sp.*)

Tratamiento 3 (T3 = ROD y hojarasca de *Eucalyptus sp.*, a razón de 10:1 p/p)

El vertido de los materiales para cada tratamiento se muestra en la Tabla 7.



Figura 2. Visualización de la localidad, a) localización en el estado de Puebla (INEGI), b) vista satelital (Google Earth Pro 2017).

Tabla 7. Cantidades iniciales de ROD y hojarasca de *eucalyptus sp.* (kg) para cada tratamiento.

Tratamiento	R.O.D. (kg)	Hojarasca de <i>Eucalyptus sp.</i> (kg)	Subtotal (kg)
B1T1	734.5	0	734.5
B2T1	734.5	0	734.5
B3T1	734.5	0	734.5
B1T2	0	70	70
B2T2	0	70	70
B3T2	0	70	70
B1T3	734.5	70	804.5
B2T3	734.5	70	804.5
B3T3	734.5	70	804.5
TOTAL	4407	420	4827

R.O.D. = Residuos Orgánicos Domiciliarios

El experimento inició el día 25 de agosto de 2018 en un ambiente semi-controlado con un diseño de bloques completamente al azar como lo muestra la figura 3. Las unidades experimentales constaron de blocks de hormigón, con un trazo de 1.50 m de ancho y 2.38 m de longitud, la altura de los mismos fue de 0.20 m. No se realizó el drenaje de líquidos al momento del vertido de los tratamientos ya que en el proceso realizado en VermiBUAP no se lleva cabo dicho drenaje, sin embargo, se tuvo que drenar en algunos momentos ya que por exceso de humedad, la temperatura no aumentaba, asimismo, en días posteriores a lluvias.

Temperatura interna y parámetros ambientales.

La toma de la temperatura se realizó desde el tercer día posterior al montaje del experimento hasta los 37 días posteriores al inicio del mismo. Con el fin de monitorear y establecer los perfiles de comportamiento durante el proceso de precomposteo se realizó la medición diaria de las variables: temperatura interna, temperatura ambiental y humedad relativa ambiental (Tabla 8). La temperatura interna se midió *in situ* en nueve puntos equidistantes a una profundidad de 12 cm (Figura 3), para su determinación se utilizó un termómetro de mercurio con escala de 100 °C para compostas y lombricompostas marca Cooper y un termohigrómetro ambiental para las variables ambientales, posteriormente se consideraron las medias aritméticas de los valores registrados para graficar los perfiles.

Otras determinaciones *in situ* fueron los pesajes en cada extracción concernientes al material fino y grueso para determinar los rendimientos y la proporción de material transformado por experimento con respecto a los residuos recibidos originalmente.

Para explicar el enunciado anterior al material final se le sometió a cernido en diferentes mallas, la primera con un espaciado de cuadrícula de 2 mm la cual corresponde a la lombricomposta fina, y la segunda con una cuadrícula de 5 mm la cual corresponde a la lombricomposta granulada. Los análisis para material final solo se realizaron a la lombricomposta fina. El experimento se concluyó el día 20 de abril de 2019: a los 7 meses y 26 días.

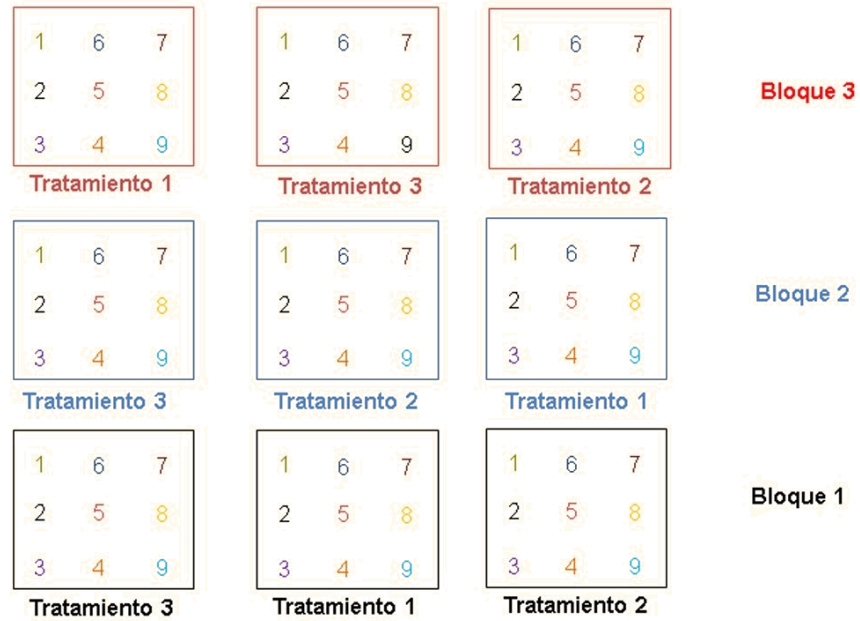


Figura 3. Diseño experimental para los tratamientos evaluados. Asimismo se muestran los puntos en dónde se tomó la temperatura interna.

Tabla 8. Parámetros de monitoreo en campo durante el proceso de precomposteo.

Parámetros	Técnica de monitoreo
Temperatura (°C)	Termómetro (Cooper)
Temperatura ambiental (°C)	Termohigrómetro ambiental
Humedad relativa (%)	Termohigrómetro ambiental

Fase de Laboratorio

Las muestras tomadas *in situ* para la determinación de la composición del material de origen fueron de 10 g para realizar los análisis físicos, químicos y biológicos en laboratorio. Las pruebas se realizaron por duplicado.

En estudios previos se ha demostrado que no existe homogeneidad en los métodos de prueba ni en las especificaciones para las lombricompostas (Capistrán, *et al.*, 1999; Etchevers, 1999; Soto, 2000; Romero, 2000; Romero *et al.*, 2000; Aranda, *et al.*, 2001; Soto y Meléndez, 2004; Faihtfull, 2005) producidas entre los diferentes tipos o formas de producción. Sin embargo, como se ha mencionado con anterioridad

el

día

10

de

junio de 2008, se publicó en el Diario Oficial de la Federación, la vigencia de la Norma Mexicana NMX-FF-109-SCFI-2008 "Humus de lombriz (lombricomposta)-Especificaciones y métodos de prueba" (Tabla 9). En dicha norma se establecen las especificaciones de calidad que debe cumplir la lombricomposta que se produce o se comercializa en territorio nacional. De esta manera la norma es un referente dentro de la normatividad para este tipo de insumos orgánico. Sin embargo, para entender mejor el proceso se incluyeron otros parámetros de evaluación adicionales para brindar mayor seguridad al momento de la adquisición por parte del consumidor.

Se realizó el análisis al momento de la recepción de los materiales, uno más después de haber realizado el proceso de precomposteo y por último en las lombricompostas obtenidas de la transformación de residuos, con el propósito de conocer como sucede la transformación física, química y biológica dentro del proceso de lombricompostaje.

Fase de Laboratorio: Evaluación física

Se evaluó la humedad por el método gravimétrico, la densidad aparente por el método de la probeta, y la capacidad de intercambio catiónico por el método de acetato de amonio (Tabla 9), dichas mediciones ofrecen información valiosa acerca de los parámetros físicos contemplados en la NMX-FF-109-SCFI-2008 y la calidad de la lombricomposta obtenida. Los análisis se realizaron en el Departamento de Investigaciones Agrícolas (DICA) perteneciente al Instituto de Ciencias (ICUAP) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Cuando las lombricompostas se utilizan como sustrato las propiedades físicas de son consideradas las más importantes, ya que si éstas son inadecuadas, difícilmente se podrán mejorar una vez que se ha establecido el cultivo, por lo que su caracterización previa es imperativa (Ansorena, 1994; Cabrera, 1999).

Fase de Laboratorio: Evaluación química

La evaluación inicial de las propiedades químicas de un sustrato se concentra principalmente en aquellos parámetros que podrían afectar significativamente el cultivo en su fase de establecimiento, en especial el pH y la conductividad eléctrica (CE) (Cabrera, 1999).

Se determinó el pH por el método del potenciómetro, la conductividad eléctrica se realizó bajo la técnica conductimétrica, el contenido de nitrógeno (N) por el método de Kjeldahl, el contenido de carbono (C) por el método de cremación, (con estos datos se calculará la relación C/N), el contenido de materia orgánica (MO) por el método Walkley y Black modificado, el análisis nutrimental (P, K), el contenido de metales pesados (Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Zn) y otros metales (Al y Mg) por el método de absorción atómica (Tabla 9).

Los análisis se realizaron en el Departamento de Investigaciones en Ciencias Agrícolas (DICA) perteneciente al Instituto de Ciencias (ICUAP) de la BUAP.

Fase de Laboratorio: Evaluación biológica

Conteo bacteriano en placa

Los métodos utilizados para el conteo en placa y determinaciones fúngicas se Biotecnología Aplicada de la BUAP, específicamente en el Laboratorio de Producción de Biológicos.

Para realizar el conteo bacteriano se utilizaron tres medios de cultivo, cada uno por triplicado: Luria Bertani (LB), Medio Mínimo (MM8), Medio Mínimo 9 (MM9), este último fue enriquecido después de ser autoclavado con 5 g/L de glucosa, 1 mM de $MgSO_4$ y 0.3 mM de $CaCl_2$ en 500 ml de agua, asimismo, se utilizó el medio Papa-Dextrosa-Agar (PDA). El medio LB es considerado un medio rico en nutrientes y es utilizado en su mayoría para el cultivo de *E. coli* y otros grupos bacterianos, los otros dos son medios definidos o medios mínimos (se ajustó el pH cercano a la neutralidad). Un medio mínimo es aquel medio de cultivo cuya composición química está exactamente definida (generalmente sin aminoácidos).

La diferencia entre el medio MM8 y MM9, en éste caso radicó en que el primero prescinde de fuente nitrógeno, por tanto se utilizó para el crecimiento de organismos que puedan fijar el N ambiental, mientras que en el segundo se sabe que se pueden desarrollar organismos como *Pseudomonas* y otras bacterias ya que cuenta con fuente de carbono como de nitrógeno.

Una vez elaborados los medios de cultivo, se realizaron diluciones seriadas de una suspensión que contenía 5 g de lombricomposta en 45 ml de agua destilada estéril (10^0), posteriormente se tomaron 5 ml de esa solución y se mezclaron con 45 ml de agua destilada estéril (10^{-1}), y así sucesivamente hasta llegar a la dilución 10^{-5} . Posteriormente se realizó el sembrado en placas de Petri las cuales contenían los medios de cultivo mencionados anteriormente, el sembrado se realizó dentro de una cámara de bioseguridad marca Euroclone modelo SAFEMATE 1.2 CYTO, para esto se tomaron 20 μ l de las diluciones de cada tratamiento y se realizó el estriado. Posteriormente se colocaron las cajas en una cámara de crecimiento (Euroclone, modelo SAFEGROW 188 PRO) a 30 °C, a las 16 horas se realizaron los conteos bacterianos. Una vez que se tuvieron los conteos, se tomaron en cuenta aquellas cajas que presentaron entre 25 - 250 unidades formadoras de colonias (UFC), posteriormente se realizó en cálculo pertinente para determinar las UFC/g para cada tratamiento y repetición. A los datos se les realizó una transformación con logaritmo base 10 para la realización de los análisis estadísticos.

Para el conteo en placa se utilizó la siguiente fórmula:

$$\frac{UFC}{g} = \left(\frac{UFC}{ml \text{ de solución}} \right) \left(\frac{1}{p} \right) (ml \text{ de solución}) \left(\frac{1}{g \text{ de muestra}} \right)$$

Dónde:

UFC/ml = Conteo de organismos por solución

p = densidad de la solución

Determinaciones fúngicas

De la misma forma que en el conteo bacteriano se realizaron diluciones seriadas (desde 10^0 hasta 10^{-5}) para el conteo de hongos. Posteriormente se realizó el sembrado en caja Petri con medio papa-dextrosa-agar (PDA) en la cámara de bioseguridad marca Euroclone modelo SAFEMATE 1.2 CYTO, para esto se tomaron 20 μ l de las diluciones de cada tratamiento y se realizó el sembrado. Posteriormente se colocaron las cajas en una cámara de crecimiento (Euroclone, modelo SAFEGROW 188 PRO), a los 8 días se realizaron las observaciones. Una vez que se desarrollaron los organismos se calculó el rango de la densidad poblacional en base a la dilución en dónde se presentaron. La fórmula que se utilizó es la misma que se mencionó en el conteo bacteriano.

Complementariamente, una vez que los organismos se desarrollaron en las cajas Petri se procedió a su aislamiento por medio de sembrado en placa y en algunos casos por microcultivo. Las nuevas placas se colocaron en la cámara de crecimiento por el mismo periodo de tiempo. Posteriormente se realizó la inoculación del organismo de interés en agua PISA sobre un portaobjetos, se secó la lámina a temperatura ambiente dentro de la cámara de bioseguridad y después se colocó una gota de azul de metileno para observar estructuras reproductivas bajo microscopio óptico (MOTIC) a 40 y 100 x para la determinación de los posibles géneros.

Producción y calidad de la lombricomposta

Para la determinación de los rendimientos se tomaron dos rubros, el primero es la producción de la lombricomposta en dos granulometrías, a 2 y 5 mm para lombricomposta fina y granulada, respectivamente. De cada extracción realizada se pesó el material antes y después del cernido con una báscula con capacidad de 500 kg. La cernidora utilizada cuenta con un sistema de doble malla, por inclinación y vibración el material desciende por dos compartimentos separados, el material que no puede ingresar por la malla de 5 mm es colectado por otro compartimento.

El material no transformado también se cuantificó (Figura 4). Para obtener los rendimientos finales se realizó la sumatoria de todas las extracciones. Con estos datos se pudo obtener el porcentaje de transformación y el del material no transformado en base a la cantidad de los materiales iniciales.

El segundo rubro constó de la producción de lombriz, al inicio del experimento se realizó la inoculación de 1 kg de lombrices de la especie *E. andrei* para cada tratamiento.



Figura 4. Cernidora utilizada para la obtención de la lombricomposta en dos granulometrías, a 2 y 5 mm, localizada en VermiBUAP.

Antes del término del experimento se realizó un muestreo para la estimación de la densidad poblacional, para tal efecto se realizó el trazo de cuadrantes al interior de cada una de las camas, cada cama contó con nueve cuadrantes, a cada cuadrante se le introdujeron seis cilindros de 2.4 cm de diámetro y 20 cm de largo. Posteriormente se contaron los adultos, juveniles y cocones que se encontraron al interior, los primeros dos también fueron pesados (Figura 5). Con estos datos se pudo calcular la biomasa de lombrices/ m².



Figura 5. Muestreo para estimación de densidad poblacional de *E. andrei* antes de concluir el experimento.

Para evaluar el grado de calidad de las lombricompostas obtenidas se realizaron las determinaciones que se establecen en la NMX-FF-109-SCFI-2008 en base a la pureza de la enmienda obtenida (Tabla 9) a excepción de la determinación del número de lombrices vivas. Para tal efecto se realizó el pesaje de 100 g de cada lombricomposta y se separó manualmente para evaluar los rubros presentes en esta Norma. Asimismo, se evaluó la germinación de semillas en las lombricompostas, para tal motivo se colocaron los abonos en charolas de plástico, se cubrieron con bolsa de plástico transparente y se regaron durante siete días, posteriormente se contaron las plántulas presentes.

Relación Costo-Beneficio (C/B)

La relación costo-beneficio expresa los beneficios netos a lo largo de la vida útil del proyecto por unidad monetaria invertida (Rucoba-García *et al.*, 2006; Terrones y Sánchez, 2011). La fórmula con que se obtuvo la relación costo-beneficio para este proyecto es la misma que utilizaron Terrones y Sánchez (2011), pues considera solo un periodo de tiempo dentro de la vida útil del proyecto (Flores, 2017):

Dónde:

$$\frac{B}{C} = \frac{\sum_{j=l}^{j=n} Q_i P_i}{\sum_{h=l}^{k=n} C_h}$$

Q_i = representa la cantidad vendida (sumatoria de producción y productos vendidos)

P_i = representa el precio de venta de la lombricomposta

C_h = representa el costo debido al rubro h (inversión inicial, siembra, trabajador permanente, cosecha, pos-cosecha, riego, comercialización, etc.)

Tabla 9. Variables y metodologías para análisis de la transformación y calidad para lombricompostas basada en la NMX-109-FF-SCFI-2008.

VARIABLE	UNIDAD	MÉTODO DE MEDICIÓN	NORMATIVIDAD
FISICOQUÍMICOS			
Humedad	%	Método Gravimétrico	
Conductividad eléctrica	dS/m	Método potenciométrico	NMX-FF-109-SCFI-2008
Capacidad de intercambio catiónico	meq/100g	Acetato de amonio	NMX-FF-109-SCFI-2008
Densidad aparente	g/cm ³	Método de la probeta	NMX-FF-109-SCFI-2008
pH	-log[H ⁺]	Potenciómetro en solución acuosa	NMX-FF-109-SCFI-2008
MO	%	Método Walkley y Black modificado (1947)	NMX-AA-021-SEMARNAT-2000
Carbono	%	Cremación	NMX-AA-067-1985
Nitrógeno	%	Método de Kjeldahl	NMX-AA-067-1985
Relación C/N		Relación C/N	NMX-AA-067-1985
P, K, Al y Mg	%	Absorción atómica	NTEA-006-SMA-RS-2006.
Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Zn	mg/kg	Absorción atómica	NTEA-006-SMA-RS-2006.
MICROBIOLÓGICOS			
Hongos fitopatógenos	UFC/g	Medios de cultivo, PCR y secuenciación.	
Bacterias totales	UFC/g	Técnica de conteo en placa.	

Análisis estadísticos

A los resultados de las mediciones de los parámetros a evaluar se les analizó estadísticamente mediante pruebas de ANOVA y Tukey HDS, y pruebas de correlación ($p \leq 0.05$) con el software estadístico R.3.2.1. Previamente a estos análisis se realizaron las correspondientes pruebas de Normalidad y de Homocedasticidad. Para el caso de los parámetros biológicos se utilizó el análisis Kruskal-Wallis a falta de normalidad.

Resultados y discusión

Temperaturas internas y parámetros ambientales

En general las temperaturas promedio registradas para cada tratamiento no superaron los 55 °C (para eliminar o disminuir la presencia de organismos indeseables) como lo reporta Cabildo *et al.* (2008). A excepción de una unidad experimental concerniente a la mezcla de organodomiciliarios y hoja de eucalipto, estos resultados concuerdan con el experimento de Altiver (2003) en el que trabajó con estiércoles de bovinos los cuales en el proceso de compostaje no alcanzaron las temperaturas mencionadas con anterioridad. Las unidades experimentales con las temperaturas más altas fueron las de hojarasca de eucalipto y la mezcla de residuos domiciliarios y hojarasca de eucalipto con 54 y 57 °C, respectivamente. Asimismo dichos tratamientos presentaron las menores temperaturas con 21 °C (Figura 6).

