



Centro de Investigación en Alimentación y
Desarrollo, A. C.

ELABORACIÓN DE COMPOSTA A PARTIR DE
RESIDUOS DE PESCADO, UTILIZANDO EL MÉTODO DE
PILAS CON AIREACIÓN MECÁNICA

Por:

Karla Berenice Vega García

TESIS APROBADA POR LA COORDINACIÓN DEL ASEGURAMIENTO
DE LA CALIDAD Y APROVECHAMIENTO DE
RECURSOS NATURALES

Como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

Guaymas, Sonora

Enero, 2015

APROBACIÓN

Los miembros del comité asignados para revisar la tesis de Vega García Karla Berenice, la han encontrado satisfactoriamente y recomiendan que sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias.



Dra. Jacqueline García Hernández
Director de Tesis



M.C. María de la Cruz Paredes Aguilar
Asesor



Dr. Juan Carlos Ramírez Suárez
Asesor



Dra. Ma. Araceli Correa Murrieta
Asesor

DECLARACIÓN INSTITUCIONAL

La información generada en esta tesis es propiedad intelectual del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD). Se permiten y agradecen las citas breves del material contenido en esta tesis sin permiso especial del autor, siempre y cuando se dé crédito correspondiente. Para la reproducción parcial o total de la tesis con fines académicos, se deberá contar con la autorización escrita del Director General del CIAD.

La publicación en comunicaciones científicas o de divulgación popular de los datos contenidos en esta tesis, deberá dar los créditos al CIAD, previa autorización escrita del manuscrito en cuestión del director de tesis.



Dr. Pablo Wong González
Director General

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento enorme a CONACYT por el apoyo económico prestado durante la maestría.

A CIAD por las facilidades para hacer disposición de las instalaciones tanto en las clases como el laboratorio, para realizar lo experimental, así como su personal académico.

A Productos Pesqueros de Guaymas, por su apoyo en la realización del presente proyecto, al proporcionarnos materia prima para llevar a cabo este estudio y poder dar una nueva aportación.

A la Dra. Jaqueline García Hernández por depositar su confianza en mí en la realización de este proyecto, por su atención y paciencia en cada paso que se dio, me quedo con el gran ejemplo que me dejó de lo que es el amor por el trabajo que uno realiza.

A mi comité de tesis, M.C. María de la Cruz Paredes Aguilar, Dr. Juan Carlos Ramírez y Dra. Ma. Araceli Correa Murrieta por su apoyo ya que dedicaron su valioso tiempo para poder salir adelante y cada uno de ellos me dejó una gran enseñanza por su amplia experiencia en sus respectivas áreas.

A los técnicos M.C. Germán Leyva, M.C. Daniela Aguilera y M.C. Lizbeth Rivero, los cuales con su valioso apoyo fue posible realizar las diferentes actividades para sacar adelante el proyecto, tanto en campo como en laboratorio de Ciencias Ambientales así como en Aseguramiento de Calidad y los cuales me han dejado una gran enseñanza, tanto a nivel laboral como

personal, gracias a cada uno por su tiempo.

A mis compañeros del CIADE que cada uno tuvo un gran impacto en mi vida, que aunque tenemos metas muy parecidas al tenerle amor al estudio y la superación, también me ayudaron a atesorar y apreciar las diferencias que los hace tan especiales, gracias por cada plática, cada sonrisa, cada abrazo, así como las enseñanzas que me dejaron todos, especialmente a Adrián Güido Moreno, Daniel Fernández Quiroz, Marcelino Montiel Herrera y Daniel Guevara, por sus consejos y apoyo a lo largo de la maestría, por los ánimos que me brindaron y que me ayudaron en todos los aspectos.

DEDICATORIA

A Dios por darme la oportunidad de vivir esta experiencia y poder superarme como profesionalista y estudiante.

A mi familia, la cual siempre me mostró su apoyo incondicional desde el comienzo, que nunca se cansaron de decir que puedo lograr lo que me proponga, por inyectarme todas esas ganas de salir adelante, principalmente mi padre, que en él tengo el mejor ejemplo de perseverancia en la vida, a mi madre y a mi abuela que me ayudaron a levantarme en los momentos más difíciles y me dieron fuerzas para no rendirme, los amo.

A los amigos que han estado a pesar del pasar de tiempo y la distancia, los cuales han estado en las buenas y en las malas, así como los nuevos con los cuales sé que queda mucho por compartir.

A Dulce, gracias por tu amistad y cada momento que me has regalado, que han sido muchos para el poco tiempo que llevamos de convivir, me has ayudado a disfrutar más los pequeños detalles, te quiero amiga.

CONTENIDO

	Página
Contenido.....	vii
Lista de figuras.....	xi
Lista de tablas.....	xiv
Resumen.....	xvi
Abstract.....	xviii
I. Introducción.....	1
II. Antecedentes.....	3
2.1 Residuos.....	3
2.1.1 Tipos de Residuos.....	3
2.1.2 Manejo y Gestión de Residuos.....	4
2.2 Compostaje.....	8
2.2.1 Definición, Ventajas y Desventajas del Compostaje.....	8
2.2.2 “Compost”.....	10
2.2.3 Factores Importantes en el Proceso de Compostaje.....	11
2.2.3.1 Relación carbono/nitrógeno (C/N).....	11
2.2.3.2 pH.....	11
2.2.3.3 Temperatura.....	12
2.2.3.4 Humedad.....	12
2.2.4. Factores a Cuidar en el Proceso de Compostaje.....	13
2.2.4.1 Metales pesados.....	13
2.2.4.2 Patógenos.....	13
a) Coliformes fecales.....	14
b) <i>Salmonella spp.</i>	14
2.2.5. Importancia del Crecimiento Bacteriano en el Proceso de Compostaje.....	14

CONTENIDO (Continuación)

	Página
2.3 Fases del Proceso de Compostaje.....	15
2.3.1 Fase Mesofílica I.....	16
2.3.2 Fase Termofílica.....	16
2.3.3 Fase Mesofílica II o de Enfriamiento.....	17
2.3.4 Fase de Maduración.....	17
2.4 Vermicompostaje o Lombricompostaje.....	18
2.4.1 Humus de Lombriz.....	18
2.4.2 Lombriz Roja de California <i>Eisenia foetida</i>	19
2.4.3 Condiciones Óptimas del Cultivo de Lombriz.....	21
2.4.4 Enriquecimiento del “compost” Debido a la Acción de la Lombriz.....	22
2.4.5 Lixiviado o Té de Compost.....	23
2.5 Materiales con Alto contenido de Carbono.....	24
2.6 Efectos de la Aplicación del Compost y Humus de Lombriz.....	25
2.7 Fertilizantes Orgánicos en México.....	26
III. Justificación.....	28
IV. Hipótesis.....	29
V. Objetivos.....	30
5.1 Objetivo General.....	30
5.2 Objetivos Específicos.....	30
VI. Materiales y Métodos.....	31
6.1 Obtención de Datos de Generación de Residuos de la Pesca y Residuos Vegetales en Guaymas, Sonora.....	31
6.2 Componentes a Utilizar para el Compostaje.....	31
6.2.1 Procedimiento de Formulación para los Diferentes Tratamientos de las Pilas de Compostaje.....	32
6.2.2 Componentes de las Pilas.....	33
6.3 Obtención del Material.....	35

CONTENIDO (Continuación)

	Página
6.4 Volteos, Riegos y Muestreos.....	36
6.5 Inoculación de Lombriz Roja.....	38
6.6 Seguimiento del Proceso de Compostaje.....	39
6.6.1 Análisis Químicos de las Muestras.....	39
6.6.2 Materia Orgánica.....	40
6.6.3 Humedad.....	41
6.6.4 Nitrógeno.....	41
6.6.5 pH.....	41
6.6.6 Análisis Microbiológicos.....	42
6.6.6.1 <i>Salmonella</i> spp	42
6.6.6.2. Coliformes fecales.....	42
6.6.7 Determinación de Metales.....	43
6.7 Análisis Estadístico.....	43
VII. Resultados y Discusión.....	46
7.1 Producción de Residuos de Pescado y de Vegetales en Guaymas..	46
7.2 Resultados del Proceso de Compostaje.....	48
7.2.1 Temperatura.....	48
7.2.2 pH.....	53
7.2.3 Humedad.....	55
7.2.4 Materia Orgánica.....	56
7.2.5 Carbono.....	57
7.2.6 Nitrógeno Total.....	58
7.2.7 Relación C/N.....	60
7.2.8 Resultados de lombricompostaje.....	62
7.2.9 Metales pesados.....	62
7.2.10 Parámetros Microbiológicos (Coliformes fecales y <i>Salmonella</i> spp.).....	68
7.2.11 Comparación de los Diferentes “compost”.....	69

CONTENIDO (Continuación)

	Página
7.2.12 Comparación de Resultados con NTEA-006.....	71
7.2.13 Análisis de Extracto de Lombricomposta.....	72
VIII. Conclusiones.....	74
Referencias Bibliográficas.....	75
Anexo I. Encuesta.....	82
Anexo II. Fórmulas de Plantilla de Compostaje.....	83
Anexo III. Digestión de Sedimentos y Suelos.....	85

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1 Proceso de compostaje.	9
2 Producto final del compostaje tradicional “compost”.	10
3 Descripción gráfica de las cuatro fases del proceso de compostaje	15
4 Humus de lombriz.	19
5 Anatomía de la lombriz roja de California (<i>Eisenia foetida</i>)	20
6 Preparación del inóculo de bacterias comerciales.	36
7 Riegos realizados al inicio del proceso de compostaje.	37
8 Forma de realizar el muestreo en pilas de compostaje	38
9 Inicio del lombricompostaje.	39
10 Configuración del diseño de experimentos para el proceso de compostaje.	44
11 Cambios de temperatura y pH registrados durante el proceso de compostaje.	49

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

Figura		Página
12	Comparación entre fases del proceso de compostaje con el programa JMP® 8.0.	50
13	Comparación de fase mesófila entre tratamientos con el programa JMP® 8.0.	51
14	Comparación de fase mesófila entre subtratamientos con el programa JMP® 8.0.	51
15	Comparación de la fase termofílica entre tratamientos con el programa JMP® 8.0.	52
16	Comparación de la fase de maduración entre tratamientos con el programa JMP® 8.0.	53
17	Comparación (JMP® 8.0) de la concentración de nitrógeno al inicio y final del proceso de compostaje.	59
18	Comparación (programa JMP® 8.0) de la relación C/N al inicio y final del proceso de compostaje	61
19	Concentración de cadmio al inicio y final del proceso de compostaje.	63

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

Figura		Página
20	Concentración de cobre al inicio y final del proceso de compostaje.	64
21	Concentración de zinc al inicio y final del proceso de compostaje.	65
22	Concentración de hierro al inicio y final del proceso de compostaje.	66
23	Concentración de mercurio al inicio y final del proceso de compostaje.	67

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
1	Porcentajes de carbono (C) y nitrógeno (N) contenidos en los diferentes productos utilizados para el compostaje.	32
2	Plantilla de para materiales a utilizar en compostaje con relación C/N y humedad para 100 Kg de desechos de pescado.	33
3	Cantidades requeridas para llevar a cabo la formación de las pilas de compostaje.	34
4	Periodos de muestreo para los tratamientos que comprendieron el proceso de compostaje.	40
5	Generación semanal de residuos para los diferentes establecimientos en Guaymas, Sonora.	47
6	Valores promedio de pH y desviación estándar de los diferentes tratamientos durante el proceso de compostaje.	54
7	Valores promedios de humedad y desviación estándar de los diferentes tratamientos durante el proceso de compostaje.	55
8	Promedio del porcentaje de materia orgánica por tratamientos a lo largo del proceso de compostaje.	56
9	Valores promedio de carbono y desviación estándar de los diferentes tratamientos durante el proceso de compostaje.	57

LISTADO DE TABLAS (Continuación)

Tabla	Página
10 Valores promedios de nitrógeno total y desviación estándar de los diferentes tratamientos durante el proceso de compostaje.	58
11 Valores promedio de relación C/N y desviación estándar de los diferentes tratamientos durante el proceso de compostaje.	60
12 Datos obtenidos del proceso de lombricompostaje.	62
13 Conteo de coliformes fecales al inicio y al final del compostaje.	69
14 Comparación del proceso de compostaje con la NTEA-006-SMA-RS-2006.	72
15 Comparación de concentración de nitrógeno y fósforo en el té de lombricomposta realizado y té de lombricomposta comercial.	73