Los residuos domiciliarios llegaron hasta los 40 °C únicamente y descendieron a los 23 °C como valor mínimo. Esto concuerda por lo reportado con Schuldt *et al.* (2009) pues mencionan que en pilas de residuos orgánicos menores a 50 cm de altura no se produce un aumento drástico de la temperatura. Las temperaturas más altas se presentaron en los primeros 7 días para los tres tratamientos (Figura 6). En los perfiles de comportamiento de la temperatura se pueden observar las tres fases (Bueno y Días, 2008): mesófila inicial (< 45 °C), termófila (> 45 °C) y mesófila final (< 45 °C).

Se puede falsear la hipótesis de que las medias de los diferentes tratamientos son iguales (ANVA de una vía, $F_2, 366 = 40.88, p < 0.001$). Como se muestra en la Tabla 10 los perfiles de comportamiento de la temperatura en los diferentes tratamientos muestran diferencias significativas (Tukey-Kramer, $p < 0.05$). El tratamiento con la mezcla de residuos domiciliarios y hojarasca de *Eucalyptus sp.* fue el que tuvo la mayor temperatura promedio.

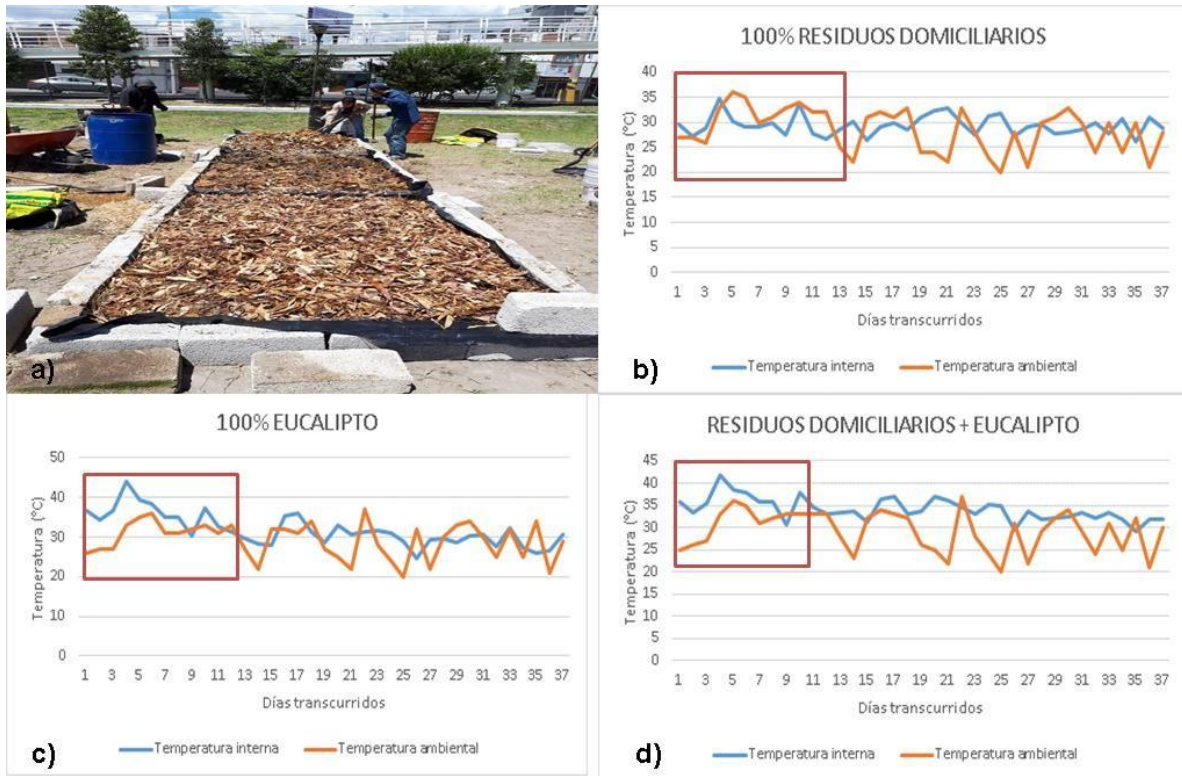


Figura 6. Perfiles promedio del comportamiento de la temperatura interna y temperatura ambiental, a) montaje del experimento, a) vertido de materiales en cama, b) Residuos Domiciliarios, b) Hojarasca de Eucalipto y c) Mezcla de ambas. El monitoreo se realizó durante 37 días consecutivos.

Existe una correlación negativa fuerte entre las variables ambientales, pero se presentó una baja correlación positiva entre la temperatura interna y las variables ambientales para todos los tratamientos, a excepción del tratamiento de hojarasca de eucalipto donde dicha relación moderada es positiva (Figura 7).

Tabla 10. Comparación de temperaturas en las camas de precomposteo de los diferentes tratamientos.

Abreviatura	Tratamiento	X (°C)	SD	r	MIN (°C)	MAX (°C)
T3	R.O.D. + Hojarasca de <i>Eucalyptus sp.</i>	34.06504 a	5.06	123	23	49
T2	<i>Eucalyptus sp.</i>	32.29268 b	4.83	123	23	48
T1	R.O.D.	29.21138 c	2.34	123	25	37
	DMS	1.27				

Nota: x = medias, SD = desviación estándar, DMS = Diferencia Mínima Significativa, MIN = valor mínimo, MAX = valor máximo

* = Tratamientos con la misma letra no son significativamente diferentes (Tukey-Kramer, $p \leq 0.05$).

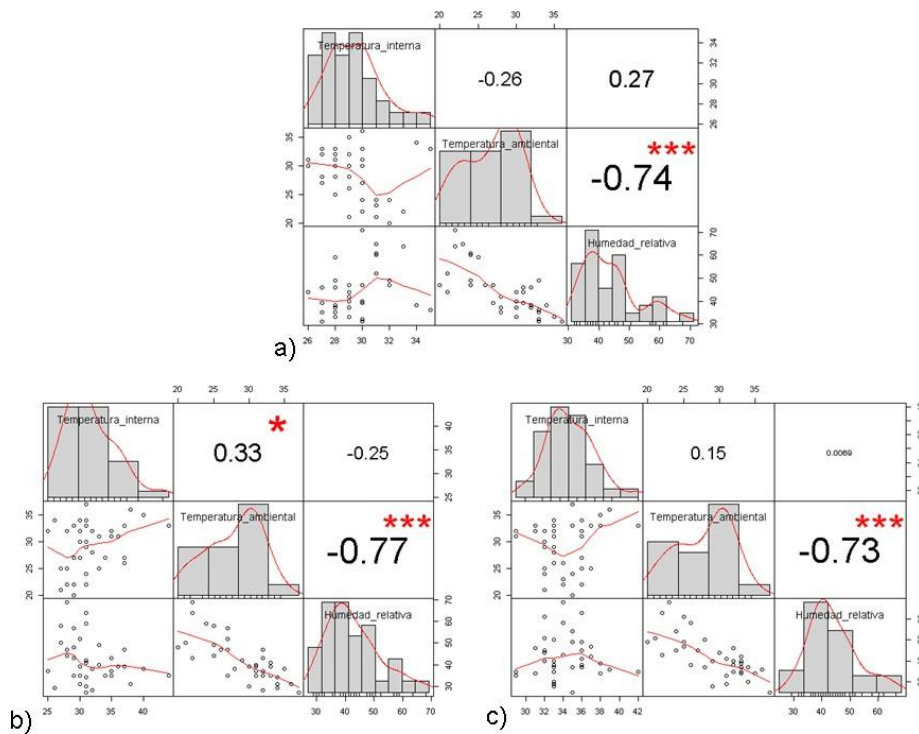


Figura 7. Matrices de correlación (Pearson) de los promedios de temperaturas por tratamiento y parámetros ambientales durante 37 días de monitoreo, a) Residuos Orgánicos Domiciliarios, b) Hojarasca de *Eucalyptus sp.* y c) Mezcla de ambos. Mientras más asteriscos presenten la correlación es más fuerte.

Se observaron relaciones bajas negativas en las temperaturas internas y ambientales para el tratamiento de residuos domiciliarios, así como en el tratamiento con la mezcla. Esto se puede deber a las diferentes características de los diversos residuos orgánicos utilizados y/o al diseño de los módulos de transformación.

El proceso de precompostaje para residuos organodomiciliarios realizado fue de 37 días a diferencia de lo reportado por Oliver *et al.* (2003) y Schuldt (2004, 2007), estos últimos mencionan un rango de duración de 45 a 60 días para ese mismo tipo de residuos.

Determinaciones físicas

Boulter *et al.* (2000) mencionan que las propiedades físicas y químicas de las enmiendas orgánicas se ven afectadas por la temperatura, aireación, contenido de humedad, relación C/N y el pH.

pH

El comportamiento del pH no mostro ser diferente en ninguno de los tres tratamientos en la etapa de materiales frescos ni en la de precomposteo; en las lombricompostas obtenidas hubo diferencias entre el tratamiento 1 y 2; sin embargo el T3 no fue diferente de los otros tratamientos (Tukey-Kramer, $p \leq 0.05$) (Tabla 11).

El valor de pH en todos los tratamientos fue aumentando conforme avanzaba el proceso de transformación de residuos. En las lombricompostas obtenidas se mostraron valores alcalinos en todos los casos (T1: 8.36, T2: 7.89 y T3: 8.13), estos datos son parecidos a los reportados por García *et al.* (2008) quienes trabajaron con residuos municipales y humus activo, ellos reportaron valores de 8.5 y 8.24 en pH, respectivamente. Asimismo Castillo *et al.*, (2000) reportaron el mayor valor de pH para las lombricompostas elaboradas a partir de residuos domiciliarios con respecto a otros tratamientos.

Bollo (2001) menciona que el aumento de pH en lombricompostas con respecto a compostas se debe al carbonato de calcio secretado por las glándulas de Morren que presenta la lombriz. Asimismo, Capistrán *et al.*, (2004) mencionan que en compostas se tiende a pasar de valores ácidos a alcalinos para al final acercarse a valores neutros.

Durán y Henríquez (2007) reportaron valores de pH en 7.8 para lombricompostas de estiércol bovino, lo que relacionaron con la función de las glándulas calcíferas localizadas alrededor del esófago de la lombriz, las cuales secretan carbonato cálcico y producen una digestión alcalina. Asimismo, en el estudio realizado por Garg *et al.* (2005) se reportaron valores entre 8.3 a 9.5 para residuos de cocina; sin embargo los valores durante los 100 días de monitoreo fueron decreciendo a diferencia de lo reportado en este estudio, tal diferencia puede ser debido al tipo de materiales que conforman los residuos de cocina. Pérez *et al.* (2008) reportan un rango de valores de pH para diferentes lombricompostas el cual fluctuó entre 4.7 y 6.6 en los materiales de origen vegetal y animal, respectivamente.

En cuanto al rango óptimo para el cumplimiento de la NOM-FF-109-SEMARNAT-2008 para este parámetro, los tres tratamientos están dentro del límite máximo permisible.

Humedad

El contenido de humedad fue mayor en el T2 con un 53.30 %, seguido del T3 con 50.01 % y por último el T1 con 42.76 %. La humedad fue disminuyendo durante el proceso de transformación para los tratamientos 1 y 3, los cuales presentaron un 78.30 % y 73.13 % inicialmente cada uno. El T2 fue el que presentó un aumento en la humedad, esto se debe al manejo realizado durante el proceso, ya que este tratamiento requirió mayor agua para riego (Tabla 11).

El tratamiento 2 únicamente presentó diferencias estadísticas con los otros dos en cuanto al contenido de humedad de los materiales frescos. En las demás etapas no se volvió a presentar dicha diferencia (Tukey-Kramer, $p \leq 0.05$), esto se pudo deber a un aumento en la cantidad de agua de riego utilizada en el T2 y a la disminución de la humedad en el T1 y T3. El porcentaje de humedad afecta el desarrollo de *Eisenia*, ya que la disponibilidad de humedad perturba directa o indirectamente la actividad de la alimentación e influencia la tasa de desarrollo del clitelo (Hernández *et al.*, 2006). Según Reinecke y Venter (1985: citado en Hernández, 2006) el máximo desarrollo se observa a las tasas más altas de humedad, esto resulta contradictorio con lo obtenido para el tratamiento dos, ya que este presentó mayor

porcentaje de humedad y al mismo tiempo una disminución de las densidades poblacionales inoculadas en la etapa de vermicompostaje. Hernández *et al.* (2006) reportaron que la frecuencia del riego afecta la biomasa individual y la producción de cápsulas de la lombriz roja.

En cuanto al rango sugerido para este parámetro reportado en la NOM-FF-109-SCFI-2008 (SAGARPA, 2007) los tres tratamientos exceden el máximo deseado.

Conductividad Eléctrica (CE)

La CE presente en los materiales iniciales y en precomposteo fue diferente entre el T2 y los demás tratamientos (T1 0.84 ± 0.16 , T3 0.63 ± 0.02 dS m⁻¹), el T2 presentó el valor más bajo (0.11 ± 0.02 dS m⁻¹). En el caso de las lombricompostas el tratamiento 2 también fue diferente de los otros dos (0.11 ± 0.02 dS m⁻¹), el T1 (8.36 ± 0.28 dS m⁻¹) y T3 (0.61 ± 0.05 dS m⁻¹) no tuvieron diferencias (Tabla 11, Tukey-Kramer, $p \leq 0.05$).

Para Lazcano *et al.* (2008) la CE refleja la salinidad presente en los materiales, además de ser un buen indicador de la pertinencia y seguridad de las enmiendas orgánicas para su uso agrícola. Los resultados de CE de la lombricomposta de los tratamientos se encuentran dentro de los valores reportados por la norma NMX-FF-109-SCFI-2008 para CE (≤ 4 dS m⁻¹) y los reportados por otros autores (Soumaré *et al.*, 2002). Garg *et al.* (2005) reportan un incremento gradual de la CE en el proceso de lombricompostaje para todos los sustratos que evaluaron, esto concuerda con lo reportado para los tratamientos T2 y T3 (Tabla 11), pero no así para el tratamiento 1, esto puede deberse al tipo de iones y minerales de libre disposición que se generan durante la ingestión y excreción por parte de las lombrices.

Pérez *et al.* (2008) evaluaron lombricompostas de pulpa de café, estiércol y residuos agrícolas, el rango de valores de CE de las diferentes lombricompostas que reportaron fluctuó entre 0.18 y 3.34 dS m⁻¹. Ellos reportan que la CE del compost disminuyó con el efecto del vermicompostaje. Cáceres *et al.*, (2006) reportaron

valores altos (4.7 dS m^{-1}) al final del proceso de compostaje de la fracción sólida de estiércol bovino, atribuyéndolo a la suplementación que recibieron los animales, la cual contenía sales minerales. Hernández *et al.* (2006) reportan valores de CE mayores a los presentados en este trabajo (3.13 dS m^{-1}) en el estiércol de bovino compostado a diferentes niveles de humedad. Sin embargo, Galindo *et al.* (2014) mencionan que el descenso en la CE se debe al lavado de nutrientes (lixiviado) debido a un exceso de humedad. Rotondo *et al.* (2009) reportaron valores de CE de 0.42 dS m^{-1} en un estudio realizado en vermicomposta elaborada con una mezcla residuos de casa y composta de equino.

Varios autores (Villar *et al.*, 1993; Garg *et al.*, 2005) también han informado de un fuerte aumento debido a la liberación de sales solubles como el amonio y el fosfato después de la degradación de los compuestos más lábiles en la etapa termofílica del compostaje. Durante el vermicompostaje, la menor producción de metabolitos solubles como el amonio (NH_4), así como la precipitación de las sales disueltas, pueden llevar a valores de CE más bajos (Mitchell, 1997; Garg *et al.*, 2005) lo que tal vez le haya sucedido al tratamiento dos.

Tabla 11. Valores obtenidos para los parámetros físicos y la diferencia de medias en las diferentes etapas del proceso para cada tratamiento.

Residuos Orgánicos Domiciliarios			
Variabes	Material fresco	Precomposteo	Lombricomposta
pH	5.23 ± 0.64 a	7.57 ± 0.64 a	8.36 ± 0.28 a
HUMEDAD (%)	78.30 ± 4.69 a	63 ± 5.27 a	42.76 ± 3.76 a
CE (dS/m)	0.84 ± 0.16 a	0.70 ± 0.12 a	0.66 ± 0.048 a
Hojarasca de <i>Eucalyptus sp.</i>			
	Material fresco	Precomposteo	Lombricomposta
pH	4.98 ± 0.37 a	7.52 ± 0.15 a	7.89 ± 0.13 b
HUMEDAD (%)	12.73 ± 3.33 b	68.43 ± 3.46 a	53.30 ± 6.64 a
CE (dS/m)	0.11 ± 0.02 c	0.04 ± 0.009 c	0.11 ± 0.023 b
R.O.D. y Hojarasca de <i>Eucalyptus sp.</i>			
	Material fresco	Precomposteo	Lombricomposta
pH	5.49 ± 0.96 a	7.40 ± 1.11 a	8.13 ± 0.34 ab
HUMEDAD (%)	73.13 ± 4.21 a	62.2 ± 24.52 a	50.01 ± 12.13 a
CE (dS/m)	0.63 ± 0.02 b	0.39 ± 0.13 b	0.61 ± 0.05 a

Nota: Letras iguales no presentan diferencias estadísticas. (Tukey-Kramer, $p \leq 0.05$).

Determinaciones químicas

Materia orgánica (MO)

Durante el proceso de transformación de residuos los tratamientos no mostraron diferencias significativas en ninguna de las tres etapas consideradas en la transformación de los residuos orgánicos (Tukey-Kramer, $p \leq 0.05$) (Tabla 12).

La lombricomposta que presentó mayor contenido de materia orgánica fue la obtenida del T3 con 53.45 %, seguido del T1 con 43.34 % y por último el T2 con 42.30 %. El contenido inicial de materia orgánica en todos los tratamientos fue mayor al 80 % (Tabla 12), durante el proceso de transformación de los residuos orgánicos el contenido de MO fue decreciendo. A pesar de ser el T2 el que presentaba un mayor porcentaje de MO en el inicio del experimento fue el que presentó el valor más bajo en la lombricomposta obtenida. Haug (1993) menciona que existe un decremento de la MO en un 23 % para compostas de estiércol bovino, Vivencio-De la Rosa (2003) encuentra una reducción del 17.2 % y 18 % en materiales con la misma constitución.

Pérez *et al.* (2008) reportaron los mayores porcentajes en MO (61.95 %) en las lombricompostas derivadas de fuentes animales en relación a las provenientes de vegetales. Castillo *et al.* (2000) también reportan que los mayores contenidos de MO se encuentran en lombricompostas a base de estiércol, mientras que las elaboradas a base de residuos de cocina están 29.5% por debajo. Es probable que dentro de la constitución de los ROD se encontrara una mayor cantidad de elementos de origen animal.

En cuanto al parámetro reportado para este parámetro en la NOM-FF-109-SEMARNAT-2008 (SAGARPA, 2007) los tratamientos T1 y T2 están en el rango deseado. El T3 excede el valor rango reportado en dicha norma; sin embargo, valores altos de MO son benéficos para suelos con deficiencias de la misma.

El incremento en dicho estudio fue de 4.4 a 5.8 veces al final del lombricompostaje para las diferentes mezclas, ellos lo explican por el proceso de mineralización de la materia orgánica: de todos los sustratos evaluados los de origen domiciliario fueron

los que menor aumento presentaron, en este trabajo los tratamientos sin mezclas presentaron los menores valores.

Kaushik y Garg (2004) observaron un incremento de N de 2 a 3.2 veces para la mezcla de residuos de actividades textiles y agrícolas. En el estudio de Lazcano *et al.* (2008) el contenido total de N fue mayor después del vermicompostaje y en el tratamiento combinado (compostaje y lombricompostaje) después de la fase activa del compostaje. Este incremento se ha explicado anteriormente como N en forma de mucus, excreciones nitrogenadas, hormonas estimuladoras del crecimiento y enzimas por parte de las lombrices (Tripathi y Bhardwaj, 2004) utilizadas. Pérez *et al.* (2008) reportan en los residuos animales comparados a los derivados de fuentes vegetales mayores contenidos de N (1.94%). Aunque de manera general se sabe que el contenido de N final depende del contenido de N inicial, de los materiales orgánicos a transformar y del tiempo que tardan en descomponerse (Gaur y Sinhg, 1995). Es importante considerar la posibilidad de que al mismo tiempo se esté perdiendo N en forma de amoníaco debido a los altos valores de pH reportados (Hartenstein y Hartenstein, 1981) para los tratamientos uno y dos.

Para conservar una actividad óptima con respecto a los microorganismos fijadores de nitrógeno es conveniente la cosecha de la lombricomposta a los 75 días después de la inoculación de las lombrices ya que la actividad de la proteasa disminuye fuertemente conforme las compostas y lombricompostas tienen mayor tiempo (Quintero, 2014).

En cuanto al intervalo establecido para este parámetro en la NOM-FF-109-SEMARNAT-2007 (SAGARPA, 2007) los tres tratamientos están dentro del rango de aceptación.

Potasio

El comportamiento del K para el T1 y el T2 presenta una disminución en la etapa de precomposteo y un incremento en la lombricomposta final (Tabla 12). Por el contrario para el T3 se presenta una disminución en la lombricomposta obtenida con respecto al valor reportado en precomposteo.

En el presente trabajo se observa un incremento del contenido de K en los materiales finales con respecto al material inicial. El tratamiento que presentó el mayor contenido de K fue el T1, seguido del T2 y muy por debajo el T3 (0.91 %, 0.90 % y 0.30 %, respectivamente). Estos resultados concuerdan con lo reportado por Castillo *et al.* (2000) pues reportaron el mayor contenido de K para las lombricompostas elaboradas de residuos domiciliarios.

Garg *et al.* (2005) reportan un aumento en las concentraciones de K para todos los tratamientos una vez que se inocularon las lombrices con respecto a los que no tenían lombrices. Estos autores refieren que el aumento en las concentraciones de K en las lombricompostas evaluadas se debe a la actividad de la microflora y a las enzimas digestivas de las lombrices.

Fósforo

En el presente trabajo el tratamiento con el mayor contenido de P en el material final fue el T1 con un 0.61 % (como pasó con el contenido de K), seguido del T3 con 0.48 % y por último el T2 con un 0.21 %. El tratamiento 3 presentó un aumento de P durante todo el proceso de transformación de residuos, el tratamiento 1 y 2 mostraron una disminución en la etapa posterior al precomposteo (Tabla 12). Garg *et al.* (2005) reportan un aumento de 1.4 a 6.5 veces en las concentraciones de P para todos los tratamientos una vez que se inocularon las lombrices, este aumento tomando en cuenta los valores de los tratamientos sin lombrices. Este incremento puede ser debido a la mineralización y movilización del P como resultado de la actividad bacteriana y la actividad de la fosfatasa fecal presente en las lombrices (Garg *et al.*, 2005).

El aumento de estos contenidos puede deberse al aumento de la actividad enzimática de la fosfatasa acida y alcalina, siendo esta última la de mayor actividad cuando se inoculan lombrices a materiales en descomposición (Quintero, 2014).

Carbono

En el presente trabajo el tratamiento con el mayor contenido de C en el material final fue el T3 con un 30.94 ± 3.70 %, seguido del T1 con 25.83 ± 6.01 % y por último el T2 con un 24.50 ± 3.83 %. Los tres tratamientos se encuentran dentro del rango establecido por la NMX-19-FF-SCFI-2008.

En el estudio de Lazcano *et al.* (2008), el C total se redujo significativamente en el tratamiento combinado, mientras que se mantuvo alto después de la fase activa de compostaje (Altas temperaturas). Asimismo, Garg *et al.* (2005) reportan una disminución del C orgánico a través del tiempo en los diferentes materiales transformados, la mayor reducción se presentó en los residuos de tipo agroindustrial y en los resultantes de los domicilios (3 y 2.2 veces, respectivamente), dichos resultados coinciden con lo obtenido en este estudio (Tabla 11) para el T1 en cuanto a la reducción del contenido en el material final; sin embargo, en el T2 y el T3 se presentó un aumento en la etapa posterior al precomposteo para su posterior decaimiento. El comportamiento del C orgánico se puede ver influenciado por la liberación de CO₂ como se observó en otro trabajo para diferentes materiales (Garg *et al.*, 2005).

Complementariamente, la disminución de los contenidos de carbono una vez que se inoculan lombrices composteras se puede presentar debido al decaimiento de la actividad enzimática de la amilasa, celulasa, lipasa e invertasa (Quintero, 2014) presentes en la lombriz.

Según Díaz *et al.*, 2004 y Michel *et al.*, 2004, en general, entre el inicio y el final del compostaje se produce un aumento de las concentraciones de los distintos nutrientes, debido a la pérdida de materia orgánica de la masa a compostar; sin embargo, deben existir sus excepciones o algún efecto por inocular lombrices.

Relación C/N

El comportamiento de la relación C/N para todos los tratamientos fue similar, la relación aumentó en la etapa de precomposteo en relación a los materiales frescos para posteriormente decaer en el material final (Tabla 11). La relación C/N indica el grado de descomposición de un residuo, ya que el carbono se pierde como CO₂ durante la biooxidación, mientras que el N se pierde a una tasa menor, y por lo tanto, cuanto más descompuesto es un residuo, menor es la relación C/N (Lazcano *et al.*, 2008). La proporción de C/N reportada en el trabajo anteriormente mencionado fue significativamente más baja en los tratamientos con vermicompostaje, lo que indica que se sometieron a una descomposición más intensa.

El T2 en un inicio presentó una relación C/N de 59.43, este es un valor bastante elevado y según algunos autores, valores elevados en esta relación aumentan el tiempo de fermentación y evacuación de CO₂ a la atmósfera. Dicho tratamiento fue el de menor proporción de transformación de los residuos orgánicos.

En cuanto al rango para este parámetro establecido en la NOM-FF-109-SEMARNAT-2007 (SAGARPA, 2007) los tres tratamientos están dentro del límite máximo deseado pues presentan valores de 11, 18.22 y 15.65 %, para los tratamientos 1, 2 y 3, respectivamente.

Metales pesados y otros metales

Plomo

La dinámica del contenido total del plomo durante el proceso de transformación de residuos orgánicos fue decreciendo para el T3, por el contrario el T1 y el T2 mostraron un aumento en la etapa posterior al precomposteo para decaer en el producto terminado (Figura 8). El contenido de plomo fue menor con respecto a los materiales frescos para el T1 y el T3, el T2 presentó un mayor contenido con respecto a los materiales iniciales.

El contenido de plomo en la lombricomposta de los tres tratamientos fue menor a 100 ppm (T1 23.5, T2 24.5, T3 19 ppm) valor máximo reportado en la NMX-FF-109-

SCFI-2008, estos resultados concuerdan con lo reportado por García *et al.* (2008); sin embargo, reporta un valor de 0.13 ppm para las compostas con residuos municipales, valor bastante debajo de lo encontrado en los tratamientos.

Tabla 12. Valores obtenidos para los parámetros químicos en las diferentes etapas del proceso de transformación de residuos orgánicos domiciliarios a través de lombricompostaje.

Residuos Orgánicos Domiciliarios			
Variable	Material fresco	Precomposteo	Lombricomposta
Nt (%)	2.94 ± 0.95 a	18.38 ± 4.84 b	2.21 ± 0.65 a
K (%)	1.03 ± 0.40 a	1.32 ± 0.19 a	0.90 ± 0.15 a
P (%)	0.40 ± 0.08 a	0.06 ± 0.02 b	0.60 ± 0.17 a
C (%)	50.48 ± 4.17 a	45.16 ± 2.88 a	25.83 ± 6.01 a
C/N	18.38 ± 4.84 b	20.28 ± 3.70 a	11.92 ± 1.26 b
MO (%)	87.06 ± 7.19 a	77.9 ± 4.94 a	44.43 ± 10.49 a
Hojarasca de <i>Eucalyptus</i> sp.			
	Material fresco	Precomposteo	Lombricomposta
Nt (%)	0.91 ± 0.19 b	59.43 ± 13.83 a	1.37 ± 0.33 a
K (%)	0.20 ± 0.04 b	0.33 ± 0.24 b	0.29 ± 0.097 b
P (%)	0.01 ± 0.00 c	0.52 ± 8.17 a	0.22 ± 0.06 b
C (%)	52.11 ± 0.31 a	47.46 ± 1.07 a	24.50 ± 3.83 a
C/N	59.43 ± 13.83 a	30.32 ± 8.07 b	18.21 ± 1.77 a
MO (%)	89.86 ± 0.55 a	81.86 ± 1.84 a	42.30 ± 6.56 a
R.O.D. y Hojarasca de <i>Eucalyptus</i> sp.			
	Material fresco	Precomposteo	Lombricomposta
Nt (%)	2.05 ± 0.50 a	26.17 ± 6.92 b	2.12 ± 0.79 a
K (%)	1.04 ± 0.029 a	0.68 ± 0.57 b	0.89 ± 0.08 a
P (%)	0.28 ± 0.01 b	0.03 ± 0.01 b	0.47 ± 0.008 a
C (%)	50.90 ± 1.94 a	47.33 ± 1.37 a	30.94 ± 3.70 a
C/N	26.17 ± 6.92 b	18.35 ± 3.50 b	15.65 ± 3.46 a
MO (%)	87.78 ± 3.36 a	81.65 ± 2.36 a	53.45 ± 6.30 a

(Tukey-Kramer, $p \leq 0.05$)

Varios trabajos han evaluado el contenido de plomo de diversas compostas a base de diversos y diferentes materiales orgánicos han reportado valores contenidos en 100 – 700 ppm (Martensson *et al.*, 1999; Greenway y Song, 2002; Sadi *et al.*, 2002; Iwegbue *et al.*, 2006; Madrid *et al.*, 2007; Rosal *et al.*, 2007). Por otro lado, se han

reportado valores menores a los 100 ppm (Whittle y Dyson, 2002; Lima *et al.*, 2004). Estas diferencias pueden deberse a los diferentes materiales con los que se elaboraron las enmiendas orgánicas (Greenway y Song, 2002; García *et al.*, 2008).

Cadmio

La dinámica del cadmio fue similar para el T2 y el T3, ya que el contenido se mantuvo en la etapa inicial y en la posterior al precomposteo, en el producto terminado se registró un mayor contenido con respecto al reportado en los materiales frescos. Para el T1 el contenido en el material final es menor con respecto al encontrado en los materiales antes del vertido en cama, se presentó una disminución en la etapa de precomposteo y un aumento en la lombricomposta (Figura 8).

Todas las lombricompostas obtenidas de los diferentes tratamientos están dentro del valor de aceptación de la NMX-FF-109-SCFI-2008, el valor final reportado para las lombricompostas es de 1 ppm en Cd.

Morgan y Morgan (1990, 1991) reportaron una remoción del cadmio hasta del 60 % una vez que se adicionan lombrices a los procesos de transformación de los materiales orgánicos, esto debido a la fijación en el tejido de la lombriz (*L. rubellus*). Esto es lo que pudo haber sucedido en el T1. Otro estudio reporta la disminución del Cd utilizando a *E. fétida* como agente biológico en el tratamiento de lodos residuales con metales pesados (Delgado *et al.*, 2004). Shahmansouri (2005) y Sánchez (2009) reportan una remoción del Cd por fijación en el tejido de la lombriz.

Los resultados reportados en este trabajo concuerdan con lo mencionado por diversos autores que trabajaron con compostas (Greenway y Song, 2002; Sadi *et al.*, 2002, Whittle y Dyson, 2002). Otros autores encontraron valores mayores a 2 ppm hasta los 10 ppm (Martensson *et al.*, 1999; Iwegbue *et al.*, 2006; Rosal *et al.*, 2007). Estas diferencias se atribuyen a la diversidad de materiales orgánicos utilizados para las enmiendas orgánicas como lo mencionan García *et al.* (2008) y otros autores (Greenway y Song, 2002). El trabajo de García *et al.* (2008) encontró

presencia de cadmio únicamente en las compostas elaboradas a partir de residuos municipales.

Cromo

El cromo que se reportó en las lombricompostas de los tres tratamientos fue mayor al que se determinó en los materiales frescos (Figura 8). Los tres tratamientos se encuentran dentro del valor de aceptación mencionado en la NMX-FF-109-SCFI-2008 (T1: 13, T2: 10, T3: 13 ppm).

En cuanto a la dinámica del Cr, el T3 fue el único tratamiento que presentó un aumento en la etapa posterior al precomposteo y la subsecuente disminución en el producto terminado. Para los otros dos tratamientos, el Cr disminuyó en la etapa después del precomposteo y aumento en el material final.

Cobre

En el presente trabajo la dinámica del cobre es diferente para cada tratamiento, en el T1 el contenido en materiales frescos es mayor que en las dos etapas posteriores, en las cuales se mantuvo el valor del contenido de cobre en 10 ppm (Figura 8). Para el tratamiento 2 se registró un aumento en la etapa posterior al precomposteo y un descenso en el producto terminado. El T3 registró un incremento conforme transcurría el tiempo del proceso. El contenido de cobre fue mayor en el producto terminado en comparación del obtenido en los materiales frescos para el T3 (11.5 ppm y 9 ppm, respectivamente), los T1 (16.5 ppm y 10 ppm, respectivamente) y T2 (7.5 ppm y 7 ppm, respectivamente) presentaron un menor contenido en la lombricomposta en relaciones a los materiales iniciales. En este sentido Shahmansouri (2005) y Sánchez (2009) reportaron una remoción del Cu en todos sus tratamientos (lodos residuales con y sin adición de metales) al introducir a individuos de *E. fétida*, sin embargo, la remoción se realizó en mayor medida en el sustrato (posible formación de quelatos por los altos contenidos de MO) que en el tejido de la lombriz, este fenómeno pudo presentarse en el T1 y T2.

Los contenidos finales de los tres tratamientos con respecto al cobre se encuentran debajo de las 15 ppm, este resultado concuerda con lo reportado por Cruz-Ramales *et al.* (2010) quienes trabajaron con la mezcla de diversas proporciones de biosólidos y cascara de naranja, sin embargo, los resultados que presentan son mayores que el contenido reportado para este trabajo.

El trabajo de García *et al.* (2008) también evaluó el contenido de metales en compostas elaboradas a partir de Residuos Sólidos Municipales (debido al alto contenido de metales y las posibilidades de producir fitotoxicidad en las plantas) y una composta comercial, ellos reportan valores menores a 1 ppm al igual que Martensson *et al.* (1999), valor muy por debajo de lo que se reportó aquí. Diversos autores reportan valores desde 1 – 100 ppm en compostas fabricadas a partir de diversos materiales orgánicos (Greenway y Song, 2002; Sadi *et al.*, 2002; Whittle y Dyson, 2002; Lima *et al.*, 2004; Madrid *et al.*, 2007; Rosal *et al.*, 2007). Por otro lado, existe un trabajo que reporta 288 ppm de Cu en compostas (Iwegbue *et al.*, 2006).

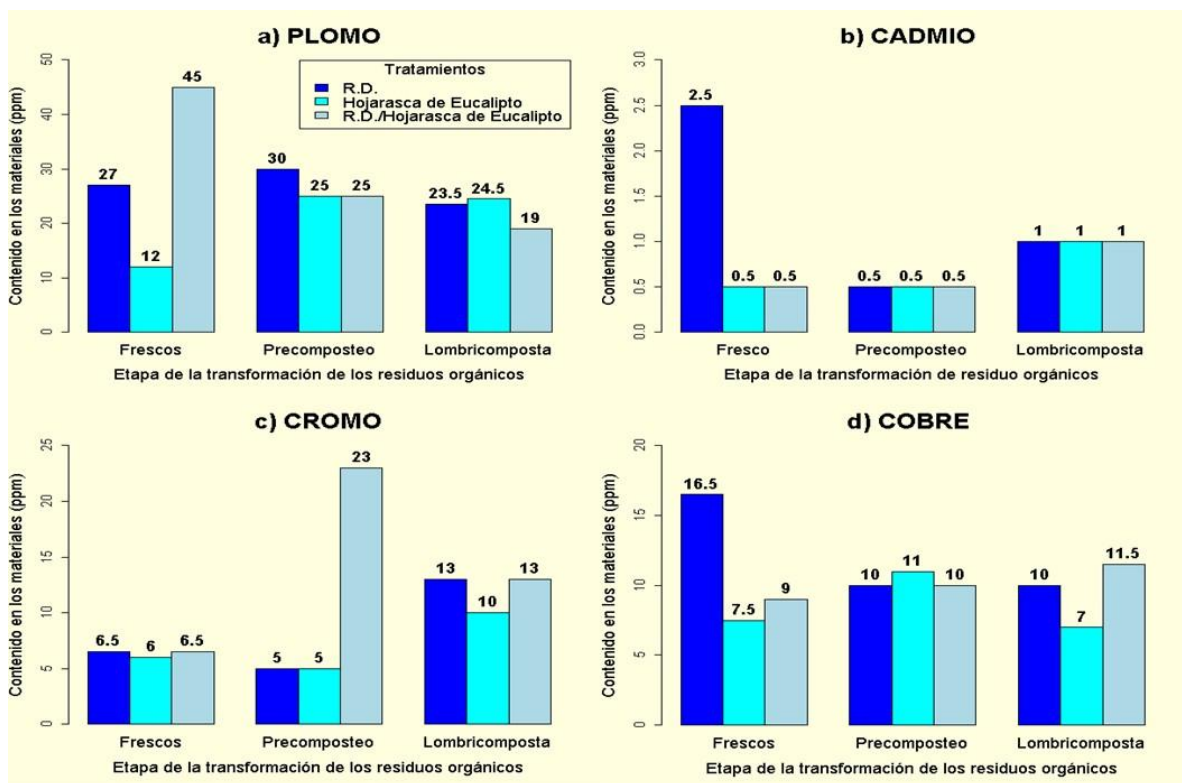


Figura 8. Concentraciones de metales pesados durante las tres etapas evaluadas: materiales frescos, precomposteo y lombricomposta, a) contenido de plomo, b) contenido de cadmio, c) contenido de cromo, d) contenido de cobre.