RESUMEN

Guaymas, Sonora es un importante puerto pesquero, que produce grandes cantidades de desechos orgánicos que no reciben el tratamiento adecuado, contaminando el ambiente. El compostaje es una buena opción para disminuir este problema, ya que durante este proceso se reducen y aprovechan los residuos orgánicos, los cuales son transformados en nutrientes para las plantas, por medio de la actividad de microorganismos (bacterias, hongos y levaduras). En este trabajo se evaluó la eficiencia del compostaje elaborado con residuos pesqueros. Para realizarlo, se formaron 12 pilas de compostaje de 1 tonelada variando la cantidad de residuos (pesqueros y vegetales). Las pilas se airearon de forma mecánica cada 15 días aproximadamente y el proceso de compostaje duró 62 días. Se tomaron muestras para determinar relación C/N, coliformes fecales y *Salmonella* al inicio y al final del proceso y se monitoreó temperatura, humedad, pH, durante el proceso. Las relaciones C/N obtenidas inicialmente mostraron valores altos, debido a la presencia de materiales con alto contenido de carbono, sin embargo al final del proceso, la relación C/N disminuyó considerablemente en todos los tratamientos en un rango de 0.52-1.16. La humedad y el pH oscilaron entre 40-60% y 7.98-8.62, respectivamente. Por medio de la temperatura, se observó la presencia de las 3 etapas del compostaje (mesofílica, termofílica y maduración). La etapa termofílica ($T \approx 60^{\circ}\text{C}$), fue determinante para disminuir las concentraciones de coliformes fecales y *Salmonella* en las pilas. El producto final tuvo características similares en porcentaje de materia orgánica y carbono al de un fertilizante orgánico comercial, y tuvo mayores concentraciones de nutrientes que las del fertilizante comercial. En cuanto a relación C/N, materia orgánica, y microorganismos

patógenos, el producto obtenido en este estudio está dentro de la Norma Técnica (NTEA-006-SMA-RS-2006), sin embargo, las concentraciones de metales detectadas en el producto final están por encima de lo que indica la norma, es posible que los suelos de la región sean ricos en algunos metales (Cu, Zn, Fe y Cd) lo que resultó en un valor elevado en el producto final, sin embargo, las concentraciones de mercurio, que es un metal tóxico, no excedieron niveles recomendados. Se concluye que es factible utilizar los residuos de pescado para la elaboración de “compost” y que el producto final generado es comparable al compost generado de residuos vegetales y a fertilizantes orgánicos comerciales.

Palabras clave: compostaje, residuos de pescado, lombriz roja de California, bacterias comerciales

ABSTRACT

Guaymas, Sonora is an important fishing port, which produces large amounts of organic wastes that do not receive adequate treatment, polluting the environment. Composting is a good option to reduce this problem because organic wastes are transformed into plant nutrients, through the activity of microorganisms (bacteria, fungi and yeasts). In this work the efficiency of compost made from fish waste was evaluated. Compost piles (12 of 1 tonne each) were formed by varying the amount of waste (fish and vegetables). The piles were aerated mechanically every 15 days or so and the composting process lasted 62 days. Samples were taken to determine C/N, fecal coliforms and *Salmonella* at the beginning and end of the process and temperature, humidity and pH were monitored during the process. C/N ratio obtained initially showed high values due to the presence of materials with high carbon content, but at the end of the process, the ratio decreased significantly in all treatments in a range of 0.52-1.16. Moisture and pH ranged from 40-60% and 7.98-8.62, respectively. Variations in temperatures were indicative of the 3 stages of the composting process (mesophilic, thermophilic and maturation) which were observed in all the treatments. The thermophilic stage ($T \approx 60^{\circ}\text{C}$), was decisive to decrease the concentrations of fecal coliforms and *Salmonella* in the piles. The final product had similar percentage of organic matter and carbon as a commercial fertilizer, and had higher nutrient concentrations than the commercial fertilizer. The product obtained in this study is within the technical standard (NTEA-006-SMA-RS-2006) regarding C/N, organic matter and pathogenic microorganisms, however, the metal concentrations detected in the final product were above the standard. It is possible that the soils in the region are rich in some metals (Cu, Zn, Fe and Cd) which resulted in a high value in the final product, however, concentrations of mercury, which is a toxic metal did not

exceeded recommended levels. We conclude that it is feasible to use the fish waste for the production of compost and that the final product generated is comparable to compost made from vegetable waste and to commercial organic fertilizers.

Keywords: composting, fishwaste, California red worm, commercial bacteria.

I. INTRODUCCIÓN

Los residuos generados a nivel doméstico e industrial son un problema de gran preocupación, ya que pueden generar focos de infección, además de impactos negativos en el medio ambiente (aire, agua y suelo). Por estas razones, es necesario someterlos a un tratamiento con el cual se pueda reducir el riesgo de contaminación, y al mismo tiempo se pueda obtener un producto útil, que se aproveche para remediar el empobrecimiento de los suelos (Rodríguez Salinas y Córdova y Vázquez, 2006).

El proceso de compostaje es una opción para el tratamiento de residuos, donde el material orgánico libre de sustancias químicas (desechos de cocina, jardín, o industria de alimentos), es sometido a una degradación bioquímica, la cual provoca cambios físicos en dicho material, dando como resultado un material con altos niveles de nutrientes que ayudan a enriquecer las propiedades del suelo y favorecen el desarrollo de las plantas (O’Ryan Herrera y Riffo Prado, 2007). Además de los desechos de cocina o jardín, que son los más comunes, también es posible realizar composta empleando desechos industriales, por ejemplo, con los residuos generados por la industria pesquera (Schaub y Leonard, 1996). En la comunidad de Guaymas, Sonora, estos residuos son comunes, ya que la pesca es una de las actividades económicas más importantes.

La aplicación de los desechos de pescado como materia prima de compostaje ha sido poco estudiada, es por ello que se realizaron varios procesos de

compostaje a partir de diferentes cantidades de residuos de pescado, utilizando en algunos de ellos bacterias comerciales y lombriz roja de California. Además, se determinó la calidad de las diferentes compostas obtenidas.

II. ANTECEDENTES

2.1. Residuos

Se conoce como residuo, todo aquel componente derivado de las diferentes actividades de producción y consumo, el cual se considera que no cuenta con ningún valor económico. Sin embargo, es importante recolectar los residuos y someterlos a tratamiento, ya sea por cuestiones de salud, de contaminación ambiental, para optimizar espacios, o simplemente para mejorar el aspecto del entorno (López-Wong, 2010)

2.1.1. Tipos de Residuos

Los residuos se pueden clasificar de acuerdo a su origen (doméstico, industrial, comercial, institucional o público); según su composición (materia orgánica e inorgánica); o de acuerdo a su peligrosidad (tóxica, reactiva, corrosiva, radioactiva, inflamable e infecciosa). Los residuos orgánicos son los que se generan en mayor cantidad (generalmente representan arriba del 70% de los residuos municipales) y los que más contaminan, principalmente por sus altos contenidos en elementos minerales, compuestos orgánicos recalcitrantes,

fitotoxinas, patógenos y, por la generación de plagas (rh Auditoría y Gestión Ambiental, 2005; López-Wong, 2010).

2.1.2. Manejo y Gestión de Residuos

La generación de residuos, es consecuencia de las distintas actividades realizadas en la sociedad y su manejo es un problema de difícil solución, ya que involucra aspectos institucionales, económicos, tecnológicos, ambientales, territoriales, sociales, políticos y culturales. Además, la problemática aumenta con el índice de crecimiento, patrones de producción y consumo, las características geográficas, la distribución de la población, las deficiencias institucionales, y la falta de leyes o reglamentos en materia de fiscalización y gestión (Grazalezma-Torres, 2011).

El manejo adecuado de los residuos se puede llevar a cabo mediante el barrido, la recolección, la transferencia, el transporte, el tratamiento (compostaje, reciclaje, incineración, mecánico biológico, etc.) y la disposición final (rh Auditoría y Gestión Ambiental, 2005). La gestión o manejo de los residuos sólidos urbanos en México, recae generalmente en las autoridades locales, mediante el servicio de limpia y recolección de basura, ya que es considerado un servicio público y forma parte de aquellas actividades organizadas que se realizan conforme a las leyes o reglamentos vigentes, con el fin de satisfacer de manera continua, uniforme, regular y permanente necesidades de carácter colectivo y cuya prestación es de carácter público (Grazalezma-Torres, 2011).

En el municipio de Guaymas, Sonora, se generan aproximadamente 130 toneladas diarias de residuos sólidos (rh Auditoría y Gestión Ambiental, 2005), los cuales se descargan (sin ser separados o reciclados previamente) en el relleno sanitario de la misma empresa que el ayuntamiento tiene contratada

para realizar el servicio de recolección, generándole al municipio, un gasto económico de 2 millones 400 mil pesos mensuales (Ojeda, 2014).

En el 2005, rh Auditoría y Gestión Ambiental, realizaron un estudio en Guaymas, Sonora sobre la recolección y manejo de los residuos sólidos generados en el puerto (generación, composición y peso). Éste se llevó a cabo durante ocho días consecutivos en 300-500 viviendas, considerando el estrato socioeconómico y las fuentes generadoras. Los resultados obtenidos, indicaron que se generan al día 0.8608 kg/persona, por lo que el municipio genera diariamente 130 toneladas, ya que tiene un total de 150,000 habitantes (INEGI, 2010). Además, se estimó que un 69% de los residuos son de origen orgánico, por lo que se recomendó ampliamente la separación de los mismos desde su origen. El reporte generado por este estudio fue entregado a la empresa que realiza el servicio de recolección de basura (Promotora Ambiental S.A.), sin embargo, estas recomendaciones no han sido escuchadas y hasta la fecha no existe un programa de separación o proceso de composteo de los residuos orgánicos generados en el municipio de Guaymas (rh-Auditoría-y-Gestión-Ambiental, 2005).

En cuanto a la industria de la pesca, en el año 2011, el volumen de producción a nivel nacional registrado asciende a 1'660 000 toneladas en peso vivo desembarcado. Siendo Sonora y Sinaloa, las entidades con mayor producción pesquera con una participación del 37% y 20% respectivamente, seguidas por Baja California Sur con un 9% y Baja California con un 8%. La producción promedio de pesca en los últimos diez años es de 1.4 millones de toneladas, siendo los años de 2002, 2003, 2007, 2010 y 2011 donde se han registrado las mayores producciones de captura. Durante el periodo de 2008 y 2009, se reportaron capturas históricas del orden de las 1'745 mil y 1'768 mil toneladas respectivamente, lo cual se debió a la alta producción de sardina (CONAPESCA, 2011).

Los residuos generados por la industria pesquera son una fuente importante de contaminación ambiental, ya que se estima que más del 50% de toda la captura de pescados y mariscos no es utilizada (Arvanitoyannis y Kassaveti, 2008). De acuerdo a la FAO (2009), se estima que la industria pesquera a nivel mundial genera 29 millones de toneladas de residuos anualmente, ya sea durante el manejo, almacenamiento, distribución y comercialización de los productos pesqueros industriales y artesanales.

Dependiendo de la temporada, algunas de la plantas procesadoras situadas en el municipio de Guaymas, pueden llegar a generar dos o más toneladas de residuos pesqueros. Estos desechos, además de la contaminación que ocasionan en la zona y área circundante donde se generan, también pueden alterar ampliamente las zonas costeras, ya que se incrementa el contenido de nutrientes, grasas, aceites y microorganismos, reduciendo la biomasa, la densidad y diversidad de bentos, plancton y necton, provocando cambios en las cadenas alimenticias naturales (Arvanitoyannis y Kassaveti, 2008).