Níquel

La dinámica de Ni en los tres tratamientos fue diferente, para el T1 se presentó un descenso en la etapa posterior al precomposteo y su posterior aumento en el producto terminado. El T2 aumentó su contenido en la etapa posterior al precomposteo y disminuyó en el material final. Por último el T3 fue aumentando conforme el proceso de transformación seguía adelante (Figura 9).

Los contenidos de Ni en las lombricompostas obtenidas de los diferentes tratamientos fue mayor en el T1 (38.5 ppm y 80 ppm, respectivamente) y T3 (8.5 ppm y 35 ppm, respectivamente) con respecto a lo reportado en los materiales orgánicos sin transformar. La lombricomposta del T2 (27.5 ppm y 15 ppm, respectivamente) fue menor en comparación a los materiales iniciales antes del vertido en cama.

Sánchez (2009) reporta que el Ni es el metal con mayor tasa de remoción (87 – 100 %) en lodos residuales utilizando como agente biológico organismos de la especie *E. fetida*. Shahmansouri (2005) también reporta remoción de este elemento después de inocular lombrices. Sin embargo, esta remoción se explica por la formación de quelatos en la MO, por la acción del pH, ya que el Ni es de los elementos que presentan menor fijación en el tejido de la lombriz al igual que el Cu.

El T1 presenta valores de Ni superiores a lo establecido en la NMX-FF-109-SCFI-2008 así como para la Norma Canadiense y la Norma Europea. El T3 también presenta valores superiores en comparación a la norma canadiense y de la unión europea pero no así para la NMX-FF-109.SCFI-2008.

Zinc

El contenido de Zn en las lombricompostas obtenidas del T1 y T3 presentaron un mayor contenido con respecto a los materiales iniciales (T1: de 71.5 a 85, T3: de 54.5 a 75 ppm), mientras tanto el T2 tuvo menor contenido con respecto al

encontrado en la hojarasca de eucalipto (de 53 a 50 ppm). Estos valores se encuentran debajo del límite permisible normado en la NMX-FF-109-SCFI-2008, en la norma canadiense y la de la unión europea.

Con respecto a la dinámica del Zn, fue diferente para el T2, pues descendió después del precomposteo y aumentó en el producto terminado. Para el T1 y el T3 dicho contenido fue incrementando durante el proceso (Figura 9).

Contrariamente a lo reportado en este trabajo para el T1 y T2 Morgan y Morgan (1990, 1991) reportaron una remoción del Zn hasta del 40 % una vez que se adicionan lombrices a los procesos de transformación de los materiales orgánicos, esto debido a la fijación en el tejido de la lombriz (*L. rubellus*). Otro estudio reporta la disminución del Zn utilizando a *E. fétida* como agente biológico en el tratamiento de lodos residuales con metales pesados (Delgado *et al.*, 2004). Asimismo existen trabajos que han encontrado bioacumulación del Zn en el tejido de la lombriz (*E. fétida*) y la consecuente remoción del mismo (Bécquer *et al.*, 2004; Del Águila *et al.*, 2007; Shahmansouri, 2005; Sánchez, 2009).

Sánchez (2009) menciona que el contenido de Zn en el material final está relacionado al contenido presente en el material fresco.

Aluminio

El comportamiento del Al para el T1 presentó una disminución después del precomposteo y un gran aumento en el producto terminado. Para los tratamientos restantes el contenido de Al fue aumentando durante el proceso de transformación de residuos (Figura 9).

En las lombricompostas obtenidas a partir de los diferentes tratamientos el contenido de Al final fue mayor que en los materiales frescos. El mayor aumento lo presentó el T3 con 12 veces el contenido inicial (de 317.5 a 3810 ppm), el T1 presentó un aumento de 5.2 veces en el material final (861.5 a 5010 ppm), por último el T2 aumentó 4.2 veces. La presencia de este elemento se puede deber a que en ocasiones los residuos traen agentes extraños como plásticos, vidrios, aluminio, debido a los contenedores utilizados. Para el caso del T2 que fue

obtenido de un

parque estatal, es probable que también haya contenido piezas de aluminio ya que aún existe el mal comportamiento de tirar basura en parques y jardines cuando se visitan.

Manganeso

El manganeso presente en los materiales frescos es mayor que el reportado para la etapa de lombricomposta en el T2 (522.5 y 300 ppm, respectivamente). Para los tratamientos T3 y T1 el comportamiento de este elemento fue incrementar durante el proceso de transformación de los residuos (T1: de 50.5 a 130, T2: de 88.5 a 235 ppm). Esta dinámica puede observarse en la Figura 9.

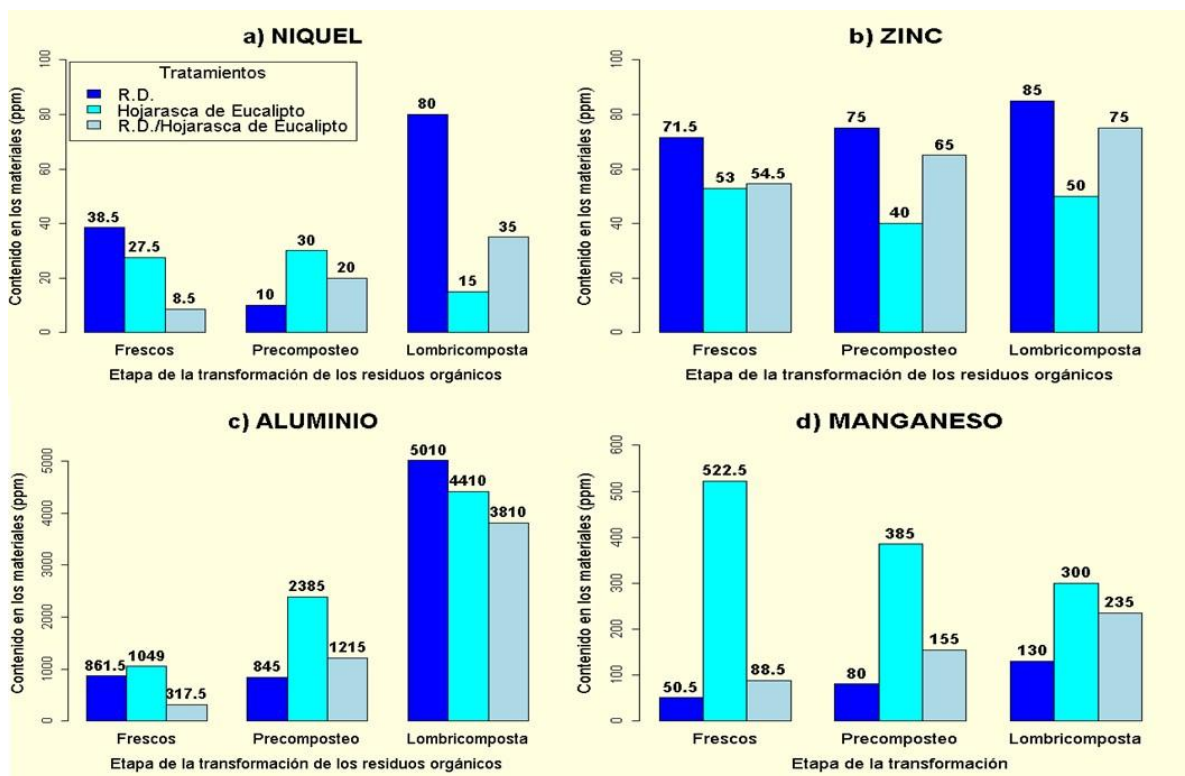


Figura 9. Concentraciones de metales pesados durante las tres etapas evaluadas: materiales frescos, precomposteo y lombricomposta, a) contenido de plomo, b) contenido de cadmio, c) contenido de cromo, d) contenido de cobre.

En cuanto a los límites máximos permisibles para metales pesados, los tres tratamientos cumplen con los rangos deseados para su buen manejo si consideramos la NOM-109-FF-SCFI-2008, la norma canadiense y la norma europea (Soto y Muñoz, 2002). Únicamente el T1 excedió los máximos permisibles para el Níquel tomando en cuenta las tres normas, el T3 también sobrepasó los valores presentes en la norma mexicana y la de la Unión Europea para el mismo elemento (Figura 10).

Para el caso del aluminio los valores resultan ser bastante elevados en las lombricompostas de los tres tratamientos, esto podría llevar a problemas de fitotoxicidad; sin embargo, el planteamiento debe ser evaluado.

La variación del contenido de metales pesados mencionada entre los tratamientos y las fuentes bibliográficas se puede deber a la gran variedad de materiales orgánicos (Greenway y Song, 2002) con los que fueron elaboradas las enmiendas, es decir, la variabilidad puede deberse a los contenidos iniciales de los diferentes metales en los diferentes materiales antes de ser composteados (García *et al.*, 2008). Además, como bien lo mencionan Iwegbue *et al.* (2007) las fases de asociación y de solubilidad de los diferentes metales cambia durante el proceso de composteo-lombricomposteo, de tal forma que se van alterando las formas de disponibilidad de los mismos.

La variación de los contenidos en metales pesados también puede ser explicada por la formación de quelatos y por la fijación de los mismos en el tejido de la lombriz. El primero dependerá de factores como el contenido de MO, los agentes quelantes, pH (Sánchez, 2009); mientras que el segundo se verá influenciado por la MO (Suthar *et al.*, 2008), el número de individuos (mientras más individuos menor eficiencia de remoción) y de la capacidad de la especie para fijar metales en sus tejidos (Hartenstein *et al.*, 1980; Sánchez, 2009; Suthar *et al.*, 2008).

La asociación los metales pesados y las enmiendas orgánicas incluye otros aspectos a considerar, tales como, la hidrosolubilidad, el intercambio iónico, la precipitación, la co-precipitación de óxidos metálicos y adsorción por ligandos orgánicos (Iwegbue *et al.* 2006; Iwegbue *et al.*, 2007).

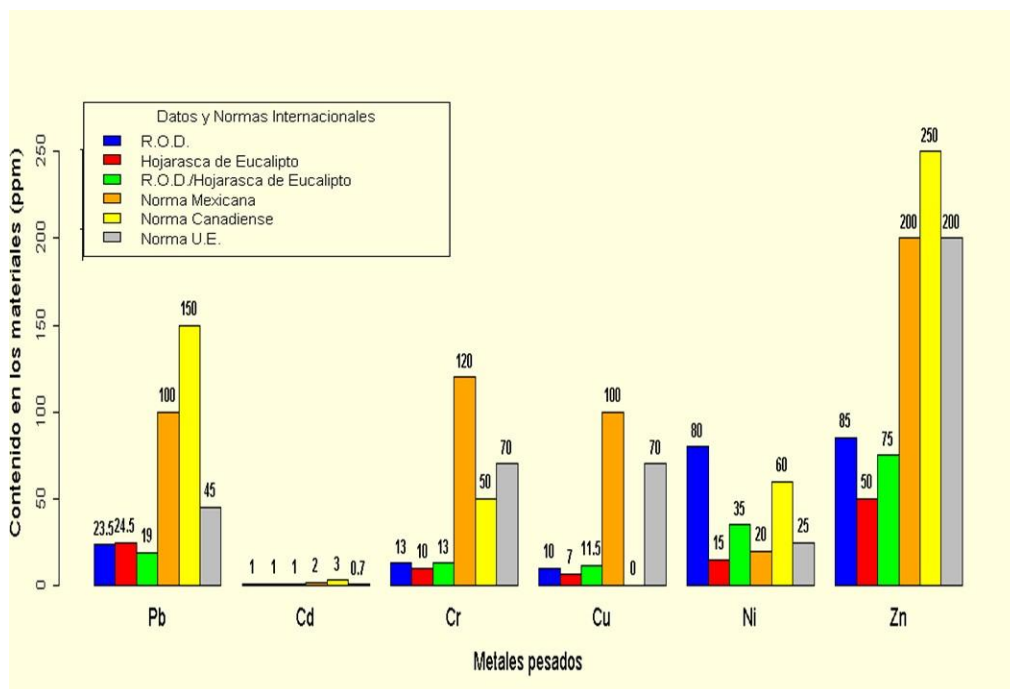


Figura 10. Contenido de metales en las lombricompostas obtenidas por tratamiento en comparación a los valores máximos permisibles según la norma mexicana, canadiense y de la unión europea.

Madrid *et al.*, (2007) mostraron que después de años de aplicación de enmiendas orgánicas con altos contenidos de metales pesados a un mismo sitio, no se han rebasado los máximos permisibles. Esto no exime la posibilidad de que, en algún punto se puedan causar problemáticas ambientales asociadas al uso excesivo de enmiendas con dichas características, por ejemplo, la inserción de los metales pesados a las cadenas alimenticias de diversos organismos (Iwegbue *et al.* 2006; Iwegbue *et al.*, 2007), y en los procesos de bioacumulación en diferentes niveles de las cadenas tróficas (Sánchez, 2009).

Determinaciones biológicas

En el estudio realizado por Pérez *et al.* (2008) se caracterizaron los insumos agrícolas más usados en República Dominicana para agricultura orgánica: composta y lombricomposta. Ellos reportaron en las muestras analizadas tres grupos microbianos que presentaban poca variación, además de la baja presencia

de hongos: actinomicetos y levaduras, estos de acuerdo a la procedencia de los tipos de enmiendas. Encontraron poblaciones superiores de microorganismos en lombricompostas. Los resultados antes mencionados concuerdan con los obtenidos; sin embargo, en este estudio se encontró alta presencia de hongos.

Como bien lo mencionan Lazcano *et al.* (2008) el manejo de los Residuos Orgánicos Domiciliarios aún no está completamente adaptado a escala industrial, y la reducción de los patógenos es el principal inconveniente. Las poblaciones de microorganismos involucrados en el proceso de descomposición de residuos son favorecidas por condiciones como: presencia o ausencia de oxígeno, temperatura, agua, nutrientes, pH, fuentes energéticas de fácil solubilización, superficie de contacto o tamaño de partícula (Soto, 2003).

Conteos bacterianos

Durante las etapas de materiales frescos y precomposteo se realizó un registro fotográfico (Figura 16) de observaciones (sin diferenciar tratamientos) de láminas con tinciones de Gram, el objetivo era conocer el porcentaje de muestras que correspondieron a bacterias de tipo Gram Negativas y Gram positivas. En los materiales frescos el 82.1 % de las observaciones correspondieron a Gram positivas, el resto fueron Gram Negativas. En la etapa posterior al precomposteo el 81.7 % fueron Gram positivas y el 18.3 % fueron Gram negativas. Esto permite tener una idea bastante generalizada de los tipos de bacterias que se presentan en el proceso de transformación de residuos.

En este estudio no se encontraron diferencias significativas para los conteos bacterianos en ninguno de los tratamientos en el medio M8 ($H = 4.3556$, $df = 2$, $p = 0.1133$), M9 ($H = 2.084$, $df = 2$, $p = 0.3527$), LB ($H = 3.1148$, $df = 2$, $p = 0.2107$) y PDA ($H = 5.6$, $df = 2$, $p = 0.06081$). Sin embargo, se reportan las mayores densidades poblacionales en los medios LB y PDA (10^7 y 10^8 UFC/ g en cada tratamiento), esto concuerda con la disponibilidad de nutrientes. En los medios M8 y M9 (10^6 en cada tratamiento) las densidades fueron menores. El que se encuentren altas densidades en el medio LB sugiere que probablemente entre las

bacterias que pueden crecer ahí esté *E. coli*. La presencia de organismos en el medio M8 da una idea de las densidades poblacionales de organismos fijadores de nitrógeno ambiental en cada tratamiento.

La ausencia de diferencia estadística entre tratamientos podría estar asociada a las bajas temperaturas en las camas, al tamaño de partícula de los materiales orgánicos utilizados y contenido de azúcares que excreta la lombriz (Pérez *et al.*, 2008). Identificaciones y conteos fúngicos.

En el medio de cultivo PDA se aislaron algunos hongos presentes en los tres tratamientos. Se lograron identificar cuatro Géneros en total, de los cuales el que está mayormente representado es *Aspergillus* con tres posibles especies, el taxón *Trichoderma* presentó dos posibles especies, y con una posible especie los géneros *Penicillium*, *Rizhopus* y *Fusarium* (Figura 11 y 12). Entre los tratamientos hubo diferencia en cuanto al número de especies que se desarrollaron en los medios: el T3 mostró siete posibles especies, el T2 cinco y el T1 cuatro. De alguna manera la mezcla parece favorecer el desarrollo de un mayor número de especies de hongos (Tabla 13).

Las densidades poblacionales de los posibles Géneros identificados estuvieron dentro del rango que comprende 5×10^5 a 5×10^7 UFC/g. No hubo diferencias entre tratamientos para las UFC/g de los posibles Géneros compartidos: *Fusarium*, *Trichoderma* y *Aspergillus* ($H = 4.4127$, $df = 2$, $p = 0.1101$). Asimismo, *Fusarium* y *Penicillium* se encuentran en la misma densidad poblacional (de 10^6 a 10^7 UFC/g).

La presencia de diversos grupos de organismos en los diferentes tratamientos puede atribuirse a la calidad de los materiales empleados, a las diferentes temperaturas durante el proceso de descomposición y a la cantidad de agua empleada en cada uno (Pérez *et al.*, 2008).

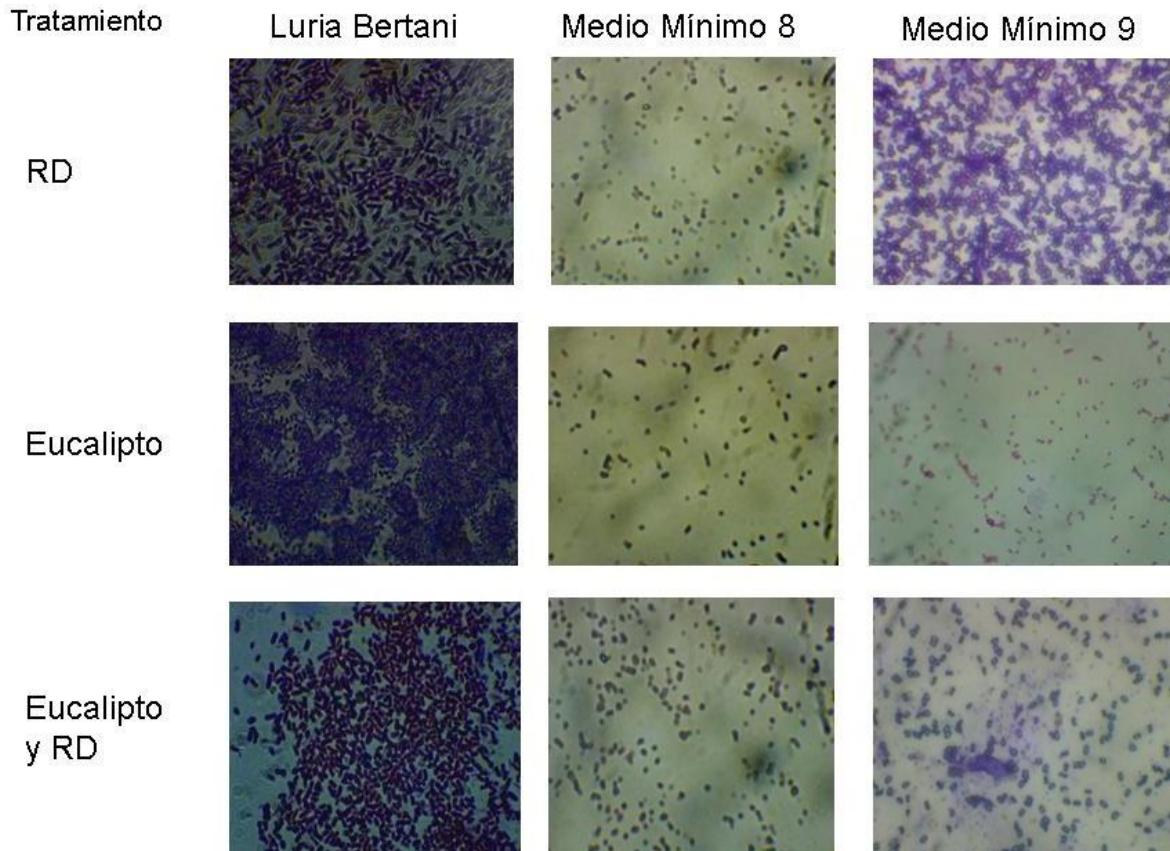


Figura 11. Tinciones de Gram para los diferentes medios y tratamientos en etapa inicial del vertido de los materiales orgánicos.

Quintero-Lizaola (2014) menciona que *Eisenia andrei* tienen un efecto sobre la disminución de la proporción de las poblaciones de hongos y actinobacterias presentes en las lombricompostas en comparación a las compostas. Asimismo, la disminución de la población de estos organismos sucede cuando se agotan los compuestos carbonatados de fácil descomposición (Brock y Madigan, 1993).

Castro *et al.* (2009) reportan que en las distintas muestras analizadas de compostas se identificaron hongos de los géneros *Cladosporium* y *Aspergillus*, propios del proceso de compostaje, además, *Fusarium*, *Scopulariopsis*, *Moniliella*, *Curvularia* y levaduras del género *Rhodotorula*. Estos resultados coinciden con los posibles géneros *Aspergillus* y *Fusarium* identificados; complementariamente, en dicho estudio no encuentran diferencias significativas para los tamaños poblacionales entre los organismos identificados y las muestras analizadas. Las temperaturas máximas

que se alcanzaron fueron de 54.8 °C, además, las densidades poblacionales que reportan son más grandes que las reportadas en este estudio.

Tabla 13. Conteos fúngicos y posibles géneros identificados en lombricompostas de los diferentes tratamientos.

Residuos Orgánicos Domiciliarios		Hojarasca de <i>Eucalyptus</i> sp.		R.O.D. y Hojarasca de <i>Eucalyptus</i> sp.	
Organismo	Conteo UFC/g	Organismo	Conteo UFC/g	Organismo	Conteo UFC/g
HBA (<i>Fusarium</i>)	5 x 10 ⁷	HBA (<i>Fusarium</i>)	5 x 10 ⁷	HBA (<i>Fusarium</i>)	5 x 10 ⁶
HVP (<i>Trichoderma</i>)	5 x 10 ⁶	HVP (<i>Trichoderma</i>)	5 x 10 ⁶	HVP (<i>Trichoderma</i>)	5 x 10 ⁶
HN (<i>Rizhopus</i>)	5 x 10 ⁵	HN (<i>Rizhopus</i>)	5 x 10 ⁵	HN (<i>Rizhopus</i>)	5 x 10 ⁶
HBF (<i>Aspergillus</i>)	5 x 10 ⁵	HBC2 (<i>Aspergillus</i>)	5 x 10 ⁶	HBF (<i>Aspergillus</i>)	5 x 10 ⁶
		HC (<i>Penicillium</i>)	5 x 10 ⁶	HC (<i>Penicillium</i>)	5 x 10 ⁷
				HM (<i>Aspergillus</i>)	5 x 10 ⁶
				HBC (<i>Trichoderma</i>)	5 x 10 ⁶

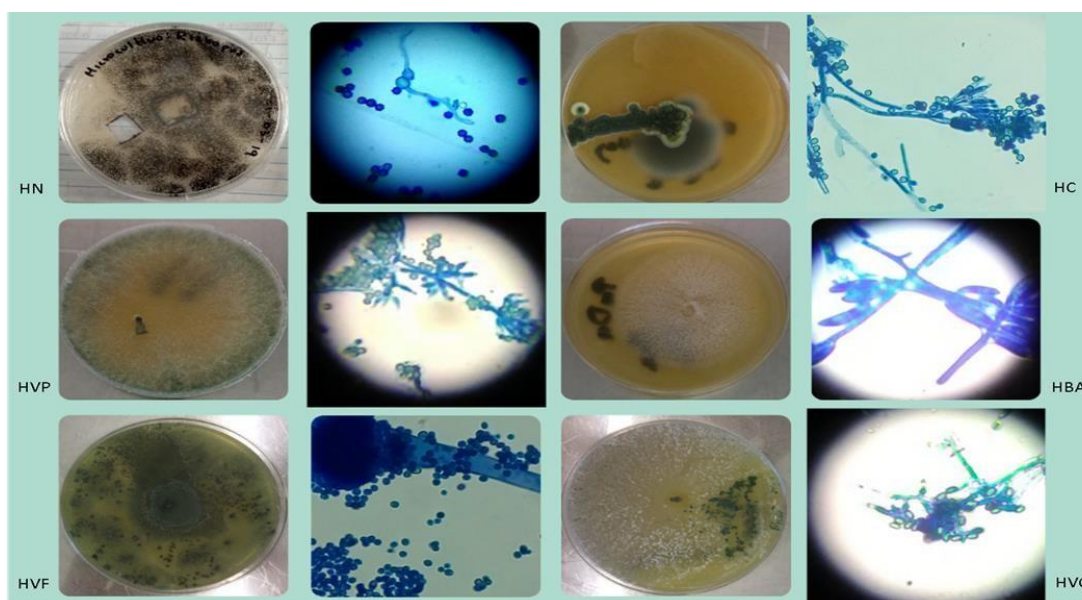


Figura 12. Se muestran las imágenes asociadas a cada identificación, morfología en caja Petri y vista al microscopio (40 x). HN) Posible *Rizhopus*, HVP) Posible *Trichoderma*, HVF) Posible *Aspergillus*, HC) Posible *Penicillium*, HBA) Posible *Fusarium* y HVC) Posible *Trichoderma*. Fotografías tomadas por Luis Ángel Morales.

Sánchez-Gómez (2009) reporta presencia dominante del género *Aspergillus* en las tres etapas del lombricompostaje (inicial, termofílica y de estabilización) que ellos evaluaron.

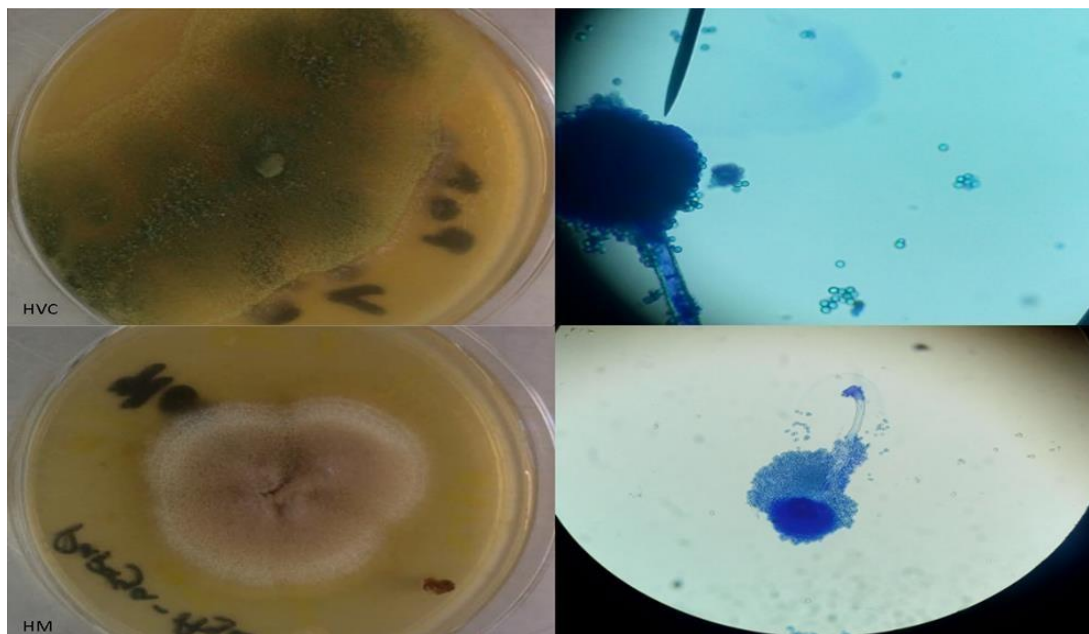


Figura 13. Se muestran las imágenes asociadas a cada identificación, morfología en caja Petri y vista al microscopio (40 x). HVC2 y HM) Posibles *Aspergillus*. Fotografías tomadas por Luis Ángel Morales.

Producción de lombricomposta y reproducción de lombrices

Los totales de producción para cada tratamiento fueron diferentes estadísticamente (Anova de una vía, $F_2, 42 = 553.9$, $p < 0.001$). El T3 fue el que presentó un mayor rendimiento con 166.18 kg, seguido por el T1 con 151.99 kg, por último el tratamiento T2 con 25.62 kg (T3: 33.23 a, T1: 30.14 b y T2: 5.12 c; Tukey-Kramer, $p = 0.05$), dichas mediciones corresponden a 42.61 kg/m² para el T3, en el T1 se obtuvieron 38.97 kg/m² y para el T2 únicamente 6.56 kg/m².

El rendimiento total de la lombricomposta granulada de los tres tratamientos fue diferente (Anova de una vía, $F_2, 42 = 401.4$, $p < 0.001$). Como en el caso anterior, el T3 fue el que presentó un mayor rendimiento con 77.06 kg, seguido por el T1 con 71.99 kg, por último, el tratamiento T2 con 11.31 kg (T3: 15.41a, T1: 14.39 b y T2: 2.26 c; Tukey-Kramer, $p \leq 0.05$), es decir 19.75 kg/m², 18.45 kg/m² y 2.9 kg/m², para el T3, T1 y el T2, respectivamente. De acuerdo con Boulter *et al.* (2000) el proceso

de producción de lombricomposta es influido por la actividad de los microorganismos.

Para evaluar la reproducción de lombrices se contó el número de cocones, las medias de los tratamientos fueron diferentes ($X_2(1) = 31.29$, $p < 0.05$). Se diferenciaron dos grupos (Tabla 13), el primero corresponde al T1 (Md = 14) el cual tuvo mayor presencia de cocones, el segundo grupo se conforma por el T2 (Md = 1) y el T3 (Md = 0). Parece ser que las características de la hojarasca de eucalipto parecen no favorecer la formación de cápsulas. El resultado es contrario a lo reportado por Durán y Henríquez (2009) quienes mencionan un menor número de cocones en los tratamientos con residuos domiciliarios, esta diferencia se puede deber a que ellos probaron con diferentes tipos de residuos orgánicos, además en su diseño experimental solo hubo un tratamiento con dichos residuos. Se encontraron diferencias en el número de juveniles para cada tratamiento ($X_2(1) = 37.32$, $p < 0.05$). El T1 presentó el mayor número (Tabla 13) (Md = 116), el siguiente nivel lo ocupa el T3 (Md = 56) y por último el T2 (Md = 7).

El número de organismos adultos fue diferente para los tratamientos ($X_2(1) = 26.49$, $p < 0.05$). Se diferenciaron dos grupos (Tabla 13), el T1 presentó el mayor número de adultos (Md = 4), mientras que el T2 y el T3 estuvieron por debajo (Md = 0).

En cuanto al total de individuos muestreados (juveniles y adultos) los tres tratamientos fueron diferentes ($X_2(1) = 36.82$, $p < 0.05$), el que presentó el mayor número de individuos fue el T1 (Md = 154), seguido del T3 (Md = 56), y por último el T2 (Md = 8). Estos resultados son contrarios a los reportados por Durán y Henríquez (2009) ya que ellos encontraron una disminución del número de lombrices en el tratamiento de residuos domiciliarios comparado con diferentes materiales orgánicos y sus mezclas: cabe señalar que la duración de dicho experimento fue de solo 90 días.

Con respecto al peso de los juveniles todos los grupos fueron diferentes ($X_2(1) = 35.48$, $p < 0.05$), el T1 fue el que ocupó el primer grupo (Md = 18.06), seguido del T3 (Md = 9.8) y el T2 (Md = 1.10). Los pesos de los adultos también difirieron para los tratamientos ($X_2(1) = 36.82$, $p < 0.05$), se formaron dos grupos diferentes, el

primero corresponde al T1 ($Md = 1.01$) mientras que el segundo grupo está formado por el T2 y T3 ($Md = 0$).

Por último, la biomasa de las lombrices (peso de juveniles y adultos) fue diferente para los tratamientos ($X_2(1) = 35.47$, $p < 0.05$). El T1 fue el que ocupó el primer nivel ($Md = 19.7$), seguido del T3 ($Md = 9.8$), al final se encontró el T2 ($Md = 1.3$). Estos valores se extrapolaron y se obtuvo que para el T1 se tiene un promedio de 1.25 kg/m^2 de lombriz, para el T3 un 1.19 kg/m^2 de lombriz, mientras que para el T2 un 0.9 kg/m^2 de lombriz. El T1 resultó ser un mejor medio para el desarrollo de la biomasa de *E. andrei*.

Para obtener la producción de lombriz por tratamiento se extrapoló la biomasa obtenida a la superficie ocupada en cada módulo de transformación, estos valores se sumaron posteriormente. El resultado mostró que el T1 presentó una mayor producción con 9.22 kg , seguido del T3 con 8.8 kg y muy por debajo el T2 con 0.67 kg , es decir, 2.3 kg/m^2 para el T1, el T3 con 2.2 kg/m^2 , y el T1 con 0.17 kg/m^2 .

En relación a las lombrices inoculadas inicialmente se presentó un aumento de la biomasa de 1.9 veces en el T3, el tratamiento de ROD presentó un incremento promedio de 2.4 veces, mientras el T2 mostró una disminución del 43 %.

Las variaciones en los valores antes mencionados se pueden deber a que los materiales orgánicos (Bollo, 2001; Durán y Henríquez, 2009) utilizados presentan características físicas y químicas diferentes, al contenido de metales pesados (Sánchez, 2009), temperatura (Schuldt *et al.*, 2009), el porcentaje de humedad (Moreno *et al.*, 2014) o incluso el tiempo de precomposteo (Schuldt, 2004; Durán-Hernández, 2012). Acosta-Durán (2013) menciona un periodo óptimo de 45 – 60 días en residuos organodomiciliarios. Sin embargo, en este trabajo el tiempo de precompostaje fue de 37 días: la reducción del tiempo tiene la finalidad de conservar el C lábil, ya que se cree que puede favorecer el crecimiento poblacional de *Eisenia spp.*

Es probable que el tiempo de precomposteo de la hojarasca de eucalipto influya en la dinámica poblacional de la lombriz. Es importante determinar los tiempos de precompostaje ya que cada sustrato admite una cantidad determinada de

lombrices

que se relacionan con el tipo y grado de envejecimiento de los materiales orgánicos (Schuldt *et al.*, 2005).

Por otro lado, valores particularmente altos en cuanto a pH y salinidad (Santamaría y Ferrera-Cerrato, 2002; López *et al.*, 2003; Durán y Henríquez, 2007) producen condiciones de estrés, éstas inciden negativamente sobre la fecundidad (Domínguez *et al.*, 1997) y por ende en el aumento o disminución de la población, esta explicación resulta contraria a lo aquí reportado, ya que el T2 que presentó el menor valor de CE con 0.04 dS m^{-1} (antes de la inoculación de lombrices) fue el del decremento.

Otro factor a considerar es el tipo de muestreo ya que en ocasiones la capa de hojarasca de eucalipto no permitió la toma de muestra adecuada, y en estas circunstancias se pudieron haber omitido conteos en los tratamientos que contenían dicho material.

Calidad de la lombricomposta

El T3 fue diferente a los otros dos en la mayoría de los parámetros de pureza a excepción del contenido de materia inerte, en dónde no hubo diferencias (Anova de una vía, $F_{2, 6} = 18.11$, $p < 0.002$). En cuanto al contenido de lombricomposta el T2 fue el de mayor contenido a diferencia de los otros dos tratamientos (Anova de una vía, $F_{2, 6} = 18.11$, $p < 0.002$). Para el Material mineral extraño el T3 presentó el valor más bajo y se diferenció de los otros dos tratamientos (Anova de una vía, $F_{2, 6} = 15.62$, $p < 0.004$). Asimismo, el T3 presentó mayor contenido de material orgánico no transformado (Anova de una vía, $F_{2, 6} = 17.51$, $p < 0.003$) (Tabla 14). Las diferencias entre los tratamientos pueden deberse a las diferentes características de los materiales originales, al contenido de humedad, a la diversidad y proporción de residuos en el conjunto denominado ROD.

En cuanto al cumplimiento de los rangos que establece la Norma Mexicana antes mencionada en base a la pureza del material, podemos decir que se cumple con los parámetros en todos los tratamientos y en su mayoría las lombricompostas obtenidas pertenecen a las categorías EXTRA y PRIMERA: únicamente el T3 se

clasifica en SEGUNDA calidad en cuanto al material orgánico no digerido.

En cuanto a la determinación de la calidad de las lombricompostas (Tabla 15) el T1 se clasificaría como calidad EXTRA en cuanto al material mineral extraño, para los otros dos parámetros correspondería a PRIMERA. El T2 en todos los parámetros de pureza corresponde a la categoría EXTRA. Por último el T3 correspondería a calidad EXTRA en cuanto al material inerte, para el material mineral extraño es PRIMERA.