En la industria de la pesca, parte de los residuos generados son utilizados para diferentes fines; uno de ellos es la producción de harina de pescado, la cual se usa para la alimentación animal. El ensilado de pescado es otra alternativa que tiene amplias posibilidades de desarrollo, ya que no requiere maquinaria ni instalaciones especiales. A partir de este proceso, se obtiene un alimento para consumo animal que aporta niveles vitamínicos altos, sin embargo, un alimento para consumo animal con niveles vitamínicos altos, que hasta el momento no ha tenido una gran difusión (Sztern y Pravia, 1999). Una tercera alternativa muy poco explorada, es el compostaje, el cual es relativamente reciente en este tipo de residuo y que si se realiza de una manera adecuada, resuelve el problema que generan estos desechos, obteniéndose un producto de calidad para ser usado como abono orgánico (Carney *et al.*, 2000). También es reconocido que los desechos de pescados contienen macro y micronutrientes, especialmente altos niveles de nitrógeno y fósforo, así como bajo contenido de metales

pesados, lo cual favorece su uso como fertilizante en la agricultura y suelos en general (Marcet *et al.*, 2010).

El proceso de compostaje con residuos de la pesca se ha realizado con resultados positivos en varios países como Canadá, Estados Unidos, Australia, España y Argentina. En España, se han mezclado residuos de la pesca con algas y corteza de pino, obteniéndose un material que resulta en más del 80% de germinación de plantas, lo cual es indicativo de la ausencia de sustancias fitotóxicas y presencia de nutrientes (López-Mosquera *et al.*, 2011). Además, el método de pilas por volteos implica el uso de material rico en carbono (aserrín, virutas de madera o podas de jardín) y de nitrógeno que ayudan a aumentar las temperaturas requeridas para reducir considerablemente el contenido de patógenos (Laos *et al.*, 2002). También, se han realizado compostajes mediante el método de hileras de 50 metros de largo por 2.5 metros de ancho y 1.5 metros de alto con diferentes cantidades de desechos de pescado con aserrín, tomando en este estudio como indicadores del progreso del proceso los niveles de amonio y ácidos grasos volátiles (Liao *et al.*, 1995).

En Estados Unidos, se permite que los desechos generados por la industria pesquera sean vertidos en el océano, pero la industria utiliza o aprovecha una cantidad variable para producir harina de pescado (Himelbloom, 1994). En Canadá, existe un interés considerable para utilizar los desechos de pescado en el proceso de compostaje y ensilaje basados en las transformaciones microbianas, con los cuales se han reducido las emisiones de amoníaco mediante el uso de musgo de turba y vermiculita o aliso. Estos procesos han generado gran interés comercial en el Reino Unido, donde se adoptaron como una técnica nacional de gestión de residuos (Wase-D. y Thayanithy, 1992; Alwan *et al.*, 1993; Liao *et al.*, 1997).

2.2. Compostaje

En México, las primeras plantas de compostaje se construyeron a principios de 1970, generando grandes expectativas ya que se esperaba recuperar los residuos sólidos como materia prima para la industria del reciclaje, aumentar la vida útil de los sitios de disposición final y mejorar la calidad de vida de los pepenadores. Para poder lograr estos objetivos, los gobiernos involucrados invirtieron económicamente para acondicionar los sitios de operación, adquirir equipo necesario y capacitar personal. Actualmente, en la Ciudad de México operan dos grandes plantas tratadoras de residuos sólidos urbanos, enfocadas además a fines educativos; así como siete pequeñas plantas localizadas en Cuautitlán Izcalli, Atizapán de Zaragoza, Universidad Autónoma de México, Universidad Autónoma Metropolitana, Jiutepec, Querétaro y Jalapa (Rodríguez-Salinas y Córdova-y-Vázquez, 2006), en las cuales, el tiempo de producción es de 2 a 6 meses para la obtención del abono orgánico.

Los residuos que reciben estas plantas provienen en su mayoría de parques, jardines y mercados municipales, así como de ranchos, caballerizas, huertos y otras operaciones agropecuarias (Rodríguez-Salinas y Córdova-y-Vázquez, 2006).

2.2.1. Definición, Ventajas y Desventajas del Compostaje

El proceso de compostaje (Figura 1) se puede definir como la oxidación biológica de residuos orgánicos en condiciones controladas de humedad, temperatura y aireación. Este proceso es realizado por microorganismos, los cuales utilizan el carbono y nitrógeno disponibles en los residuos liberando

energía; además, producen agua, dióxido de carbono, compost/humus y sales minerales a través de una serie de reacciones bioquímicas (O’Ryan-Herrera y Riffo-Prado, 2007).

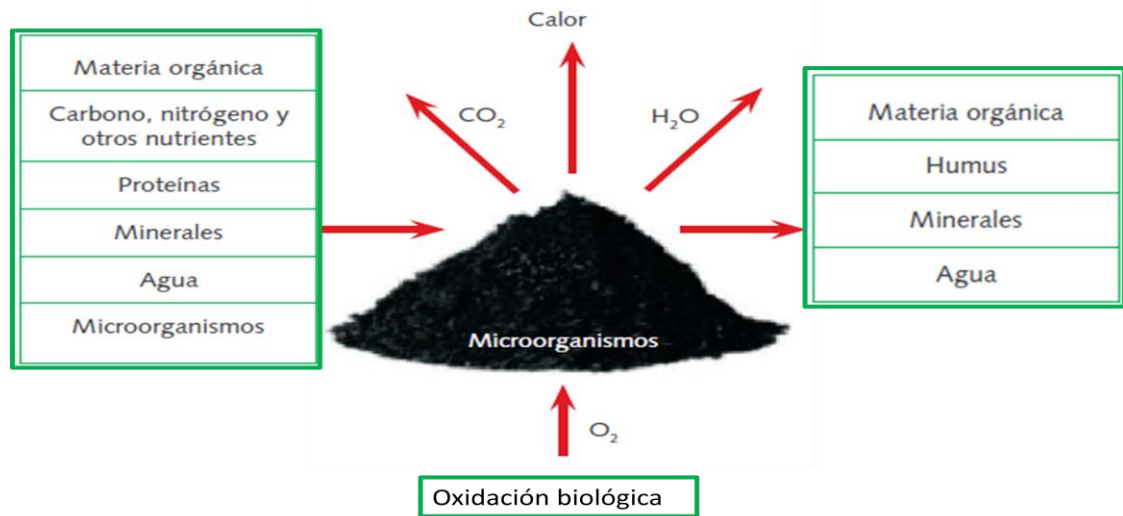


Figura 1. Proceso de compostaje (O’Ryan-Herrera y Riffo-Prado, 2007).

Las ventajas del compostaje (SEDESOL *et al.*, 2001; O’Ryan-Herrera y Riffo-Prado, 2007) son:

- Es un sistema de reciclaje, con útil revaloración del residuo.
- Optimiza los recursos existentes en cada zona al aprovechar los residuos orgánicos.
- Reducción del volumen de los residuos orgánicos.
- Ahorro económico en abonos químicos.
- Producto comercializable.
- Aumenta la vida del suelo, ya que estimula su actividad biológica.
- Fácil de preparar y ocupa poco espacio, si se realiza a pequeña escala.
- Es de bajo costo si se realiza a pequeña escala.
- Disminuye las necesidades de materia orgánica de los suelos y contribuye a su recuperación.
- Elimina microorganismos patógenos.

Entre las desventajas (SEDESOL *et al.*, 2001; O’Ryan-Herrera y Riffo-Prado, 2007) se encuentran:

- Realizarlo a nivel comercial requiere de alta inversión inicial.
- Disponibilidad de terreno.
- Posible contaminación al medio ambiente (metales pesados, olores y otros), según el material de origen con que se realiza el compostaje.
- Resistencia a cambiar los abonos artificiales por el compost.

2.2.2. “Compost”

El “compost” (Figura 2) es un producto con apariencia y olor de tierra húmeda, que se obtiene de manera natural a partir de la degradación de los residuos orgánicos, es decir a través del compostaje. Está libre de sustancias patógenas y se utiliza como mejorador de suelos y cultivos, ya que proporciona altos contenidos de nutrientes y ayuda a combatir la erosión y a disminuir el uso de fertilizantes químicos (Sztern y Pravia, 1999).



Figura 2. Producto final del compostaje tradicional “compost”.

2.2.3. Factores Importantes en el Proceso de Compostaje

2.2.3.1. Relación Carbono/Nitrógeno (C/N). La relación C/N es el factor ambiental más importante en un proceso de compostaje, y debe controlarse para asegurar una fermentación correcta, ya que éste es uno de los parámetros que mejor indica la maduración del compost. El proceso de compostaje depende de la acción de los microorganismos, los cuales requieren de una fuente de carbono que les proporciona energía (Mouat, 1975). Se considera que si hay suficiente nitrógeno disponible en la materia orgánica original, la mayoría de los otros nutrientes estarán también disponibles en cantidades adecuadas (Labrador, 2001).

La relación C/N inicial considerada como óptima está comprendida entre 25:1 y 30:1, relación que disminuye conforme transcurre el tiempo de compostaje, lo cual es debido a la transformación de la materia orgánica y al desprendimiento de carbono en forma de CO₂ (Corbit, 2003). Sin embargo, se han efectuado compostajes exitosos con relaciones de 20 a 80; sólo que el proceso puede ser más lento y el aprovechamiento de los nutrientes puede que no sea el óptimo, lo que puede llegar a afectar la calidad del producto final (Henao, 1996; Soto-M., 2003). Al final del proceso de compostaje, la relación C/N debe disminuir considerablemente y de acuerdo a la NTEA-006-SMA-RS-2006 este valor debe ser < 12.

2.2.3.2. pH. En el proceso de compostaje, el pH óptimo para que actúen los microorganismos es de 6.5 a 8.0; sin embargo, estos valores varían durante todo el proceso, pues al principio tiende a disminuir debido a la producción de ácidos orgánicos (etapa mesofílica), luego aumenta en la fase termofílica y finalmente disminuye y se estabiliza en la etapa de maduración (O’Ryan-Herrera y Riffo-Prado, 2007).

Además, el pH afecta el grado de solubilidad de las sustancias minerales que absorben las plantas en el medio acuoso, por lo que valores excesivamente elevados o reducidos de pH, pueden convertirse en un factor limitante para la absorción de sustancias minerales (Gracia-Fernández, 2012).

2.2.3.3. Temperatura. La temperatura en el proceso de compostaje, refleja la actividad biológica de los microorganismos. Las temperaturas alcanzadas durante el proceso están relacionadas con el tamaño de la pila, el contenido de agua y la relación C/N de la mezcla. Es así como a menor relación C/N, se alcanzan mayores temperaturas. Es importante controlar la temperatura durante todo el proceso de compostaje, ya que si bien, las altas temperaturas permiten eliminar patógenos, parásitos y semillas de malezas, también pueden eliminar a los microorganismos que ayudan a la degradación de la materia orgánica, además de aumentar el riesgo de incendios en la pila (O’Ryan-Herrera y Riffoprado, 2007).

2.2.3.4. Humedad. Los microorganismos, al igual que todos los seres vivos, requieren de agua para vivir; por lo que las pilas de compostaje deben tener condiciones adecuadas de humedad (entre 40 y 60%) para evitar el desplazamiento de oxígeno y mantener así las condiciones que favorezcan el desarrollo de los organismos aerobios que ayudan a la degradación, como son los hongos y las bacterias. En forma empírica, se puede considerar que la composta tiene una humedad adecuada cuando, al tomar un puño del compostaje, éste se siente suficientemente húmedo, pero no escurre al ser apretado por los dedos.

Para mantener la humedad requerida, es recomendable tener un riego ligero y

constante, así como cubrir las pilas de compost con paja, costales o cualquier otro material disponible. Para evitar la saturación por el riego o la lluvia, las pilas de compostaje pueden mantenerse con una pendiente adecuada y cubrirse con plásticos (García-Pérez, 2006).

2.2.4. Factores a Cuidar en el Proceso de Compostaje

2.2.4.1. Metales pesados. El “compost” generalmente tiene niveles bajos de metales pesados (Sztern y Pravia, 1999). También se aplica a suelos contaminados por metales pesados como un sistema de remediación natural, ya que es una fuente de sustancias húmicas adecuadas para reducir los niveles de concentración de metales por medio de la bioestimulación con población microbiana autóctona (Walker *et al.*, 2004), efecto que también se logra como consecuencia de aumentos en el valor del pH y en el contenido de humedad (Alvarenga *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2009).