Las lombricompostas obtenidas en este proyecto de investigación cumplen con los parámetros de pureza que establecen la categoría de calidad para su venta en el mercado nacional (SAGARPA, 2007): calidad EXTRA y PRIMERA en su mayoría.

Tabla 14. Diferencias de medias por tratamiento para los parámetros de calidad.

Parámetro de calidad	Residuos Orgánicos Domiciliarios (g)	Hojarasca de <i>Eucalyptus sp.</i> (g)	R.O.D. y Hojarasca de <i>Eucalyptus sp.</i> (g)
Lombricomposta	71.85 ± 4.44 b	86.27 ± 1.81 a	76.53 ± 1.95 b
Material Mineral Extraño	0.57 ± 0.15 b	0.30 ± 0.17 b	1.2 ± 0.26 a
Material Orgánico no Digerido	4.67 ± 2.17 b	2.00 ± 0.76 b	8.43 ± 0.22 a
Material Inerte	0.07 ± 0.51 a	0.004 ± 0.001 a	0.22 ± 0.32 a

Nota: Tratamientos con la misma letra no presentan diferencia significativa (Tukey-Kramer, $p \leq 0.05$)

Fuente: NOM-FF-109-SCFI-2007

Por otro lado, se tomó en cuenta el parámetro de densidad aparente (g mL^{-1}) para las lombricompostas finales, en este sentido todos los tratamientos se encuentran dentro de lo establecido por la NOM-FF-109-SCFI-2008: dicha norma propone un rango de 0.4 a 0.9 g mL^{-1} . El análisis de varianza mostro que las medias eran diferentes (Anova de una vía, $F_{2, 6} = 27.57$, $p < 0.001$). En esta diferencia se observaron dos grupos, el primero formado por el T3 con 0.549 g mL^{-1} , y el T2 con 0.544 g mL^{-1} , el otro grupo lo conformó el T2 con 0.441 g mL^{-1} (Tukey-Kramer, $p \leq 0.05$).

Tabla 15. Determinación de la calidad con respecto a la pureza de las lombricompostas obtenidas.

Parámetro de calidad	Residuos Orgánicos Domiciliarios		R.O.D. y <i>Eucalyptus</i> sp. (g)		Extra (%)	Primera (%)	Segunda (%)
	(g)	<i>Eucalyptus</i> sp. (g)	<i>Eucalyptus</i> sp. (g)				
Material Mineral Extraño	0.57	0.3	1.2	0 - 0.5	0.51 - 3	3.01 - 5	
Material Orgánico no Digerido	4.67	2	8.43	0 - 3	3.01 - 6	6.01 - 10	
Material Inerte	0.0	0.004	0.22	< 0.5	0.05 - 1	1.5	
Semillas viables*	0	0	0	≤1	1-1.5	1.5 - 2	

Fuente: NOM-FF-109-SCFI-2007, * = Semillas germinadas

En cuanto a la presencia de semillas viables ninguno de los tres tratamientos presentó germinación, motivo por el cual se categorizan como calidad EXTRA para este parámetro.

Relación Costo-Beneficio (C/B)

En cuanto a la determinación de la relación C/B, se tomaron en cuenta los rubros que se observan en la Tabla 16, los precios de venta reportados son los que se utilizan en la comercialización en VermiBUAP: \$3000 por tonelada de lombricomposta en sus diferentes granulometrías y \$1000 por kg de lombriz (pie de cría). El valor monetario otorgado a la hora laboral es el proporcional a lo reportado después del incremento del 16 % al salario mínimo, éste en la actualidad es de \$136.48 para Técnicos en la zona no fronteriza del país. Se necesitaron cuatro personas desde el momento del acopio de los materiales orgánicos hasta el vertido en cama (tres días de ocho horas), para el mantenimiento de las camas solo participó una persona en periodos de dos horas por semana. Las herramientas utilizadas no se tomaron en cuenta: son parte del mobiliario de la planta de lombricompostaje y no del proyecto de investigación en sí.

Los tratamientos T1 y T3 son altamente rentables (con un índice de 4.12 y 4, respectivamente), la relación C/B de éstos fue bastante alta con respecto a lo obtenido en el T2 (C/B = 0.4). La disminución de la población de lombrices y su

роча

de lombricomposta en las dos granulometrías lo hacen un tratamiento no redituable para lombricompostaje: Auxilia (2005) reporta una baja producción de lombricomposta en tratamientos de pura hojarasca, ella menciona que la hojarasca no fue transformada por las lombrices, por lo que recomienda usar mezclas con diferentes materiales orgánicos a fin de optimizar su transformación.

Auxilia (2005) reporta hasta un 78 % de productividad en tratamientos 100 % lodo residual y 100 % estiércol vacuno. En ese trabajo se evaluaron las proporciones de los diferentes materiales orgánicos y obtiene que la mezcla de 80 % lodos y 20 % residuos vegetales precomposteados es la que mayor rendimiento tuvo sin diferenciarse estadísticamente de los tratamientos 100 %.

Tabla 16. Determinación de la relación costo beneficio para cada tratamiento, indica la ganancia por unidad monetaria invertida.

	Rubro	Residuos Orgánicos Domiciliarios Monto (\$)	Hojarasca de <i>Eucalyptus sp.</i> Monto(\$)	R.O.D. y hojarasca de <i>Eucalyptus sp.</i> Monto(\$)
Costos	Blocks	311.6	311.6	311.6
	Plásticos	915	915	915
	Gasolina	50.33	50.33	50.33
	Jornal	738.8	738.8	738.8
	Liner	77.2	12.8	84.9
	Costal	248.4	41.4	273.1
	Rafia	22	22	22
Beneficios	Lombricomposta fina	1507.3	256.2	1661.8
	Lombricomposta granulada	719.9	113.1	770.6
	Lombrices	9220	670	8800
	Subtotal	11447.2	1039	11232.4
C/B		4.12	0.41	4.00

Nota: Si el índice es "> 1" indica que el proyecto es rentable, si el valor resultante es "<1" el proyecto no es rentable.

Tirado y Trufiño (2011) realizan la estimación de diversos índices económicos para conocer la factibilidad de un proyecto de lombricompostaje con la inclusión de madres de familia, el valor reportado para la relación C/B fue mayor a uno, monetariamente ellas reciben 0.11 centavos de dólar por cada dólar invertido.

En el presente trabajo se obtienen \$3.12 por cada peso invertido para el T1, \$3 de ganancia para el T3 y una pérdida de \$0.60 por peso invertido en el T2. Las diferencias entre estos resultados y los mencionados anteriormente pueden deberse al nivel en el que se implementó el proyecto, en el trabajo antes mencionado la escala es doméstica, mientras que en el presente trabajo podemos denominarla como escala industrial.

Conclusiones

- El comportamiento de las temperaturas al interior de las camas es diferente en los tres tratamientos (Tukey-Kramer, $p < 0.05$). La máxima temperatura fue de 57 °C para el T3, seguida de 54 °C en el T1, y 40 °C para el T2: en ninguno de los casos se alcanzó el rango reportado en literatura para la reducción o eliminación de organismos patógenos.
- La correlación de Pearson para las variables ambientales fue de -0.73. Por otro lado, las variables ambientales y la temperatura interna en las camas de lombricomposta presentan una correlación de 0.33 en el T2, 0.15 en el T3 y -0.26 para el T1, por lo que su efecto sobre el proceso de transformación es poco. La humedad relativa y la temperatura interna tienen baja correlación en el T1 con 0.27, el T2 con -0.25.
- El pH no fue diferente entre los tratamientos en las etapas previas al cernido del material. Para todos los tratamientos el pH aumentó conforme avanzó el proceso de transformación de residuos. Este parámetro en las lombricompostas obtenidas de los tratamientos de 100 % eucalipto y 100 % residuos domiciliarios fue diferente con 8.36 y 7.89, respectivamente.
- Los tratamientos no mostraron diferencias en el contenido de materia orgánica en ninguna de las tres etapas evaluadas. La lombricomposta obtenida del tratamiento tres fue la que presentó un mayor contenido de materia orgánica (53.45 %). El contenido de materia orgánica de los tres

tratamientos fue disminuyendo conforme avanzaba el proceso de transformación de residuos.

- El porcentaje de humedad es variable y depende del contenido de ésta en los materiales orgánicos que se van a transformar y del riego que se realice en cada módulo de transformación. El T2 fue diferente de los otros dos en la etapa de materiales iniciales (T1: 78.30 %, T2: 12.73%, T3:73.13 %), asimismo su lombricomposta presentó el mayor contenido de humedad (53.3%). Los tres tratamientos exceden el límite máximo permisible para el porcentaje de humedad en lombricompostas según la NMX-FF-109-SCFI-2008.
- Existe un incremento de la conductividad eléctrica conforme avanza el proceso de transformación de residuos. La conductividad eléctrica en la lombricomposta obtenida del T2 fue menor en relación a los otros dos tratamientos en todas las etapas evaluadas (Tukey-Kramer, $p \leq 0.05$).
- El contenido de N total es mayor en el T1 con respecto a los otros tratamientos (T1: 2.22 %, T2: 1.37 %, T3: 2.12 %), en todos los casos lo reportado es menor al contenido que se encontraba en los materiales iniciales.
- Existe un incremento en el contenido de K en las lombricompostas obtenidas con respecto a los materiales iniciales. El T1 presentó el mayor contenido de K (0.91 %), el T2 presentó el menor valor (0.30 %).
- La lombricomposta con mayor contenido de P fue la del T1 (0.61 %), la que presentó el menor valor fue la del T2 (0.21 %). El contenido de P es mayor en las lombricompostas obtenidas con respecto a los materiales iniciales para todos los tratamientos.
- El contenido de C disminuyó conforme avanza el proceso de transformación de residuos para todos los tratamientos. El T3 presentó el mayor contenido de C en el material final con un 30.94 ± 3.70 %, seguido del T1 con 25.83 ± 6.01 % y por último el T2 con un 24.50 ± 3.83 %. Los tres tratamientos se encuentran dentro del rango establecido por la NMX-19-FF-SCFI-2008.

- El comportamiento de la relación C/N fue similar para los diferentes tratamientos, ésta aumentó en etapa de precomposteo pero disminuyó en las lombricompostas obtenidas. En los tres tratamientos se cumple con los parámetros físico-químicos establecidos en la NMX-109-FF-SCFI-2008 para lombricompostas.
- El contenido de Pb fue decreciendo conforme avanzaba el proceso de transformación de residuos para el T3, para los otros dos éste aumentó después del precomposteo pero disminuyó en las lombricompostas obtenidas. El contenido de Pb fue menor en las lombricompostas obtenidas de los T1 y T3 con respecto a los materiales iniciales.
- Para los T2 y T3 el contenido de Cd se mantuvo igual en las etapas de materiales iniciales y precomposteo, posteriormente éste aumentó en las lombricompostas obtenidas. La lombricomposta obtenida del tratamiento T1 presentó el menor contenido de Cd (1 ppm) con respecto a los materiales iniciales.
- En cuanto a la dinámica del contenido de Cr únicamente el T3 presentó un aumento del mismo después del precomposteo para su posterior decaimiento en la lombricomposta obtenida. El contenido de Cr es mayor en las lombricompostas obtenidas con respecto al contenido presente en los materiales iniciales para todos los tratamientos. Los tres tratamientos se encuentran dentro del valor de aceptación mencionado en la NMX-FF-109-SCFI-2008 (T1: 13, T2: 10, T3: 13 ppm).
- La dinámica del contenido del Cu en las diferentes etapas del proceso de transformación depende de los materiales orgánicos utilizados. El contenido de Cu es menor en las lombricompostas obtenidas de los T1 y T2 con respecto a los materiales iniciales, por el contrario el tratamiento tres presenta un aumento en la lombricomposta.
- El contenido de Ni fue mayor en las lombricompostas que en los materiales iniciales para los T2 y T3, para el caso del T1 ésta fue menor. El comportamiento del contenido de Ni durante el proceso de transformación de los residuos orgánicos depende de los materiales utilizados.

- El contenido de Zn fue incrementando durante el proceso de transformación de residuos para los T1 y T3, en el T1 descendió después del precomposteo pero aumentó en la lombricomposta obtenida. De los tres tratamientos el T2 presentó un menor contenido de Zn en la lombricomposta con respecto a los materiales iniciales, en los otros dos el contenido fue mayor.
- El contenido de Al fue incrementando conforme avanza el proceso de transformación de residuos para el T2 y T3, para el T1 éste descendió después del precomposteo para después aumentar en la lombricomposta obtenida. En todos los tratamientos el contenido de Al fue mayor en la lombricomposta obtenida que en los materiales iniciales. El mayor aumento lo presentó el T3 con 12 veces el contenido inicial (de 317.5 a 3810 ppm), aun así dicho tratamiento fue el que presentó menor contenido de Al.
- El contenido de Mg de los T3 y T1 aumentó durante todo el proceso, para el T2 dicho contenido disminuyó. El T2 presentó el mayor contenido de Mg (300 ppm).
- En cuestión del contenido de metales pesados se cumple con los parámetros establecidos en la NMX-109-FF-SCFI-2008, así como en las normas internacionales: Canadiense y de la Unión Europea para lombricompostas, únicamente en el contenido de Ni para los tratamientos de 100 % residuos domiciliarios y la mezcla se excede el valor máximo permisible para lo establecido en dicha norma y la norma de la Unión Europea.
- Para los conteos bacterianos realizados en los medios de cultivo MM8, MM9, LB y PDA no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos. Las densidades poblacionales más grandes (10^7 y 10^8) se determinaron en los medios PDA y LB, las menores densidades (10^6) se reportaron para los medios mínimos MM8 Y MM9 para los tres tratamientos.
- El número de posibles géneros fúngicos presentes en las lombricompostas depende de los materiales orgánicos utilizados para el proceso de transformación. Los tratamientos con un mayor número de posibles géneros son el T3 (*Fusarium*, *Trichoderma*, *Rizhopus*, *Penicillium*, *Aspergillus*), y el T2, el T1 presentó el menor número (*Fusarium*, *Trichoderma*, *Rizhopus*,

Aspergillus). El número de posibles especies fúngicas es diferente en los tres tratamientos, para la mezcla se reportan siete, para el caso del eucalipto son cinco y en el de 100 % residuos domiciliarios son cuatro. El hongo más abundante en los tratamientos T1 y T2 fue *Fusarium*, para el T3 fue *Penicillium* (rango de densidad: 5×10^6 a 5×10^7) seguido de *Trichoderma*, *Rizhopus* (el T1 presenta una densidad de 5×10^4 a 5×10^5) y *Aspergillus*, (5×10^5 a 5×10^6).

- Las lombricompostas obtenidas de los diferentes tratamientos presentan altos valores de abundancia para bacterias y hongos.
- El tratamiento con mayor producción de lombricomposta fina y granulada fue el T3 (166.18 kg y 77.06 kg, respectivamente), posteriormente el T1 (151.99 kg, 71.99 kg, respectivamente), por otro lado el T2 presentó la producción más baja (25.62 kg, 11.31 kg, respectivamente).
- El T1 fue el que presentó una mayor biomasa de lombrices (1.25 kg/m^2), el menor valor se reportó en el T2 (0.9 kg/m^2), en éste último se observó una disminución de la población en un 43 %.
- El número de cocones fue mayor en el T1 (14), los que presentaron el menor valor fue el T2 y el T3 (0).
- En todas las lombricompostas obtenidas de los diferentes tratamientos se cumple con los parámetros establecidos en la NMX-109-FF-SCFI-2008 para determinar el grado de calidad para lombricompostas, en su mayoría la categoría de calidad es PRIMERA y SEGUNDA, a excepción del parámetro considerado como “Material orgánico no transformado” en donde para el T3 se categoriza como SEGUNDA.
- Los T1 y T3 son altamente rentables, ambos presentan un índice de la relación $C/B > 4$, para el T2 el proceso no es viable económicamente ($C/B = 0.4$).

Recomendaciones

- Realizar la caracterización física, química y biológica de los materiales iniciales para optimizar el mezclado y el proceso de transformación de residuos orgánicos.
- Realizar el drenado de los módulos de transformación de residuos orgánicos después del vertido de los materiales frescos para disminuir la generación de lixiviados y favorecer el aumento de la temperatura en módulos con una altura de 0.20 m.
- Realizar experimentos para determinar cuál es el tiempo de precomposteo que favorece la dinámica poblacional de *E. andrei* en esos materiales orgánicos, el objetivo es optimizar el manejo y las recomendaciones de uso de los sustratos.
- Realizar investigaciones para determinar los parámetros óptimos de temperatura, pH y CE para la dinámica poblacional de la lombriz, ya que aunque estos estén dentro del rango óptimo para las lombrices, no significa que el medio en el que están sea el apropiado para su desarrollo, por lo que es importante implementar estrategias que garanticen la supervivencia y reproducción de las mismas sin perder de vista los parámetros antes mencionados.
- Monitorear el comportamiento de la humedad y la temperatura al interior de los módulos de transformación de residuos orgánicos para buscar una posible correlación.
- Realizar investigaciones para identificar las poblaciones bacterianas y fúngicas que intervienen en el proceso de lombricompostaje para este tipo de residuos.
- Evaluar el efecto de esas poblaciones en las dinámicas de los parámetros evaluados y/o a la inversa.
- Realizar evaluaciones ecológicas para conocer la dinámica de *E. andrei* en los diferentes materiales utilizados.

- Realizar investigaciones en las temáticas de remoción de metales pesados en materiales orgánicos susceptibles a ser transformados. Para este caso es importante considerar al Aluminio y al Manganeso que son metales no normados pero que pueden presentar problemáticas por altos contenidos.
- Realizar investigaciones acerca de la frecuencia de aplicación de la enmienda orgánica y los fenómenos de bioacumulación en suelos o sustratos (caso de metales pesados).

Bibliografía

- Abraham E.R., Ramachandrán S., Ramalingam V.** (2007). *Biogas: Can it be an important source of energy?. Environmental Science and Pollution Research*. Res. 14(1):67-71 pp.
- Acosta-Durán, C.M., Solís-Pérez, O., Villegas-Torres, O.G. y Cardoso-Vigueros, L** (2013). Precomposteo de residuos orgánicos y su efecto en la dinámica poblacional de *Eisenia foetida*. *Agronomía Costarricense*, 37(1), 127-139.
- Alonso, J.L., Domínguez, H., Garrote, G., González-Muñoz, M.J., Gullón, B., Moure, A., Santos, V., Vila, C. y Yáñez R.** (2011). *Biorefinery processes for the integral valorization of agroindustrial and forestall wastes. CyTA-Journal of Food*. 9(4):282-289 pp.
- Altiver, A.A.** (2003). Evaluación de estiércoles de origen animal con o sin aditivo para la producción de abono orgánico. Tesis de posgrado. Universidad Autónoma Chapingo. Estado de México, México.
- Álvarez-Solís, J.D., Ferrera-Cerrato, R. y Etchevers-Barra, J.D.** (2004). Actividad microbiana en tepetate con incorporación de residuos orgánicos. *Agrociencia*. 34: 523-532 pp.
- Ansorena, J.** (1994). *Sustratos. Propiedades y Caracterización*. Mundi-Prensa. Madrid. España. 172 pp.
- Aranda, E., Barois I., Arellano, P., Irisson S., Salazar T., Rodríguez J., Patrón J.C.** (1999). *Vermicomposting in the tropics*. En: Lavelle P., Brussaard L., Hendrix P.F. (Eds.), *Earthworm Management in Tropical Agroecosystems*, CAB International, Wallingford, UK. *Sustratos. Propiedades y caracterización*. Mundi-Prensa. Madrid, España. 253–287 pp.
- Auxilia, D.** (2005). Utilización de la lombricultura en la transformación de lodo residual de una empresa productora de papel en abono orgánico (humus). Tesis de Licenciatura. Universidad de Carabobo. Venezuela. 1-8 pp.

- Barragan, B., Yolotli A., Tellez-Díaz A., Laguna-Trinidad, A.** (2008). Utilización de residuos agroindustriales. *Revista Sistemas Ambientales*. 2:44-50 pp.
- Bécquer, T., Dai, J., Rouiller, J.H., Reversat, G., Bernhard-Reversat, F., Nahmani, J. y Lavelle, P.** (2004). *Heavy metal accumulation by two earthworm species and its relationship to total DTPA-extractable metals in soils. Soil Biology and Biochemistry*. 39(1) 91-98 pp.
- Benitez -de la Torre, A.** (2001). Manejo adecuado de residuos. En: La situación ambiental en Puebla, Edición: 2001, Universidad Iberoamericana, (7): 225-226 p.
- Benito, M., Masaguer, A., De Antonio, R. y Moliner A.** (2005). *Use of pruning waste compost as a component in soilless growing media. Biores. Technol.* 96(5): 597-603 pp.
- Bernache-Pérez, G.** (2015). La gestión de los residuos sólidos: un reto para los gobiernos locales. *Sociedad y Ambiente*, Marzo-Junio, 72-98 pp.
- Bernal, M. y Gondar, D.** (2008). Producción y gestión de los residuos orgánicos: situación actual a nivel mundial, comunitario y estatal. En: J. Moreno y R. Moral (Ed.), *Compostaje*. (9-42 pp.). España. Mundi-Prensa.
- Benzing, A.** (2001). *Agricultura Orgánica - fundamentos para la región andina*. Neekar-Verlag, Villingen-Schwenningen, Alemania. 682 pp.
- Brock, T. D. y Madigan, M. T.** (1993). *Microbiología*. Prentice Hall Hispanoamericana. México, D. F. 517 pp.
- Bollo, E.T.** (2001). *Lombricultura, una alternativa de reciclaje*. 2a ed. Soboc Grafic, Quito, Ecuador. 158 pp.
- Boulter, J. I., Boland, G. J., Trevors, J. T.** (2000). *Compost: A study of the development process and end-product potential for suppression of turfgrass disease. World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 16: 115-134 pp.
- Bueno, P., Díaz, M.** (2008). *Factores que afectan al proceso compostaje*. 1a ed. Madrid, España. Ediciones Díaz de Santos 97 pp.

- Bustamante, M. A., Paredes, C., Moral R., Agulló E., Pérez-Murcia, M. D. y Abad, M.** (2008). *Composts from distillery wastes as peat substitutes for transplant production. Resources, Conservation y Recycling.* 52(5): 792-799 pp.
- Bustamante, M. A. Paredes, C. Marhuenda-Egea, F. C. Pérez-Espinosa, A. Bernal, M. P. y Moral, R.** (2008). *Co-composting of distillery wastes with animal manures: Carbon and nitrogen transformations in the evaluation of compost stability. Chemosphere* 72(4): 551-557 pp.
- Bouché, M.** (1972). *Lombriciens de France. Ecologie et systématique. Annales de Zoologie et Ecologie Animale, Numéro hors-série. Institut National de la Recherche Agronomique, Paris.*
- Cabrera, R. I.** (1999). Propiedades, uso y manejo de sustratos de cultivo para la producción de plantas en maceta. *Revista Chapingo-Serie Horticultura.* 5: 5-11 pp.
- Cáceres, R., Flotats, X. y Marfá, O.** (2006). *Changes in the chemical and physicochemical properties of the solid fraction of cattle slurry during composting using different aeration strategies. Waste Manag.,* 26:1081-1091 p.
- Castillo, A. E. Quarín, S. H. Iglesias, M. C.** (2000). *Vermicompost chemical and physical characterization from raw and mixed organic wastes. Agricultura Técnica* 60: 74-79 pp.
- Castro, A.J., Matallana, G.M., Echeverry, S.** (2009). Comparación de la flora microbiana a partir de dos metodologías para el tratamiento de residuos sólidos domiciliarios en Garagoa, Boyacá. *Revista Colombiana de Biotecnología.* 11(2):114-126 pp.
- Cabildo, M.P., Claramunt, R.M., Comago, Ma.P., Escolástico, C., Esteban, S., Farrán, M.A., García, M.A., López, C., Pérez, J., Pérez, M. y Santamaría, M.D.** (2008). Tratamiento de la materia orgánica. Compostaje, pp. 141-165. En: *Reciclado y tratamiento de residuos. UNED. Ciencias Ambientales. Madrid.*

- Capistrán, F., Aranda, E. y Romero, J.C.** (1999). Manual de Reciclaje, Compostaje y Lombricompostaje. 3ª Edición. Instituto de Ecología, A. C. Xalapa, Ver. México. 151 pp.
- Capistrán F., Aranda E., Romero J.** (2004). Manual de reciclaje, compostaje y lombricompostaje. 1era. Ed., 2ª. Reimp. Instituto de Ecología, A.C. Xalapa, Ver., México. 151 pp.
- Cruz-Ramales, S., Ramírez, A., Torres, D., Coyotl, A.C.y Silveti, A.** (2010). Evaluación de metales pesados en la mezcla biosólido-cascara de naranja. Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias. 1(2):32-44 pp.
- Dareioti, M.A., Dokianakis, S.N., Stamatelatou, K., Zafiri, C. y Kornaros, M.** (2009). *Biogas production from anaerobic co-digestion of agroindustrial wastewaters under mesophilic conditions in a two-stage process desalination.* 248(1–3): 891-906 pp.
- Del Águila, J.P., Téllez, M.L., Vaca, R. y Armenta, R.R.** (2007). Biodisponibilidad en la lombriz de tierra *Eisenia foetida* en suelos de cultivo enmendados con lodo residual. 1 pp.
- Delgado, M., Porcel, M., Porcel, R., Beltrán, E., Beringola, L. y Sánchez, J.** (2004). Efecto de la vermicultura en la descomposición de residuos orgánicos. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, 20(2) 83-86 pp.
- Díaz, M.J., Jiménez, L., Cabrera, F. y De Bertoldi, M.** (2004). *Using a second order polynomials model to determine the optimum vinasse/grape marc ratio for in vessel composting.* *Compost Sci. Util.*, 12 (3): 273-279.
- Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en Zonas Urbano-Marginadas. Sedesol México.** (2012).
- Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en Zonas Urbano-Marginadas, Sedesol. México.** (2013).

- Dominguez J., Briones, J. y Mato, M.J.I.** (1997). *Effect of the diet on growth and reproduction of Eisenia Andrei*. *Pedobiología* (41):566-576 p.
- Domínguez J.** (2004). *State of the Art and New Perspectives on Vermicomposting Research*. En: C.A. Edwards (Ed.). *Earthworm Ecology*. 2a ed. CRC Press, Boca Raton, FL. 401-424 pp.
- Domínguez, J. y Pérez, L. M.** (2010). *Eisenia foetida* (Savigny, 1826) y *Eisenia andrei* (Bouché, 1972) son dos especies diferentes de lombrices de tierra. *Acta Zool. Mex.* 321-331 pp.
- Domínguez, J. y Edwards, C. A.** (2011). *Biology and ecology of earthworm species used for vermicomposting*. En: *vermiculture technology. Earthworms, organic wastes, and environmental management*. Edwards, C. A., Arancon, N. Q. y Sherman, R. (Eds.). CRC Press. Taylor & Francis Group. Boca Raton, FL. 3:27-40 pp.
- Durán, A.** (2013). *Mexico city's municipal solid waste characteristics and composition analysis*. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 29:39-46 p.
- Durán, L. y Henríquez, C.** (2007). Caracterización física, química y microbiológica de vermicompostes producidos a partir de cinco sustratos orgánicos. *Agronomía Costarricense*. 31(1):41-51 pp.
- Durán, L. y Henríquez, C.** (2009). Crecimiento y reproducción de la lombriz roja (*E. fétida*) en cinco sustratos orgánicos. *Agronomía Costarricense*. 33(2):275-281 pp.
- Etchevers, J.** (1999). Métodos de análisis para calidad de compostas. p. 47-54. In. Memoria Simposio Internacional de Lombricultura y Abonos Orgánicos. UACH - CP. México Madrid, Madrid y Vicente. 1996. Fertilizantes. AMV Ediciones, Mundi-Prensa. Madrid. España. 436 pp.
- Faithfull, N.T.** (2005). *Métodos de Análisis Químicos Agrícolas*. Editorial Acribia. Zaragoza. España. 292 pp.

- Ferrera, C.R. y Alarcón, A.** (2001). La agricultura del suelo en la agricultura sostenible. *Ciencia Ergo Sum* 8: 175-183 pp.
- Flores-Cruz, S.E.** (2017). Manejo agroecológico de jitomate bajo invernadero en San Bernardino Tepehene, Puebla. Tesis de licenciatura. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla. 68 pp.
- Sarandón, J.S. y Flores, C.C.** (2014). La insustentabilidad del modelo agrícola actual. En: J.S. Sarandón y C.C. Flores (Ed.), *Agroecología: bases teóricas para el diseño y manejo de Agroecosistemas sustentables*. (13-41 pp.). Argentina. La Plata: Universidad Nacional de la Plata. E-Book: ISBN 978-950-34-1107-0.
- Galindo, P. F., Fortis H.M., Preciado R.P., Trejo, V.R., Segura, C.M.A. y Orozco, V.J.A.** (2014). Caracterización físico-química de sustratos orgánicos para producción de pepino (*Cucumis sativus L.*) bajo sistema protegido. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 5, núm. 7: 1219-1232 pp.
- García, I., Pineda, J.J., Totosaus, A. y González-González, L.R.** (2008). Evaluación de la presencia de metales pesados en compostas. *Investigación Universitaria Multidisciplinaria*. 7(7), 91-99 pp.
- Garg, P., Gupta, A. y Satya, S.** (2005). *Vermicomposting of different types of waste using Eisenia foetida: A comparative study*. *Bioresource Tech.*, 97, 391–395 pp.
- Gaur, A.C. y Singh, G.** (1995). *Recycling of rural and urban waste through conventional and vermicomposting*. En: Tondon, H.L.S. (Ed.), *Recycling of crop, Animal waste in Agriculture. Fertilizer Development and Consultation Organization*, New Delhi. 31-49 pp.
- Greenway, G.M. y Song, Q.J.** (2002). *Heavy metal speciation in the composting process*. *Journal of Environmental Monitoring*. 4:300-305 pp.

- Hartenstein, R., Neuhauser, E.F. y Collier, J.** (1980). *Accumulation of heavy metals in the earthworm E. foetida*. *Journal of Environmental Quality*. 9:23–26 pp.
- Hartenstein, R. y Hartenstein, F.** (1981). *Physicochemical changes in activated sludge by the earthworm Eisenia foetida*. *J. Environ. Qual.* 10, 337-382 p.
- Hernández, A. J., Pietrosevoli, S., Faría, A., Canelón, R., Palma, R. y Martínez, J.** (2006). Frecuencia de riego en el crecimiento de la lombriz (*Eisenia spp*) y caracterización química del vermicompost. *Revista 20 UDO Agrícola*. 6(1): 20-26 pp.
- Hernández-Cázares, A.S., Real-Luna, N., Delgado-Blancas, M.I., Bautista-Hernández, L. y Velasco-Velasco, J.** (2016). Residuos agroindustriales con potencial de compostaje. *Agroproductividad*. 9: 10-17 pp.
- Hernández-Suárez, C.A.** (2017). Teocelo: trabajo comunitario frente a la escasez de recursos. Varsovia, Polonia. *Revista del CESLA*. 16: 151-157 pp. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/2433/243329724008.pdf>
- Hoorweg, D. y Bhada-Tata, P.** (2012). *Waste generation*. En: *What a waste: A Global Review of Solid Waste Management. Urban Development Series. World Bank. Washington D.C.* 12: 116 pp.
- Hoitink, H.A.J., Madden, L.V. y Boehm, M.J.** (1996). Capítulo 11 de Principios y prácticas de manejo de patógenos del suelo. *Ed. American Phytopathological Society*. 237- 244 pp.
- INE-SEMARNAT.** (2006). Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos 2006. Instituto Nacional de Ecología. México. Gutiérrez Avedoy, V. (coordinador).
- INEGI.** (2012). Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos 2012. Instituto Nacional de Ecología. México. Gutiérrez Avedoy, V. (coordinador).
- INEGI.** (2015). Sistema de Cuentas Nacionales de México. Banco de Información Económica. INEGI. México. Disponible en:

www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/cn/ . Fecha de consulta: diciembre de 2015.

INEGI. (2016). Encuesta Nacional de los Hogares (ENH). INEGI. México. Disponible en:https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/enh/2016/doc/enh2016_res_ultados.pdf

Instituto Municipal de la Planeación (IMPLAN). (2013). Plan de gestión ambiental para el municipio de Puebla. Disponible en: www.pueblacapital.gob.mx

Iwegbue, C.M.A., Egun, A.C., Emuh, F.N. y Isirimah, N.O. (2006). *Compost maturity evaluation and its significance to agricultura. Parkistan Journal of Biological Sciences.* 9(15):2933-2944 pp.

Iwegbue, C.M.A., Emuth, F.N. y Isirimah, N.O. (2007). *Fractionation, characterization and speciation of heavy metals in composts and compost-amended soils. African Journal of Biotechnology.* 6(2):67-68 pp.

Kaushik, O. y Garg, V.K. (2004). *Dynamics of biological and chemical parameters during vermicomposting of solid textile mill sludge mixed with cow dun and agricultural residues. Bioresource Technology.* 94:203-209 pp.

Lasaridi, K., Protopapa, I., Kotsou, M., Pilidis, G., Manios, T. y Kyriacou, A. (2006). *Quality assessment of composts in the Greek market: The need for standards and quality assurance. Journal of Environmental Management* 80:58-65 pp.

Lazcano, C., Gómez-Brandón, M. y Domínguez, J. (2008). *Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure. Chemosphere.* 72:1013–1019.

Leblanc, H.A. Cerrato, M.E., Miranda, A. y Valle, G. (2007). Determinación de la calidad de abonos orgánicos a través de bioensayos. *Tierra Tropical* 3: 97-107 pp.

Ley Marco a la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos para el Estado de Puebla

- LGEEPA.** (1998). Ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente. Diario Oficial de la Federación. 28 de enero de 1988. Disponible en: <http://posgrado.iztacala.unam.mx/wp-content/uploads/2014/03/LGEEPA-14012014.pdf>
- LGPGIR.** (2003). “Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos”. Cámara de Diputados. Publicación Oficial, texto completo de libre acceso. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263_051214.pdf
- Lima, J.S., De Queiroz, J.E.G. y Feitas, H.B.** (2004). *Effect of selected and non-selected urban waste compost on the initial growth of corn. Resources Conservation and Recycling.* 42(4):309-315 pp.
- López M.A., Hernández, M. y Elorza, P.** (2003). Evaluación de la densidad de población de la lombriz compostera (*Eisenia andrei Savigni*). Revista UDO Agrícola 3(1):12-16 pp.
- Madrid, F., López, R. y Cabrera, F.** (2007). *Metal accumulation in soil after application of municipal waste compost under intensive farming conditions. Agriculture Ecosystems & Environment.* 119(3):249-256 pp.
- Mamani-Mamani, G., Mamani-Pati, F., Sainz-Mendoza, H. y Villca-Huanaco, R.** (2012). Comportamiento de la lombriz roja (*Eisenia spp.*) en sistemas de vermicompostaje de residuos orgánicos. *Journal of the Selva Andina Research Society,* 3(1):44-54 pp. Recuperado el 31 de mayo de 2019, de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2072-92942012000100005&lng=es&tlng=es.
- Martensson, A.M., Aulin, C., Wahlberg, O. y Agren, S.** (1999). *Effect of humic substances on the mobility of toxic metals in a mature landfill. Waste Management & Research.* 17(4):296-304 pp.
- Max-Neef, M., Elizalde, A. y Hopenhayn, M.** (1993). Desarrollo a escala humana: conceptos, aplicaciones y algunas reflexiones. Norman Comunidad. Uruguay. [Versión PDF] Disponible en: https://www.maxneef.cl/descargas/Max_NeefDesarrollo_a_escala_humana.pdf

- McDonough, W. y Braungart, M.** (1998). *The next industrial revolution. The Atlantic Monthly*, 282(4):82-92 pp.
- Melendez, G.** (2003). Indicadores químicos de calidad de abonos orgánicos. En: *Abonos orgánicos: Principios, características e impacto en la agricultura*. Meléndez, G. (Ed.). San José, Costa Rica. 50-63 pp.
- Mendiburu, F.** (2017). *Agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research. R package version 1.2-8*. <https://CRAN.R-project.org/package=agricolae>
- Michel, F.C., Pecchia, J.A. y Rigot, J.** (2004). *Mass and nutrient losses during the composting of dairy manure amended with sawdust or straw. Compost Sci. Util.*, 12 (4): 323-334.
- Mitchell, A.** (1997). *Production of Eisenia fetida and vermicompost from feed-lot cattle manure. Soil Biol. Biochem.* 29 (34):763-766 pp.
- Monteiro, J., Baeza, J.E. y Hernán.** (2006). Manual de gestión integrada de residuos sólidos municipales en ciudades de América Latina y el Caribe. IBAM, Brasil. 261 pp.
- Moreno, R. A., García, G.L., Cano, R.P., Martínez, C.V., Márquez, H.C. y Rodríguez, D.N.** (2014). Desarrollo del cultivo de melón (*Cucumis melo*) con vermicompost bajo condiciones de invernadero. *Ecos. Rec. Agrop.* 1(2):163-173 pp.
- Morgan, J.E. y Morgan, A.J.** (1990). *The distribution of cadmium, cooper, lead, zinc, and calcium in tissues of the earthworm Lumbricus rubellus sampled from one uncontaminated soil. Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 84:559-566 pp.
- Morgan, J.E. y Morgan, A.J.** (1991). *Differences in the acculated metal concentrations in the two earthworm species (Lumbricus rubellus y Dendrodilus rubidus) living in contaminated soils. Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 47:296-301 pp.
- Nieto-Garibay, A., Murillo-Amador, B., Troyo-Diéguéz, E., Beltrán-Morales, A., Ruíz-Espinoza, F.H. y García-Hernández J.L.** (2010). Aprovechamiento de

residuos orgánicos de origen animal, vegetal y doméstico para la elaboración y uso de composta en la agricultura orgánica. García-Hernández, J.L., Salazar-Sosa, E., Orona-Castillo, I., Fortis-Hernández, M. y Trejo-Escareño, H.I. (Edit. Cient.) Agricultura Orgánica, Tercera Parte. Durango-México.