2.2.4.2. Patógenos. En el diseño de un proceso de compostaje se debe tener en cuenta la destrucción de patógenos, los cuales generalmente se desarrollan a temperaturas menores a los 42 °C, ya que normalmente viven a la temperatura corporal del hombre y animales, o a la temperatura ambiental de las plantas. Las técnicas para la preparación de compost son consideradas muy efectivas para el control de microorganismos patógenos; su tasa de mortalidad está en función del tiempo y de la temperatura. Cuando el proceso de compostaje funciona correctamente (todas las partes de la pila alcanzan temperaturas de más de 60 °C), la mayoría de los microorganismos patógenos mueren (Tchobanoglous *et al.*, 1994; Luque, 1997).

a) Coliformes fecales. Estas bacterias forman parte del tracto intestinal tanto del hombre como de los animales de sangre caliente. Para su inactivación, se deben considerar los factores ambientales como las altas temperaturas, la presencia de luz ultravioleta y el pH ácido o básico, ya que estos microorganismos al no encontrarse en un ambiente con condiciones favorables y al no tener disponibles los nutrientes necesarios para su crecimiento se hacen más susceptibles a la inactivación. El proceso de compostaje alcanza temperaturas mayores a 60 °C lo que causa la eliminación de la mayoría de los coliformes fecales presentes en las pilas (Fuccz-Gamboa *et al.*, 2007).

b) *Salmonella* spp. Las personas pueden contraer *Salmonella* a través del consumo de frutas y vegetales contaminados, por lo que es de gran importancia asegurarse que el residuo que se utilice para el compostaje, no esté contaminado con esta bacteria u otro patógeno. Para obtener un producto final libre de *Salmonella*, es importante que el proceso de compostaje alcance temperaturas mayores a 60 °C (FAO, 2013).

2.2.5 Importancia del Crecimiento Bacteriano en el Proceso de Compostaje

Existen microorganismos que degradan la materia orgánica haciéndola nuevamente disponible para las plantas (Olalde-Portugal y Aguilera-Gómez, 1998). En una pila de compostaje se tiene una amplia diversidad de microorganismos, los cuales son aerobios facultativos y obligados, mesofílicos y termofílicos, según el rango de temperaturas de acuerdo a la etapa del proceso,

donde sobresalen los grupos de actinomicetos termofílicos, bacterias mesofílicas y termofílicas, hongos mesofílicos y termofílicos en la degradación del los componentes orgánicos (Tchobanoglous *et al.*, 1994; Luque, 1997).

Existen productos comerciales a base de bacterias aerobias facultativas, las cuales son seleccionadas y adaptadas para degradar la materia orgánica, los materiales complejos y cualquier otro desperdicio de alimentos, ya que aceleran el proceso de compostaje (BASA, 2009).

2.3. Fases del Proceso de Compostaje

El proceso de compostaje consta de cuatro etapas (Figura 3), las cuales son esenciales para que se pueda obtener un producto final adecuado, que sea útil en el mejoramiento de los suelos (Mustin, 1987; Laos, 2003).

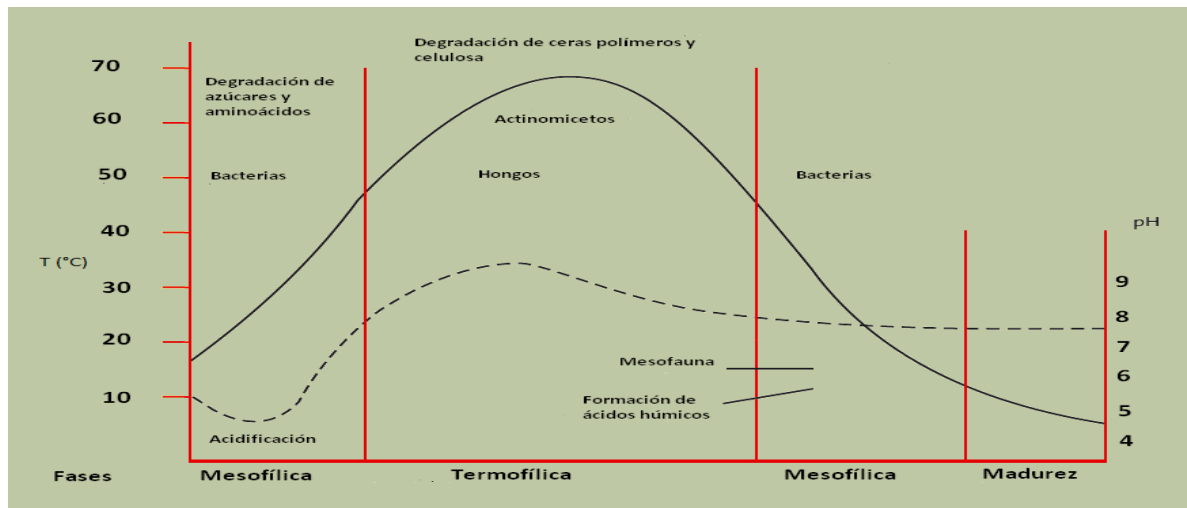


Figura 3. Descripción gráfica de las cuatro fases del proceso de compostaje (Mustin, 1987; Laos, 2003).

2.3.1. Fase Mesofílica I

El material comienza el proceso de compostaje a temperatura ambiente para aumentar hasta los 45°C. Este aumento de temperatura es debido a la actividad microbiana, ya que en esta fase los microorganismos utilizan las fuentes sencillas de C y N generando calor, donde la descomposición de compuestos solubles, como azúcares, produce ácidos orgánicos y, por tanto, el pH disminuye hasta cerca de 4.0 o 4.5. Esta fase es de corta duración, aproximadamente de entre dos y ocho días (FAO, 2013).

2.3.2. Fase Termofílica

Cuando el material alcanza temperaturas mayores a los 45 °C, los microorganismos que se desarrollan a temperaturas medias (microorganismos mesofílicos) son reemplazados por aquellos que crecen a mayores temperaturas de 60 °C (bacterias termofílicas), que en su mayoría son bacterias que actúan facilitando la degradación de fuentes más complejas de carbono, como la celulosa y la lignina. Además, estos microorganismos transforman el nitrógeno en amoníaco por lo que el pH del medio aumenta. Esta fase puede durar desde unos días hasta meses, dependiendo del material inicial, de las condiciones climáticas, el lugar, entre otros factores. Esta fase también recibe el nombre de fase de esterilización o higienización, ya que el calor generado destruye bacterias y contaminantes de origen fecal como *Escherichia coli* y *Salmonella spp.* Igualmente, esta fase es importante pues las temperaturas por encima de los 55 °C eliminan los quistes y huevos de helminto, esporas de hongos fitopatógenos y semillas de malezas (FAO, 2013).

2.3.3. Fase Mesofílica II o de Enfriamiento

Agotadas las fuentes de carbono y del nitrógeno en el material en compostaje, la temperatura desciende nuevamente hasta los 40 – 45 °C. Durante esta fase continúa la degradación de polímeros como la celulosa, y aparecen algunos hongos visibles a simple vista. A temperaturas menores a los 40 °C, los organismos mesofílicos reinician su actividad y el pH del medio desciende levemente, aunque se mantiene ligeramente alcalino. Esta fase de enfriamiento requiere de varias semanas y puede confundirse con la fase de maduración (FAO, 2013).

2.3.4. Fase de Maduración

En esta última fase, los componentes que se han degradado y que son más sencillos, derivados de la celulosa y la lignina, se combinan entre ellas, formando macromoléculas. Estas macromoléculas, mediante la composición bacteriana, producen reservas de nitrógeno de mediano a largo plazo. Además, se degradan algunos ácidos orgánicos (fitotóxicos) producidos en la fase termofílica (Fundación-Terra, 2003; O’Ryan-Herrera y Riffo-Prado, 2007).

Al final de esta etapa, una parte del nitrógeno amoniacal se transforma en nitratos, los cuales mejoran las características agrícolas del compost, dado que éstos son los compuestos que asimilan las plantas. Además, el material se oscurece y apenas produce olor alguno a causa de las transformaciones de la materia orgánica (Fundación-Terra, 2003). La maduración puede demorar meses a temperatura ambiente, durante los cuales se producen reacciones secundarias de condensación y polimerización de compuestos carbonados para la formación de ácidos húmicos y fúlvicos (FAO, 2013).

2.4. Vermicompostaje o Lombricompostaje

El vermicompostaje (del latín *vermis*, es decir, gusano), es el proceso en el cual se utilizan lombrices para acelerar la digestión de los compuestos orgánicos en descomposición presentes en la composta, las cuales son ayudadas por otros microorganismos. El producto obtenido es conocido como humus, que es un material homogéneo, orgánico y oscuro, que se utiliza como fertilizante orgánico de las plantas (Fundación-Terra, 2007).

Las especies de lombrices que se utilizan para vermicompostaje son especies europeas que se cultivan para vivir adaptadas (cautiverio) a los espacios pequeños y a condiciones ambientales determinadas (Fundación Terra, 2007).

2.4.1. Humus de Lombriz

El humus de lombriz (Figura 4) es un abono orgánico que contiene nutrientes disponibles para las plantas y el suelo. Es el resultado de la ingesta y digestión de la materia orgánica degradada por las lombrices de tierra. Este producto presenta un color marrón a negruzco, no presenta olores desagradables y tiene apariencia granular (INIA, 2008).



Figura 4. Humus de lombriz. (Tecnología Aplicada, 2009)

Las ventajas del humus de lombriz son:

- Es un abono orgánico que no daña el ecosistema y reduce el uso indiscriminado de fertilizantes químicos.
- Aporta nutrientes minerales para las plantas (nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, etc.)
- Al aplicarse a las plantas éstas se desarrollan más robustas y resistentes a las enfermedades y cambios bruscos de las condiciones ambientales.
- Mejora tanto la estructura como la aireación del suelo y mantiene la humedad por mayor tiempo.
- Recupera la fertilidad de los suelos pobres, degradados o erosionados.

2.4.2. Lombriz roja de California *Eisenia foetida*

De todas las especies de lombrices, el gusano más utilizado para llevar a cabo el proceso de vermicompostaje doméstico es la especie *Eisenia foetida* (Figura 5), popularmente llamado gusano tigre o lombriz roja de California. Se encuentra de modo natural en el compost y en las capas más superficiales de la hojarasca. Son de tamaño pequeño, de color rojo oscuro, se reproduce muy

rápidamente y pueden procesar grandes cantidades de materia orgánica (similar a su propio peso), aunque normalmente cada lombriz procesa más o menos la mitad de su peso cada día. Son más pequeñas y necesitan más materia orgánica que las lombrices que comúnmente se encuentran en la tierra (*Lumbricus terrestris*) (Fundación-Terra, 2007).

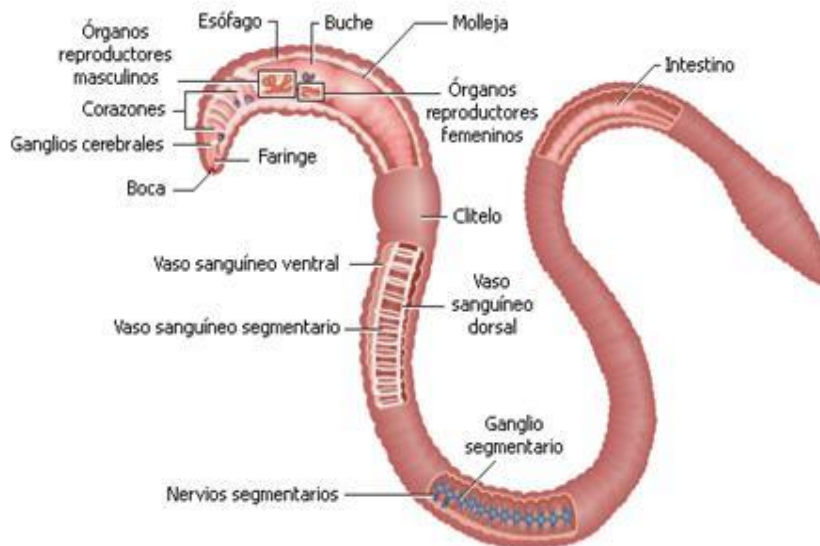


Figura 5. Anatomía de la lombriz roja de California (*Eisenia foetida*) (Fundación Terra, 2007).

El tamaño de las lombrices durante su etapa adulta generalmente varía de los 4 cm hasta los 2 m de longitud dependiendo de la especie, aunque en promedio miden entre 10 y 20 cm, con un diámetro de 2 a 6 cm (Edwards y Loftly, 1997).