Nogales, R., Cifuentes, C. y Benítez, E. (2005). *Vermicomposting of winery wastes: A laboratory study. Journal of Environmental Science and Health Part B.* 1234: 659- 673 pp.

NOM-001-SEMARNAT-1996. “Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales”. [Versión PDF] Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/105139/Normas_Oficiales_Mexicanas.pdf

NOM-161-SEMARNAT-2011. “Que establece los criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo; el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo”. Subsecretaría de Fomento y Normatividad Ambiental de la SEMARNAT. Publicación Oficial, texto completo de libre acceso. http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5286505&fecha=01/02/2013

NOM-083-SEMARNAT-2003. “Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial”. Subsecretaría de Fomento y Normatividad Ambiental de la SEMARNAT. Publicación Oficial, texto completo de libre acceso. http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=658648&fecha=20/10/2004
Última consulta 29 de noviembre de 2017.

NOM-052-SEMARNAT-2005. “Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos”. Subsecretaría de Fomento y Normatividad Ambiental de la SEMARNAT.

Publicación Oficial, texto completo de libre acceso.
http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4912592&fecha=23/06/2006

NMX-109-FF-SCFI-2008. "Humus de lombriz (lombricomposta)-Especificaciones y métodos de prueba". [Versión PDF] Recuperado de:
<http://xico.gob.mx/transparencia/uploads/transparencia/8260ec89b1b6137fd8997120b75eced.pdf>

NOM-161-SEMARNAT-2011. "Qué establece los criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo; el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo". Subsecretaría de Fomento y Normatividad Ambiental de la SEMARNAT. Publicación Oficial, texto completo de libre acceso. Disponible en:
http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php

OECD. (2013). Factbook. Economic, Environmental and Social Statistics. OECD Publishing. 2013. Disponible en:
www.oecd.org/publications/factbook_18147364.

Ooms, J. (2018). *Writexl: Export Data Frames to Excel 'xlsx' Format. R package version 1.0.* <https://CRAN.R-project.org/package=writexl>

Ozores-Hampton, M. (2006). *Soil and nutrient management: Compost and manure, En: J.L. Gillett, H.N. Petersen, N.C. Leppla, and D.D. Thomas (Eds.). Grower's IPM guide for Florida tomato and pepper production, Univ. Florida, Gainesville.* 36–40 pp.

Parawira, W., Read, J.S., Mattiasson, B. y Björnsson, L. (2008). *Energy production from agricultural residues: High methane yields in pilot-scale two-stage anaerobic digestion. Biomass Bioenergy.* 32(1): 44-50 pp.

Pepe O., Ventrino, V. y Blaiotta, G. (2013). *Dynamic of functional microbial groups during mesophilic composting of agro-industrial wastes and free-living (N₂)-fixing bacteria application. Waste Management.* 33:1616-1625 pp.

- Pérez, A., Céspedes, C., y Núñez, P.** (2008). Caracterización física-química y biológica de enmiendas orgánicas aplicadas en la producción de cultivos en república dominicana. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*. 8(3): 10-29 pp.
- Peterson, B.G. y Carl, P.** (2018). *PerformanceAnalytics: Econometric Tools for Performance and Risk Analysis. R package version 1.5.2.* <https://CRAN.R-project.org/package=PerformanceAnalytics>
- Piña-Guzmán, A.B., Nieto-Monteros, D.A. y Robles-Martínez, F.** (2017). Utilización de residuos agrícolas y agroindustriales en el cultivo y producción del hongo comestible seta (*Pleurotus spp.*). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. (32):141-151 pp. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.20937/RICA.2016.32.05.10>.
- Quintero-Lizaola, R.** (2014). Poblaciones microbianas, actividades enzimáticas y sustancias húmicas en la biotransformación de residuos. *Terra Latinoamericana*, 32(2):161-172 pp. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018757792014000200161&lng=es&tlng=es
- Red Mexicana de Bioenergía.** (2017). Disponible en: <http://rembio.org.mx/>
- Reglamento de la LGPGIR.** (2006). “Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos”. Cámara de Diputados. Publicación Oficial, texto completo de libre acceso. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LGPGIR_311014.pdf
- Ribeiro, H.M., Romero, A.M., Pereira, H., Borges, P., Cabral, F., y Vasconcelos, E.** (2007). *Evaluation of a compost obtained from forestry wastes and solid phase of pig slurry as a substrate for seedlings production.* *Biores. Technol.* 98(17): 3294-3297 pp.
- Rodríguez-Aragonés, C.** (1998). Lombrices de tierra con valor comercial. *Biología y técnicas de cultivo.* Carlos Rodríguez A., Ma. Magdalena Vázquez G (Eds).

La Habana, Cuba: Universidad de la Habana, Depto. De Biología Animal y Humana, Universidad de Quintana Roo. Depto. de Recursos Naturales. 61 pp.

Romero, L.M. R. (2000). Abonos orgánicos en el contexto de la agricultura orgánica y la ciencia del suelo. En: La Edafología y sus perspectivas al siglo XXI. Tomo I. CP, UNAM, UACH. México. 369-378 pp.

Romero, L.M.R., Corlay, L.C. y Martínez, C.C. (2000). Caracterización y evaluación física, química y microbiológica de composta y lombricomposta. En: Memoria del Seminario de Avances de investigación 2000 Programas Universitarios de Investigación en diagnóstico, conservación y recuperación del suelo, Recursos naturales y ecología, Agricultura orgánica. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo. México. 179-186 pp.

Rosal, A., Pérez, J.P., Arcos, M.A. y Dios, M. (2007). La incidencia de metales pesados en compost de residuos sólidos urbanos y en su uso agronómico en España. Información Tecnológica. 18(6):75-82 pp.

Rotondo, R., Firpo, I.T., Ferreras, L., Toresani, S., Fernández S. y Gómez, E. (2009). Efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas y fertilizante nitrogenado sobre propiedades edáficas y productividad en cultivos hortícolas. Horticultura Argentina. 28(66)18-25 pp.

Rucoba-García, A., Anchondo-Nájera, A., Luján-Álvarez, C. y Olivas-García, J.M. (2006). Análisis de rentabilidad de un sistema de producción de tomate bajo invernadero en la región centro-sur de Chihuahua. Revista Mexicana de Agronegocios. Disponible en: file:///C:/Users/jos%C3%A9%20leon/Downloads/ANALISIS_DE_RENTABILIDAD_DE_UN_SISTEMA_DE_PRODUCCI.pdf

Sadi, B.B.M., Wrobel, K., Kannamkumarath, S.S., Castillo, J.R. y Caruso, J.A. (2002). *SEC-ICP studies for elements binding to different molecular weight fractions of humic substances in compost extract obtained from urban solid waste. Journal of Environmental Monitoring.* 4:1010-1016 pp.

- Sánchez, Z.E.** (2009). Propuesta para el tratamiento de metales pesados en lodos residuales de origen urbano, utilizando vermicomposteo. Tesis de pregrado. Instituto Politécnico Nacional, México. 121 p.
- Sánchez-Gómez, T.M.** (2009). *Characterization of the composting process from sugar waste*. *Agronomía Tropical*, 59(3): 309-316 pp. Disponible en: http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002192X2009000300007&lng=es&tlng=en
- Sánchez-Monedero, M. A., Cayuela, M. L., Mondini, C., Serramiá, N. y Roig, A.** (2008). *Potential of olive mill wastes for soil C sequestration*. *Waste Management* 28(4): 767-773 pp.
- Santos, U.** (2004). Caracterización del sistema de producción de café orgánico de Solimán. En IDIAF. Resultados de investigación 1: 29-53 pp.
- Sandoval, C.J., Vergara, M., Carreño, M. y Castillo, E.F.** (2009). *Microbiological characterization and specific methanogenic activity of anaerobe sludges used in urban solid waste treatment*. *Waste Management*. 29(2): 704-711 pp.
- Santamaria, S. y Ferrera-Cerrato, R.** (2002). Dinámica poblacional de *Eisenia andrei* (Bouché 1972) en diferentes residuos orgánicos. *Terra*. 20:303-310 pp.
- Santos, U.** (2004). Caracterización del sistema de producción de café orgánico de Solimán. En IDIAF. Resultados de investigación 1: 29-53 pp.
- Sanz, D.** (2008). Tratamiento de la materia orgánica. Compostaje. En: Reciclado y tratamiento de residuos. UNED. Ciencias Ambientales. Madrid.141-165 pp.
- Sarandón, S. J. y Flores, C.C.** (2014). Sustentabilidad ecológica vs. Rentabilidad económica. El análisis económico de la sustentabilidad. En: Sarandón, Santiago Javier Sarandón y Claudia Cecilia Flores (Eds.). *Agroecología: bases teóricas para el diseño y manejo de agroecosistemas sustentables - 1a ed. - La Plata: Universidad Nacional de La Plata, 2014. Disponible en: <https://www.mec.gub.uy/innovaportal/file/75868/1/agroecologia.pdf> E-Book: ISBN 978-950-34-1107-0.*

- Saval, S.** (2012). Aprovechamiento de residuos agroindustriales: pasado, presente y futuro. *Revista de la Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería, A.C.* 16(2):14–46 pp.
- Schuldt, M.** (2004). *Lombricultura fácil*. Editorial *Work Graf*. La Plata, Argentina. 153 pp.
- Schuldt M., Rumi A. y Gutiérrez, D.E.** (2005). Determinación de “edades” (clases) en poblaciones de *Eisenia foetida* (*Annelida: Lumbricidae*) y sus implicancias reprobológicas. *Revista del Museo de La Plata. Zoología.* 17(170):1-10 pp.
- Schuldt, M.** (2007). Experiencias en el tratamiento de residuos biodegradables en Patagonia. VI Encuentro Patagónico de Ciencias Sociales Esquel. 622:1-6 pp. Consultado en octubre de 2011. Disponible en <http://www.isfd809esquel.com.ar/>
- Schuldt, M.** (2009). Notas del Curso “Lombricultura y sus Aplicaciones”. Consultado en octubre de 2011. Disponible en <http://www.manualdelombricultura.com>
- Schuldt, M., Christiansen, R., Mayo, J.P., Scatturice, L.A., Pessin, C., Helling, M.A., Illanes, I., Gaspar, C. y Rubinich, J.M.** (2009). Pruebas de laboratorio con *Eisenia foetida* (*Oligochaeta, Lumbricidae*) para establecer tiempos mínimos de compostaje. Discrepancia con observaciones de campo. *Estrucplan IX.* 695:1-7 pp.
- Shahmansouri, M., Pourmoghadas, H., Parvaresh, A.R. y Alidadi, H.** (2005). *Heavy metals Bioaccumulation by Iranian and Australian earthworm (E. foetida) in the Sewage Sludge Vermicomposting.* *Iranian J. Env. Health Sci Eng.* 2(1): 28 pp.
- SEMARNAT.** (2006). Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. INE-SEMARNAT. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/196519/Diagnostico_basico_pgir_2006.pdf

- SEMARNAT.** (2012a). Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. Editorial del Deporte Mexicano. México D. F. 112 pp.
- SEMARNAT.** (2012b). Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambiental. Indicadores clave y de desempeño ambiental. Capítulo 7. Disponible en: http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/07_residuos/cap7_1.html
- SEMARNAT.** (2013). México, “Estadísticas 2013”. Disponible en: <http://aplicaciones.semarnat.gob.mx/estadisticas/compendio2010/>
- SEMARNAT.** (2014). Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambiental. Indicadores clave y de desempeño ambiental. Capítulo 7. Disponible en: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/07_residuos/7_1_1.html
- SEMARNAT.** (2015). Informe de la situación del medio ambiente en México. Capítulo 7. Disponible en: <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/cap7.html>
- Soto, M.G.** (2000). Regulaciones en la producción y uso de abonos orgánicos. En: Lombricultura y agricultura sustentable. Martínez C.C. y Ramírez L.F. (Eds.). México. 173-184 pp.
- Soto, M.G.** (2003). Abonos orgánicos: definiciones y procesos. En: Abonos orgánicos: principios, aplicaciones e impactos en la agricultura. Editorial Meléndez, G. San José, Costa Rica. 20-49 pp.
- Soto, G. y Meléndez, G.** (2004). Cómo medir la calidad de los abonos orgánicos. CATIE. Manejo integrado de plagas y agroecología. 72: 91-97 pp.
- Soto, G. y Muñoz, C.** (2002). Consideraciones teóricas y prácticas sobre el compost y su empleo en la agricultura. Manejo Int. Plagas Agroec. 65: 123-129 pp.

- Soumaré, M., Tack, F.M.G. y Verloo, M.G.** (2003). *Effects of a municipal solid waste compost and mineral fertilization on plant growth in two tropical agricultural soils of Mali*. *Bioresource Technology*, 83:15-20 pp.
- Suárez-Guerrero, A.I.** (2003). Tránsito a la sustentabilidad en el municipio de Teocelo, Veracruz El Programa Integral de Separación, Manejo, Educación, Proceso y Aprovechamiento de Residuos Sólidos. *El Jarocho Verde*. 20-23 pp.
- Suthar, S., Singh, S. y Dhawan, S.** (2008). *Earthworms as bioindicator of metals (Zn, Fe, Mn, Cu, Pb and Cd) in soils: Is metal bioaccumulation affected by their ecological category* *Ecol. Eng.* 32:99–107 pp.
- Suthar, S. y Singh S.** (2008). *Vermicomposting of domestic waste by using two epigeic earthworms (Perionyx excavatus and Perionyx sansibaricus)*. *International Journal of Environmental Science y Technology* 5(1): 99 pp.
- Terrones, S.C. y Sánchez T.Y.** (2011). Análisis de la rentabilidad económica de la producción de jitomate bajo invernadero en Acaxochitlán, Hidalgo. *Revista Mexicana de Agronegocios* 17(29):752-761 pp.
- Tirado-Bermeo, L. y Tufiño-Caza, A.** (2011). Proyecto para la producción y comercialización de abono orgánico con inclusión de mano de obra de madres de familia del barrio 11 de mayo de San José de Turubamba. Tesis de Licenciatura. Universidad Politécnica Salesiana. Quito, Ecuador. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1546/11/UPS-ST000752.pdf>
- Tripathi, G. y Bhardwaj, P.** (2004). *Comparative studies on biomass production, life cycles and composting efficiency of Eisenia fetida (Savigny) and Lampito mauritii (Kinberg)*. *Bioresource Technology*. 92: 275-283 pp.
- Ubica-Brito, L.A. y Sandoval-Castro, C. A.** (2003). Uso del contenido ruminal y algunos residuos de la industria cárnica en la elaboración de composta. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 2. 45 – 63 pp. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93912118001>

Vargas, M.R.N. (2010). Vermicompostaje en el reciclado de residuos agroindustriales. En: XII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. Santo Domingo, 17-19 de noviembre del 2010. Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador. 43 pp.

Villar, M.C., Beloso, M.C., Acea, M.J., Cabaneiro, A., González-Prieto, S.J., Carballas, M., Díaz-Raviña, M. y Carballas, T. (1993). *Physical and chemical characterization of four composted urban refuses. Bioresource Technol.* 45: 105-113 pp.

Villegas-Cornelio, V. y Laines-Canepa, J. (2017). Vermicompostaje: I avances y estrategias en el tratamiento de residuos sólidos orgánicos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas.* 8(2):393-406 pp.

Whittle, A.J. y Dyson, A.J. (2002). El uso de composta proveniente de residuos sólidos municipales como mejorador de suelos para cultivos en Yucatán. Estudios preliminares. *Ingeniería Revista Académica.* 9(3):31-38 pp.

Wickham H., François, R., Henry, L. y Müller, K. (2018). *Dplyr: A Grammar of Data Manipulation. R package version 0.7.7.* <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>

Woodbury, P.B. (1993). *Pottential effects of heavy metal son plants and the environment.* Ithaca, NY: Cornell Waste Management Institute.

Worldometers. (2015). *World Population by Cointry: 2015.* Disponible en: www.worldometers.info/world-population/worldpopulation-countries.php

Anexos

Medios de Cultivo

Preparación de 0.5 l de Medio Mínimo 9 (MM9)

Glucosa 4 g/l

NH₄Cl 9.5 mM

NaCl 8.5 mM

Na₂HPO₄ 33 mM

KH₂PO₄ 22 mM

CaCl₂ 0.3 mM

Biotina 1 mg/l

Tiamina 1 mg/l

Agar Bacteriológico 8 g

- Se realizó el pesaje de los diversos reactivos en una balanza analítica.
- El contenido se vertió en un vaso de precipitado de 500 ml y se aforo a la misma cantidad con agua esterilizada.
- El preparado se metió a la autoclave para ser esterilizado.
- Se adicionan elementos traza a la solución.

Preparación de 0.5 l de Medio Mínimo 8 (MM8)

Glucosa 4 g/l

NaCl 8.5 mM

Na₂HPO₄ 33 mM

KH₂PO₄ 22 mM

CaCl₂ 0.3 mM

Biotina 1 mg/l

Tiamina 1 mg/l

Agar Bacteriológico 8 g

- Se realizó el pesaje de los diversos reactivos en una balanza analítica.
- El contenido se vertió en un vaso de precipitado de 500 ml y se aforo a la misma cantidad con agua esterilizada.
- El preparado se metió a la autoclave para ser esterilizado.

Preparación de 0.5 l de Luria Bertani (LB)

Triptona 10 g/l

Y.E. 5 g/l

NaCl 5 g/l

Agar bacteriológico 8 g/l

- Se realizó el pesaje de los diversos reactivos en una balanza analítica.
- El contenido se vertió en un vaso de precipitado de 500 ml y se aforo a la misma cantidad con agua esterilizada.
- El preparado se metió a la autoclave para ser esterilizado.

Preparación de 0.5 l de Papa-Dextrosa-Agar (PDA)

Almidón

Dextrosa 19.5 g

- Se realizó el pesaje de los diversos reactivos en una balanza analítica.
- El contenido se vertió en un vaso de precipitado de 500 ml y se aforo a la misma cantidad con agua esterilizada.
- El preparado se metió a la autoclave para ser esterilizado.