Se puede describir la anatomía de la lombriz como un tubo dentro de otro tubo separado por una cavidad (celoma), el tubo interior constituye el sistema digestivo y el exterior, que es segmentado, forma la superficie de su cuerpo. Está protegido de la desecación por una delgada cutícula transparente que es resultado de un moco que también sirve para mantener húmeda la superficie y que es secretado por células epidérmicas. Como no presenta un sistema

respiratorio desarrollado, el intercambio de gases se hace a través de su cutícula epidérmica por lo que se debe mantener húmeda con la secreción de este moco. La molécula encargada de intercambio y distribución de gases es la hemoglobina (Solomón-R. *et al.*, 1996).

En la lombriz, al haber movimientos peristálticos, además de flora y fauna digestivas, los excrementos salen enriquecidos en urea, calcita, fosfato, sodio, potasio, etcétera, y con gran cantidad de hongos y bacterias, estando la composición química y estructura de este desecho fuertemente determinada por la calidad del alimento que consume (Edwards y Loftly, 1977).

En general, las lombrices juegan un papel clave en el funcionamiento de los ecosistemas naturales, ya que participan en la degradación de la materia orgánica y por consecuencia la mineralización del nitrógeno en el suelo (se les atribuye un 20% del total presente en suelos), reciclando las hojas muertas y otros materiales orgánicos, para convertirlos en nutrientes que pueden utilizar las plantas y los árboles, por lo que su uso ha generado interés en la biotecnología; además, al desplazarse remueven la tierra y airean el sustrato. Así, tanto en el entorno forestal como agrícola, la presencia de lombrices y otros anélidos, es básica para la fertilidad de la tierra (García-Pérez, 2006; Fundación-Terra, 2007).

2.4.3. Condiciones Óptimas del Cultivo de Lombriz

La abundancia de las lombrices es fuertemente influenciada por la cantidad de materia orgánica en el suelo y las condiciones climáticas, así que su población puede ser indicadora de la fertilidad de éste. Suponiendo que cada lombriz

adulta tiene un peso promedio de 0.5 g, el peso de estos animales sería 22 500 kg por hectárea; para que este número se mantenga, es necesaria una aplicación constante al suelo de materia orgánica y cantidades óptimas de humedad, ya que la lombriz siempre debe tener alimento y mantener su cuerpo húmedo para poder sobrevivir, por lo que son abundantes en clima templado húmedo, pero casi inexistentes en praderas áridas. Sin embargo, pueden tolerar el exceso de humedad e incluso condiciones de inundación, pero son más sensibles a condiciones de sequía, por lo que algunas especies no toleran la escasez de agua y emigran a profundidades mayores en busca de humedad; si no la encuentran, pueden fallecer o en algunos casos desarrollar un estado de latencia llamado diapausa, por lo que enrollan su cuerpo y lo cubren con una capa de mucosidad (García-Pérez, 2006).

En general, las lombrices sobreviven mejor en suelos ligeramente ácidos que alcalinos, y dependiendo de la especie, pueden tolerar un valor de pH que varía entre 4 y 8, por lo que su abundancia disminuye fuera de estos valores. Pueden tolerar las temperaturas normales del suelo, además de sobrevivir a temperaturas bajo cero e incluso en suelos congelados. Restringen notablemente su actividad a los 30°C, aunque prefieren valores a menos de 25°C con un óptimo entre 10 y 15°C dependiendo de la especie (García-Pérez, 2006).

2.4.4. Enriquecimiento del “compost” Debido a la Acción de la Lombriz

El interés en la biotecnología de la lombriz, es motivado por su hábito alimenticio basado en el consumo de materia orgánica y de los microorganismos relacionados con ella, que al introducirla en el suelo y pasarla por su tracto digestivo, puede dar como resultado un producto con

características de alta fertilidad, dependiendo del tipo de sustrato utilizado (Solomón-R. *et al.*, 1996).

Además de las virtudes mencionadas anteriormente, las lombrices son capaces de degradar compuestos complejos como pesticidas y fertilizantes químicos. Dependiendo de su especie, pueden ser capaces de modificar la biodisponibilidad de algunos metales pesados en los sustratos, como el Zn, Cu, Ni, Pb, etc., sin embargo, cuando las lombrices son utilizadas en sitios contaminados con altas concentraciones de metales pesados, éstos pueden bioacumularse en sus tejidos, lo que afectaría a sus consumidores como aves y reptiles (Jouquet *et al.*, 2014).

2.4.5. Lixiviado o Té de Compost

El lixiviado o *té* de compost, es la solución resultante de la fermentación anaeróbica de la composta en agua, la cual puede utilizarse como fertilizante, ya que contiene nutrimentos solubles y microorganismos benéficos (Ingham, 2005). Esta solución puede ser aplicada a través de sistemas de riego presurizado, por lo que su uso, puede adaptarse a sistemas de producción orgánica de cultivos bajo condiciones de invernadero (Preciado *et al.*, 2010).

El lixiviado o *té* de compost se utiliza en la agricultura con dos objetivos principales: la adición de nutrientes y la supresión de enfermedades, fundamentalmente para inhibir el crecimiento de hongos. En las superficies tratadas, el lixiviado o *té* de compost, actúa rápidamente sobre el control de patógenos durante un corto plazo; por el contrario, los “compost” sólidos actúan más lentamente, pero durante un largo periodo de tiempo (Labrador, 1996).

En general, el uso del lixiviado o *té* de “compost” y lombricomposta, aporta los

siguientes beneficios (López, 2003):

- Supresión de enfermedades
- Proporciona nutrientes para las plantas y alimentos para los microorganismos
- Mejora el crecimiento de las plantas
- Reduce a los trabajadores a las exposiciones a daños químicos
- Reduce los impactos negativos que tienen los productos químicos sobre los organismos benéficos en el ecosistema

2.5. Materiales con Alto Contenido de Carbono

Algunos de los materiales con alto contenido de carbono son las hojas, recortes de césped, paja y aserrín; los cuales compostean eficientemente sin producir malos olores, proporcionando generalmente una relación carbono/nitrógeno arriba de 200:1. Los microorganismos que descomponen madera, requieren cantidades muy altas de nitrógeno, por lo que se pueden complementar muy bien con residuos de frutas, verduras o pescado. Los materiales de madera también son lo suficientemente rígidos para proveer una separación entre los materiales de la pila de composta, lo que favorece un aumento en la aireación del sistema (Hudson, 2008). Este tipo de material se puede conseguir de manera sencilla, ya que generalmente al material resultante de la poda de árboles y arbustos no se le da uso.

2.6. Efectos de la Aplicación del “compost” y Humus de Lombriz

El “compost” provee nutrientes y altas poblaciones microbianas benéficas, lo que permite un incremento de la actividad biológica del suelo (Labrador, 2001). Por otro lado, el humus proviene de la transformación los desechos orgánicos en compuestos estables, en donde la lombriz Roja de California presenta mejores características de adaptación y producción (Santamaría-Romero *et al.*, 2001; Soto y Muñoz, 2002; Martínez *et al.*, 2002).

Ambos procesos biotecnológicos (compostaje y vermicompostaje), son excelentes para elaborar abonos agrícolas y que en el caso del humus, el material obtenido se considera enriquecido tanto química como biológicamente por la actividad de las lombrices y por la dinámica microbiana y bioquímica que se establece durante el proceso (Ferrera y Alarcón, 2001). Cuando las lombrices se alimentan de los residuos orgánicos, ingieren una amplia gama de materiales alimenticios, incluyendo bacterias, hongos, protozoarios y nematodos (Atiyeh *et al.*, 2000). Algunos patógenos no sobreviven al compostaje y vermicompostaje, ya que contienen enzimas y hormonas que estimulan el crecimiento de las plantas e impiden su proliferación (Gajalakshmi *et al.*, 2001; Nogales *et al.*, 2005).

El compost se puede aplicar semimaduro (en fase mesofílica II) o ya maduro. El compost semimaduro tiene una elevada actividad biológica y el porcentaje de nutrientes fácilmente asimilables para las plantas, es mayor que en el compost maduro. Por otro lado, al no tener un pH estable (tendiendo a la acidez), puede afectar negativamente a la germinación, por lo que este compost no se usa para germinar semillas, ni en plantas delicadas. La aplicación en horticultura del compost semimaduro es normalmente una aplicación de primavera de 4–5 kg/m² en el terreno previamente labrado (coliflor, apio, papa, etc.). En cultivos extensos, la aplicación es de 7 a 19 ton/ha de compost. El compost maduro se

utiliza en gran medida para plántulas, jardineras y macetas; se suele mezclar (20-50%) con tierra y otros materiales como turba y cascarilla de arroz (FAO, 2013).

2.7. Fertilizantes orgánicos en México

La agricultura orgánica no sólo se limita a fertilizar con abonos orgánicos el suelo, también crea conciencia para cambiar el modo de operar. Este cambio se puede presentar cuando se utilizan los recursos disponibles para producir agro-insumos propios, impactando lo menos posible al entorno, y no poniendo en riesgo la salud de los productores y consumidores (Félix-Herrán *et al.*, 2008)..

Los fertilizantes o abonos orgánicos más adecuados incluyen los estiércoles, compostas, vermicompostas, abonos verdes, residuos de las cosechas, residuos orgánicos industriales, y sedimentos orgánicos. Estos compuestos varían en sus características físicas y en su composición química, principalmente en el contenido de nutrimentos, por lo que su aplicación constante mejora las características físicas, químicas, biológicas y sanitarias del suelo. Sin embargo, la mayoría de estos productos no hacen referencia a normas para compostas y humus, por lo que su calidad puede variar de acuerdo a las condiciones en el proceso con las que haya sido elaborado.

En México existen dos documentos que regulan la calidad del compost y humus generado a partir del proceso de compostaje. La norma técnica ambiental NTEA-006-SMA-RS-2006 fue elaborada para poder manejar y reducir adecuadamente la cantidad de residuos generados, principalmente los domésticos, buscando poder crear mejoradores de suelos completamente orgánicos a partir del proceso de compostaje (NTEA, 2006).

La Norma Mexicana NMX-FF-109-SCFI-2007 define el abono orgánico obtenido por medio del proceso de compostaje, enriquecido con la materia orgánica producida por las lombrices; además establece los métodos de evaluación de distintos parámetros físico-químicos para la calidad final del producto (humus) que se comercializa en territorio nacional (NMX, 2007).

III. JUSTIFICACIÓN

El manejo de residuos orgánicos es una tarea difícil pero imperativa, ya que este material genera focos de infección, contamina acuíferos, degenera la calidad de los suelos, genera dióxido de carbono y además produce malos olores.

En la ciudad de Guaymas, Sonora se generan una gran cantidad de desechos orgánicos de diversos orígenes, incluyendo los residuos de la pesca, que es la actividad económica predominante por ser puerto pesquero. Estos residuos pueden ser mezclados con materiales de alto contenido de carbono (residuos de la poda de jardines) que pueden ser aprovechados para su transformación en el proceso de compostaje para poder obtener un producto natural (abono orgánico), que ayude a suministrar los nutrientes necesarios a los suelos, contribuyendo con ello a disminuir el uso de fertilizantes químicos.

IV. HIPÓTESIS

Los procesos de compostaje realizados a partir de residuos de la industria pesquera y que se lleven a cabo de manera natural, con asistencia de bacterias comerciales o con lombriz roja de California (*Eisenia foetida*) producen compost y humus con la calidad que establece la normatividad mexicana para este tipo de productos.

V. OBJETIVOS

5.1 Objetivo General

Evaluar la calidad de los productos obtenidos del proceso de compostaje elaborado a partir de residuos de pescado y compararlos con las normas mexicanas vigentes para abonos orgánicos.

5.2 Objetivos Específicos

a) Realizar el compostaje por el método de aireación mecánica a partir de cuatro tipos de residuos (tratamientos):

- Residuos de la pesca.
- Residuos de la pesca adicionando bacterias comerciales.
- Residuos de la pesca y tratamiento posterior con lombriz roja de California.
- Residuos vegetales.

b) Determinar si las propiedades físico-químicas y microbiológicas del compost generado de todos los tratamientos, cumplen con las normas mexicanas vigentes para compost y humus de lombriz.

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Obtención de Datos de Generación de Residuos de la Pesca y Residuos Vegetales en Guaymas, Sonora

Para poder conocer qué cantidad aproximada de residuos vegetales y pesqueros se generan en Guaymas, Sonora, se aplicó una encuesta (Anexo 1) en plantas pesqueras y restaurantes de la ciudad.

6.2. Componentes a Utilizar para el Compostaje

Los materiales que se utilizaron para el proceso de compostaje, fueron seleccionados en base a sus contenidos de nitrógeno (N) y carbono (C). Los valores de estos nutrientes (Tabla 1) fueron tomados de fuentes bibliográficas (O’Ryan-Herrera y Riffo-Prado, 2007; USDA, 2010).

Tabla 1. Porcentajes de carbono (C) y nitrógeno (N) contenidos en los diferentes productos utilizados para el compostaje.

Material	%Nitrógeno (peso seco)	% Carbono (peso seco)	% Humedad
Estiércol de vaca	2.4	45.6	81.0
Residuos de vegetales	2.7	51.3	87.0
Paja de trigo	0.4	50.8	12.0
Aserrín	0.24	100	39.0
Residuos de pesca	10.6	38	76.0

6.2.1. Procedimiento de Formulación para los Diferentes Tratamientos de las Pilas de Compostaje

Para obtener la cantidad (en kg) del material a utilizar durante el composteo (formulación) se utilizó una plantilla en Excel, desarrollada en el Laboratorio de Ciencias Ambientales (LCA) de CIAD Guaymas, en la cual se combinaron diferentes cantidades de los materiales. El objetivo era obtener un porcentaje de humedad en el rango del 40 al 60% y una relación C/N entre 25 y 30, los cuales se consideran ideales para este tipo de procesos. A continuación se describe el llenado de datos en la plantilla:

1. Se registra el contenido de carbono y nitrógeno de los materiales que se van a utilizar.
2. Se prueba con distintas combinaciones de los pesos (kg) de los materiales.
3. La plantilla realiza los cálculos para la relación C/N. En cuanto se obtiene un valor adecuado de C/N se detienen las pruebas de peso y se utilizan esos valores.

Para obtener los cálculos, la plantilla transforma el peso total del material a peso seco (kg) y divide el contenido de carbono entre el contenido de nitrógeno, obteniendo así la relación C/N (Tabla 2). Los cálculos de la plantilla se muestran en el Anexo 2.

Tabla 2. Plantilla de materiales a utilizar en compostaje con la relación C/N y humedad para 100 Kg de desechos de pescado.

Material	%N (peso seco)	% C (peso seco)	% Humedad	Peso seco del material (%)	N kg (peso seco)	C kg (peso seco)	Humedad (kg)	Peso kg	% del peso
Estiércol de vaca	2.4	45.6	81	19.00	2.28	43.32	405.00	500	50
Residuos de pescado	10.6	38.00	76	24.00	2.54	9.12	76.00	100	10
Paja de trigo*	0.7	56	12	88.00	2.16	172.48	42.00	350	35
Aserrín	0.24	100	39	61.00	0.073	30.50	19.50	50	5
Suma					7.05	255.42	542.50	1000	100

Relación		
C/N	36.21	(25-30 ideal)
Humedad	54%	(40-60 % ideal)

*Paja de trigo: En este caso se utilizó zacate Buffel seco que se cortó de la orilla de la carretera aledaña al sitio de compostaje.

6.2.2. Componentes de las Pilas

Para todos los tratamientos se utilizaron 500 kg de estiércol de vaca, 50 kg de aserrín y diferentes cantidades de rastrojo (zacate Buffel seco) y residuos de pescado o vegetales. La composición final de las pilas de compostaje se enlista

en la Tabla 3, dos de ellas con residuos vegetales obtenidos por distinta variedad de frutas y verduras (lechuga, tomate, naranjas, cebollas, etc.) (100 y 150 kg), y las diez restantes con residuos de pesca (50, 100 y 150). Se incluyó un duplicado del tratamiento B2 (B4) ya que en el momento de armar cada pila, quedó disponible residuo de pescado y se decidió aprovecharlo, lo cual causó una desalineación en las pilas de desechos vegetales, teniendo solamente dos tratamientos (los mencionados anteriormente de 100 y 150 kg) cuando al inicio fueron considerados tres como en los desechos de pescado (50, 100 y 150 kg).

Tabla 3. Cantidades requeridas para llevar a cabo la formación de las pilas de compostaje.

Tratamiento	Subtratamiento	kg de rastrojo	kg de vegetales/ pescado
Desechos vegetales	CV2	350	100
	CV3	300	150
Desechos Pescado	CP1	400	50
	CP2	350	100
	CP3	300	150
Desechos de pescado con Bacterias comerciales^a	B1	400	50
	B2	350	100
	B3	300	150
	B4	400	100
Desechos de pescado con Lombriz Roja de California^b	L1	400	50
	L2	350	100
	L3	300	150

Nota: todas las pilas tuvieron 500 kg estiércol + 50 aserrín

^a* 0.4 kg de bacterias comerciales en cada pila

^b* 15 kg de lombriz roja de California para cada pila posterior a la etapa de maduración

6.3. Obtención del Material

Con base en los datos obtenidos en las encuestas, se determinaron los lugares en los cuales se obtuvieron los dos tipos de residuos. Los desechos vegetales (lechugas, tomates, naranjas, cebollas, etc.) fueron obtenidos en la frutería “El nuevo vergelito” en Guaymas, Sonora, ubicada en la Calzada García López y calle 10, ya que este establecimiento tenía mucho residuo disponible que iba a ser desechado como basura. El residuo de pescado (sardina crinuda entera *Opisthonema libertate*) fue donado por la planta Productos Pesqueros de Guaymas para la realización de este proyecto, ya que en el momento de necesitar los residuos, fue la única de las pesqueras o comercios visitados que tenía este tipo de residuos en las cantidades suficientes.

El aserrín se obtuvo de distintas madererías localizadas en el centro de la ciudad de Guaymas, Sonora. El rastrojo se obtuvo de la poda de zacate Buffel en las inmediaciones del sitio de composteo y el estiércol de vaca fue obtenido en el rancho Fátima, localizado en carretera a Ortiz del valle de Guaymas.

El producto comercial conteniendo las bacterias que se utilizaron como aceleradoras del proceso de compostaje (tratamientos B1, B2, B3 y B4) fue un consorcio biológico, Solibac Compost ® lote E2012076. Estos cultivos bacterianos fueron activados previamente mediante oxigenación, para lo cual, 200 g de cultivo/m³ se hidrataron en 3 litros de agua potable y fueron mantenidos bajo burbujeo con aire constante durante 12 horas (Figura 6).



Figura 6. Preparación del inóculo de bacterias comerciales.

Las pilas seleccionadas fueron mantenidas en reposo durante una semana y re-inoculadas, hasta cubrir la cantidad especificada de 400 g/m^3 para cada pila, según las especificaciones del proveedor. Para garantizar el óptimo desempeño del inóculo, las pilas se mantuvieron entre 30 y 40% de humedad realizándose aireaciones con lapsos mínimos de 15 días (BASA, 2009).

Las lombrices fueron obtenidas del cultivo que se encuentra en las instalaciones de CIAD, Guaymas, contando con 15 kg disponibles para poder inocular en cada cama de vermicompostaje entre huevos, juveniles y adultos.

6.4. Volteos, Riegos y Muestreos

Durante el proceso de compostaje inicialmente se realizaron siete volteos de las 12 pilas para mezclar los componentes, utilizando para ello una retroexcavadora, posteriormente este proceso se realizó cada 10 días aproximadamente, hasta finalizado el proceso.

Los riegos se llevaron a cabo en los días de volteos (Figura 7), para lo cual se expandieron las pilas hasta formarlas como cazuelas, favoreciendo así la absorción de humedad. Se realizaron tres riegos principales al inicio del proceso, y los dos siguientes cada 15 días, para lo cual se utilizaron pipas de 10 000, 7 000 y 4 000 litros en cada ocasión respectivamente, debido a que en las fechas de inicio del proceso (finales de octubre) las condiciones de temperaturas ambientales todavía eran altas (aproximadamente 40°C). Sin embargo, cuando comenzó a bajar la temperatura ambiental, los regados se realizaron diariamente con una manguera casera que se alimentaba con agua de un tinaco de 1 100 L, el cual inicialmente se consumía completamente cada dos días, y posteriormente se realizaron los riegos cada tercer día, hasta una o dos veces por semana ya que la humedad en las pilas se mantuvo cada vez más constante.



Figura 7. Riegos realizados al inicio del proceso de compostaje

Los muestreos de cada pila de tratamiento comenzaron cinco días después de iniciar el proceso de compostaje, ya que era necesario permitir el acondicionamiento de los materiales. Las muestras se tomaron de tres niveles de cada pila (inferior, centro y superior), y en cada uno de ellos se tomaron

muestras de 5 puntos (simulando las esquinas de un cuadrado) y el centro (Figura 8). Todo el material se extrajo con una pala, se homogenizó y se tomó una muestra representativa de 1 kg en una bolsa de plástico resellable. El resto del material se regresó a su respectiva pila (Muñoz, 2004).



Figura 8. Forma de realizar el muestreo en pilas de compostaje

6.5. Inoculación de Lombriz Roja

En los tratamientos L1, L2 y L3 se adicionó la lombriz roja de California (*Eisenia foetida*) cuando las pilas llegaron a la etapa de maduración. A partir de ese momento se prosiguió el proceso de lombricompostaje por dos meses más, tiempo en el cual cada composta se depositó en mesas alargadas (lechos o camas) (Figura 9). Se tomó una muestra del lixiviado o *té* de humus el cual se obtuvo mediante 3 lavados del material de cada lecho consistentes cada uno en un riego de 20 min, el lixiviado se dejó reposar 24 horas para que se dé un proceso de fermentación, y al cabo de este tiempo se colectó la muestra.



Figura 9. Inicio del lombricompostaje.

6.6. Seguimiento del proceso de compostaje

Durante el proceso de compostaje se realizaron monitoreos diarios de temperatura utilizando un termómetro digital DT801, los cuales generalmente se realizaban a las mismas horas de la mañana. Además, se realizaron 7 volteos de las pilas por medio de máquinas retroexcavadoras, el primero a los 5 días del inicio del proceso, y los 6 restantes cada 15 días junto con los riegos.

6.6.1. Análisis Químicos de las Muestras

Los análisis para los distintos tratamientos que son desechos de pescado (CP), vegetales (CV), desechos de pescado con bacterias comerciales (B) y desechos de pescado con lombriz roja de California (L), se muestran en la

Tabla 4. En la primera parte, el tratamiento “L” aún no contaba con la presencia de la lombriz en el compost, tomándose una única muestra representativa del tratamiento en la segunda parte (después de la maduración).

Tabla 4. Periodos de muestreo para los tratamientos que comprendieron el proceso de compostaje.

Tratamientos	Por muestreo	Inicio y /o Final
CV, CP, B, L (antes de inocular la lombriz roja)	Humedad, pH, materia orgánica, relación C/N	- Metales pesados (Cd, Cu, Fe, Hg, Zn) - Microbiológicos (Coliformes fecales y <i>Salmonella</i> spp.)
L (después de inocular la lombriz roja)	Humedad, materia orgánica, nitrógeno, relación C/N	-

6.6.2. Materia Orgánica

La muestra se pesó en crisoles de porcelana (entre 5 y 10 g) con su respectivos duplicados, las cuales tuvieron un periodo de secado a 105°C de 4 horas en una mufla (Lindberg Blue M, San Francisco CA), posteriormente fueron enfriadas en un desecador, para tomar el peso seco de las muestras y se llevaron a 400°C durante 4 horas. Posteriormente se enfriaron y pesaron, para en base a ello calcular el porcentaje de materia orgánica (J-Benton, 2001).

6.6.3. Humedad

Las muestras se pesaron por duplicado en crisoles de porcelana (entre 5 y 10 g) y se secaron a 105°C en una mufla (Lindberg Blue M, San Francisco CA) durante 4 horas. Posteriormente se enfriaron y se llevaron a peso constante, para calcular por diferencia de peso el porcentaje de humedad (J-Benton, 2001).

6.6.4. Nitrógeno

La extracción de nitrógeno se realizó por medio de la agitación mecánica, para lo cual, a las muestras duplicadas, se les añadió cloruro de potasio 2M, para posteriormente realizar el procedimiento de lectura de nitrógeno con sus respectivos reactivos, en un espectrofotómetro Lamotte, serie LMR1006059 (J-Benton, 2001).

6.6.5. pH

Para la medición del pH se tomaron 50 g de muestra de composta a los cuales se les adicionó 50 mL de agua destilada (proporción 1:1) y se agitó por 5 segundos y dejándose reposar durante 10 minutos. La lectura se realizó en un equipo Denver Instrument, Ultra basic, Modelo UB-10 previamente calibrado, cuidando que la punta del electrodo quedara en la interface de la suspensión de agua-composta (J-Benton, 2001).

6.6.6. Análisis Microbiológicos

En una superficie estéril se realizó la separación de la cantidad de la muestra de composta requerida para los análisis microbiológicos, homogenizando bien las muestras y tomando de distintos niveles de la bolsa o contendor.

6.6.6.1. *Salmonella* spp. Para este análisis se siguió la metodología descrita en la NOM-114-SSA1-1994 (DOF, 1995), para lo cual se pesaron 25 g de cada muestra en una balanza modelo BP 3100P y se homogenizaron con 225 mL de caldo lactosado, las cuales se incubaron en incubadora WR Scientific Modelo 1535 serie 0701194 durante 24 horas a 35°C. A partir de este cultivo pre-enriquecido, se inoculan medios de enriquecimiento (caldo de tetrionato y caldo selenito cistina) y posteriormente placas con agares selectivos xilosa lisina desixicolato, verde brillante y agar sulfito de bismuto, los cuales son sometidos a su respectiva incubación bajo las condiciones anteriormente mencionadas. Se busca la presencia de colonias típicas en base a características específicas en cada agar selectivo y se realizan las pruebas bioquímicas correspondientes para confirmar la presencia o ausencia de *Salmonella* spp.

6.6.6.2. Coliformes fecales. Los coliformes fecales se determinaron de acuerdo al Bacteriological Analytical Manual de la FDA (FDA, 2011). A partir de 50 g de muestra se prepararon diluciones decimales en buffer fosfato, para posteriormente inocular tubos de cultivo conteniendo 10 mL de caldo laurilriptosa, los cuales se incubaron en incubadora Jovan Modelo 1535 serie 0701194 durante 48 horas a 35°C. Se tomó crecimiento de cada uno de los tubos positivos (desplazamiento de gas y turbidez) se pasaron a tubos de cultivo conteniendo 10 mL de caldo EC, los cuales se incubaron 48 horas a 45.5°C en un baño de coliformes modelo 253 serie 699101440. Posteriormente

se revisaron y se tomó el número de tubos que presentaron desplazamiento por producción de gas y turbidez y calculando por combinación de los tubos positivos el número más probable (NMP/g) de bacterias coliformes fecales en las tablas correspondientes. (FDA, 2011).

6.6.7. Determinación de Metales

La determinación de metales traza se llevó a cabo por duplicado de cada muestra. La metodología que se siguió en general fue la digestión de la muestra de compost y su posterior análisis en un espectrofotómetro de absorción atómica Perkin-Elmer modelo 1100 B. Para la medición de cadmio (Cd) y cobre (Cu), zinc (Zn) y hierro (Fe) se utilizó el método de flama aire-acetileno. Para mercurio (Hg) se utilizó el método de generación de vapor frío utilizando $K_2Cr_2O_7$ al 1% (p/v) y $SnCl_2$ al 5% (p/v) como oxidante.

Para cumplir con el control de calidad, se digirió una muestra, un blanco reactivo, un duplicado y una referencia certificada: (PACS-2: Sedimento marino) para metales pesados, proveniente del Consejo Nacional de Investigación de Canadá. En el Anexo 3 se incluye la metodología detallada de digestión de sedimento o suelos.

6.7. Análisis Estadístico

El proceso de compostaje se realizó sobre un terreno (15 x 15 m) ubicado en el

km 5 de la carretera al Varadero Nacional en Guaymas, Sonora, México. El diseño del experimento fue llevado a cabo en bloques completamente aleatorio, formándose y distribuyéndose las pilas de compostaje de manera uniforme (Figura 10) sobre el área del terreno establecido.

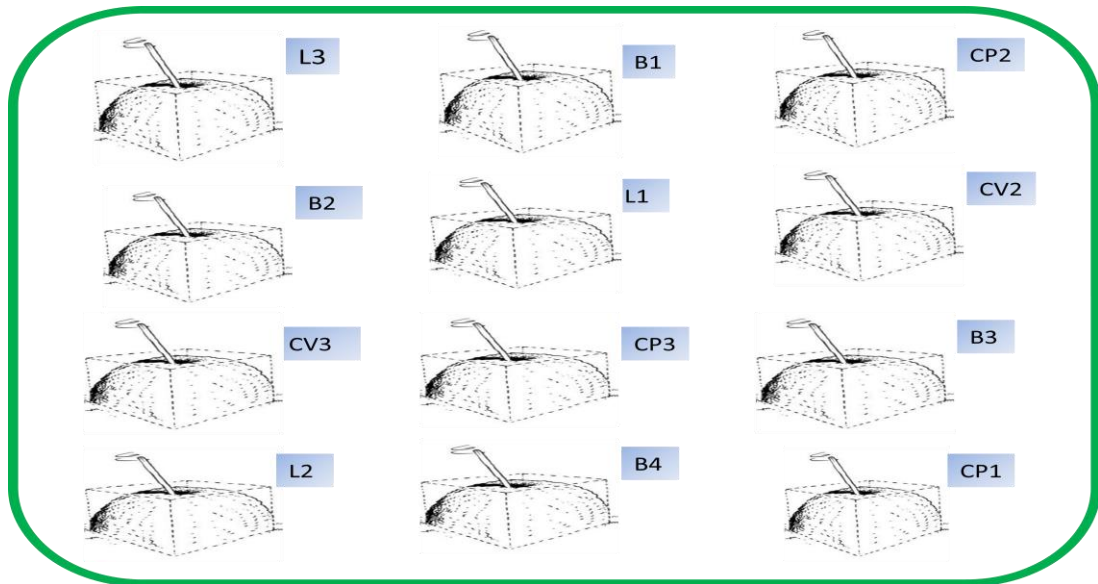


Figura 10. Configuración del diseño de experimentos para el proceso de compostaje (ver Tabla 4 para significado de claves).

Para los análisis de los resultados, se evaluó la normalidad de los datos utilizando la prueba de Goodness-of-fit para los datos de pH, humedad, materia orgánica, carbono y relación C/N; en los datos de temperatura y nitrógeno se usó estadística no paramétrica. Se compararon resultados de temperaturas entre los distintos tratamientos comparándose las 3 etapas del proceso (mesófila, termófila y maduración) utilizando la prueba Kruskal-Wallis. Las etapas se definieron en función del tiempo y el comportamiento de la temperatura promedio en el experimento.

En los parámetros de humedad, pH, materia orgánica, carbono y relación C/N, se utilizó la prueba de ANOVA de una vía para comparar los distintos

tratamientos, y la prueba de Tukey-Kramer HSD para identificar diferencias entre tratamientos. Finalmente para materia orgánica, carbono, nitrógeno total y relación C/N se compararon los valores iniciales contra los valores finales de los parámetros medidos durante los muestreos utilizando la prueba de t-Student para las distribuciones normales y la prueba de Wilcoxon Rank-Sum para las distribuciones no normales en el paquete JMP® 8.0 (SAS Institute).

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Producción de Residuos de Pescado y de Vegetales en Guaymas

En Guaymas, Sonora, existen diversos establecimientos que semanalmente generan una cantidad importante de residuos orgánicos (Tabla 5), los cuales podrían ser aprovechados.

En general, las plantas enlatadoras y productoras de aceite de pescado, generan cantidades muy bajas o nulas de desechos de pescado, ya que estas procesadoras aprovechan prácticamente toda la materia prima y sus residuos en la producción de harina de pescado. Las comercializadoras de pescados y mariscos establecidas, generan un mínimo de 1000 kg de pescado al mes, mientras que las comercializadoras no establecidas (ambulantes), generan aproximadamente 10 kg semanales de residuos de pescado, negocios que cada vez son más abundantes en la ciudad, por lo que esta cantidad pudiera aumentar. Además, actualmente está el proceso de la construcción de un mercado de mariscos, el cual busca concentrar a todos los comercios pesqueros ambulantes del puerto de Guaymas, Sonora.

Con respecto a los restaurantes de mariscos, se identificaron 7

establecimientos, los cuales generan entre 8 y 70 kg diarios de residuos orgánicos (incluidos los pesqueros), de los cuales, algunos proporcionan sus desechos a ranchos para la alimentación de cerdos. Los desechos generados por las fruterías son los que más se desperdician (desde 10 hasta 50 kg por semana), por lo que estas cantidades tan variables pero considerables, se podrían aprovechar para el proceso de compostaje.

Tabla 5. Generación semanal de residuos para los diferentes establecimientos en Guaymas, Sonora.

Establecimiento	Generación de residuo (kg/Semana)
Restaurantes/Fruterías (vegetales)	56 – 70
Restaurantes (vegetales /pescado)	140 – 490
Ambulantes	10 – 20
Comercializadoras	1000 - 2000 kg*
Plantas Enlatadoras/Harineras	100 kg (pasta)**

* dato obtenido por temporada

** dato obtenido por proceso

Se observó que los negocios de venta de alimentos no separan los residuos orgánicos de los inorgánicos, ya que toda la basura la disponen en los botes o bolsas que recoge el municipio. También se detectó que la cantidad generada de residuos de pescado no es constante, depende de la temporada, por lo que es complicado tener la certeza de la disposición de este recurso para una planta de compostaje. El ensilado de residuos de la pesca como insumo para el proceso de compostaje, pudiera ser una opción para mantener un inventario de este tipo de residuos todo el año, sin embargo, es necesario realizar más

investigación al respecto. En el caso de las plantas procesadoras de sardina, localizadas en el parque industrial pesquero de Guaymas, se observó que todo el residuo de pescado (vísceras, cabeza, aletas y escama) se manda a la quema para la producción de harina, por lo que hay poca oportunidad de utilizar estos residuos en el compostaje y tener otra opción de reciclaje de residuos orgánicos. Sin embargo, se detectó que durante la limpieza que se realiza en la planta enlatadora se generan hasta 100 kg de pasta de pescado que es mandada a la quema, la cual se podría aprovechar para el compostaje debido a que ya esta homogenizada, sin embargo, sería necesario una mayor comunicación o coordinación con las empresas para poder tener acceso a este material.

7.2. Resultados del Proceso de Compostaje

7.2.1. Temperatura

Durante el proceso de compostaje se observaron variaciones de temperatura (Figura 11), las cuales coinciden con las distintas etapas, iniciando con la etapa mesofílica I (28 a 40°C), la cual posteriormente aumentó hasta dar paso a la etapa termofílica que duró 18 días, alcanzando una temperatura clímax de 60°C, que fue disminuyendo gradualmente para llegar a la segunda etapa mesofílica y posteriormente a la etapa de madurez, donde se obtuvo la mayor estabilidad de temperaturas (25 a 34°C). El comportamiento en general muestra que los rangos de temperaturas alcanzados durante el proceso (de 28 a 60°C) fue lo que permitió la degradación adecuada de los componentes orgánicos.

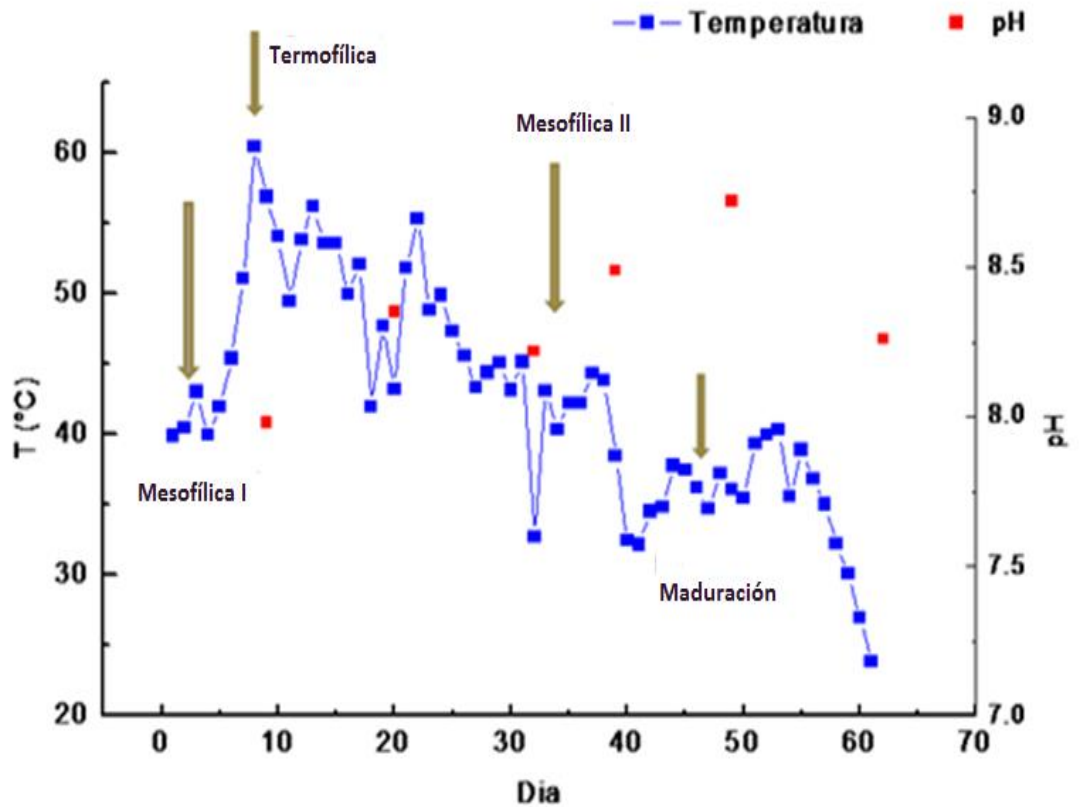


Figura 11. Cambios de temperatura y pH registrados durante el proceso de compostaje.

Se detectaron diferencias significativas entre la etapa de maduración, mesofílica y termofílica (Kruskal-Wallis Chi-square < 0.0001) (Figura 12), lo que confirma que se llevaron a cabo tres etapas o fases distintas durante el proceso de compostaje. Cabe mencionar que no se detectaron diferencias significativas entre la etapa mesofílica I y mesofílica II (Kruskal-Wallis Chi-square = 0.4751).

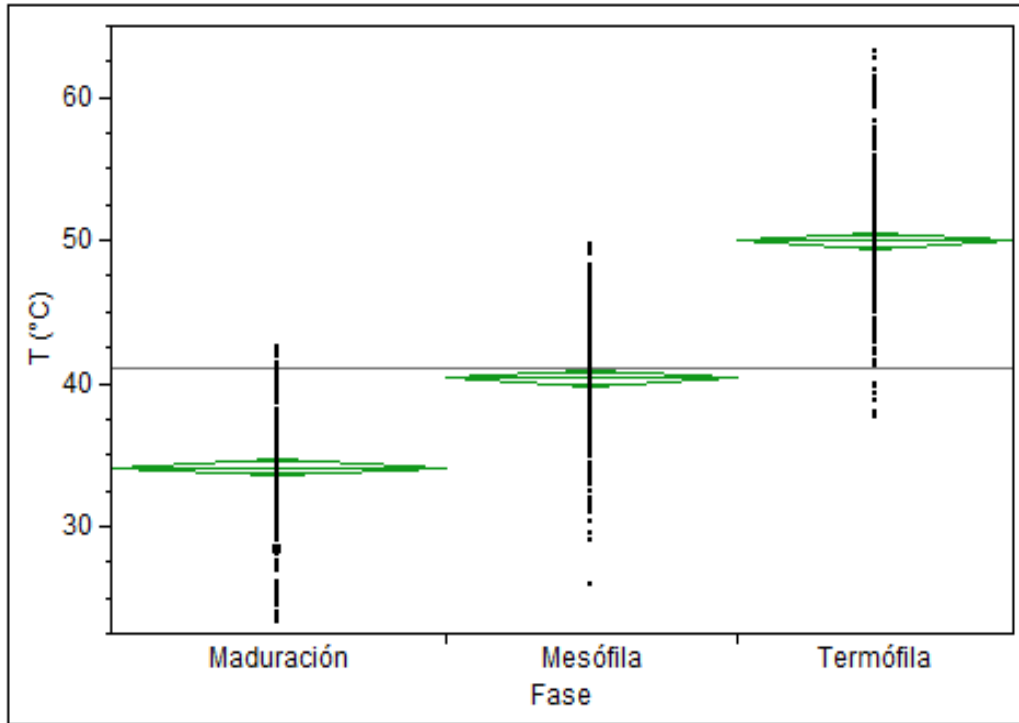


Figura 12. Comparación entre fases del proceso de compostaje con el programa JMP® 8.0.

Se realizó una comparación entre los tratamientos (residuos de pescado, residuo de pescado con bacterias y residuo de vegetal) y los subtratamientos (50, 100 y 150 kg) para cada fase del compostaje.

Primeramente en la etapa mesofílica, no existieron diferencias significativas entre los tratamientos (Kruskal-Wallis Chi-square = 0.0753) (Figura 13), pero si se detectaron diferencias entre subtratamientos (Kruskal- Wallis Chi-square = 0.0353), con mayor temperatura en el subtratamiento de 150 kg (Figura 14).

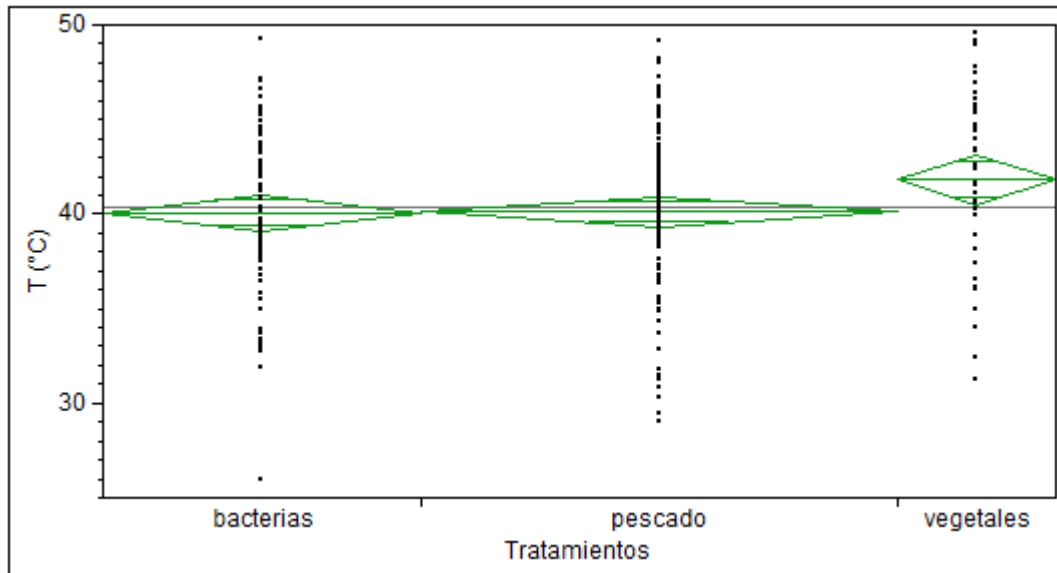


Figura 13. Comparación de fase mesofílica entre tratamientos con el programa JMP® 8.0.

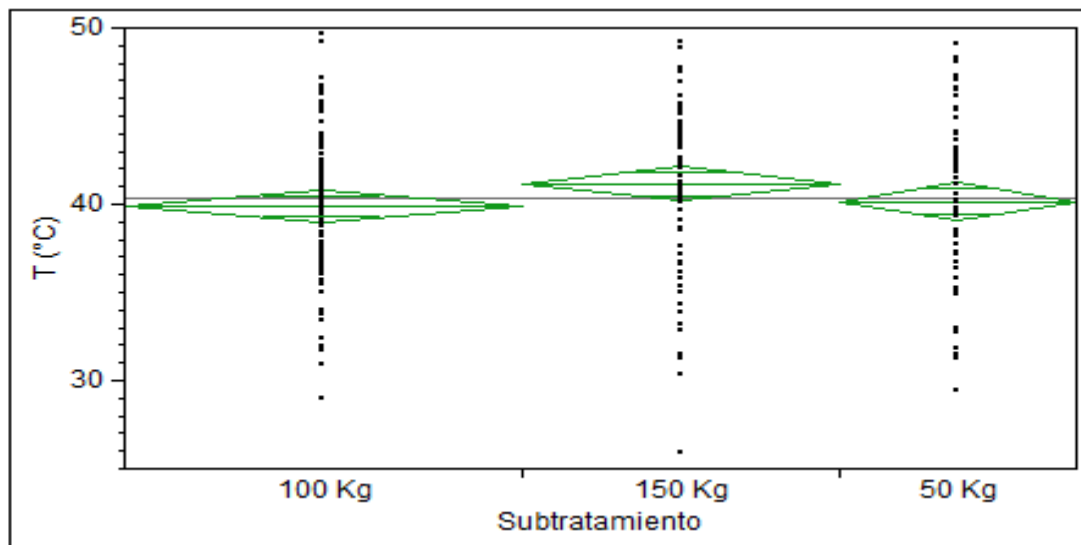


Figura 14. Comparación de fase mesofílica entre subtratamientos con el programa JMP® 8.0.

En la etapa termofílica, no se detectaron diferencias entre los tratamientos (Kruskal-Wallis Chi-square = 0.0850) (Figura 15), ni entre subtratamientos

(Kruskal- WallisChi-square = 0.8951).

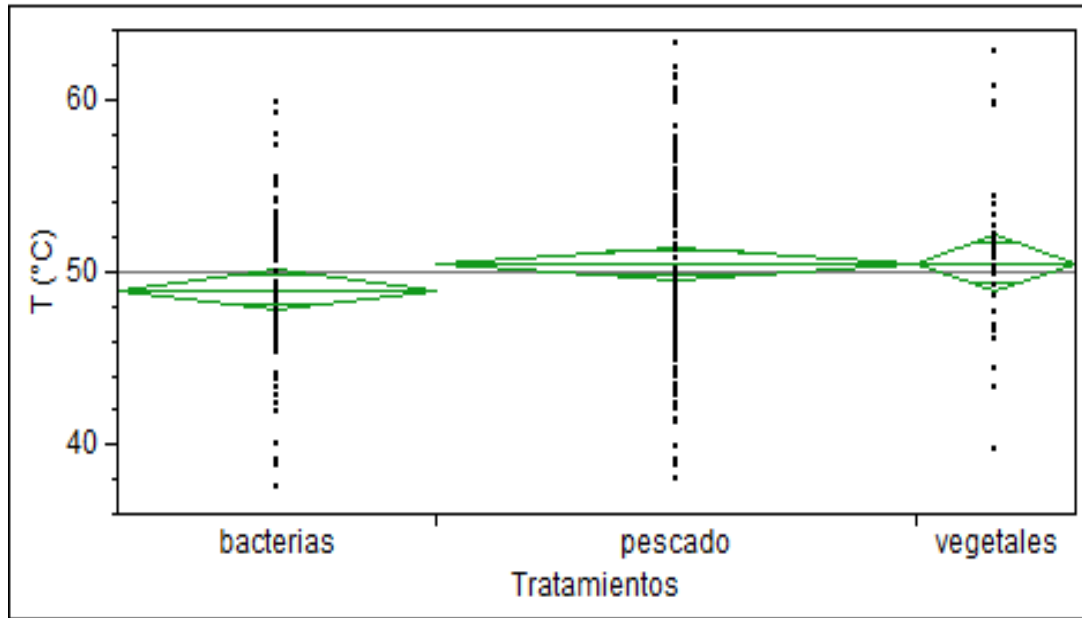


Figura 15. Comparación de fase termofílica entre tratamientos con el programa JMP® 8.0.

En la etapa de maduración, se observó una mayor temperatura en el tratamiento de vegetales comparado con los tratamientos de desechos de pescado y desechos de pescado con bacterias comerciales (Kruskal-Wallis Chi-square = 0.0085) (Figura 16). Este comportamiento puede deberse a la mayor actividad en el “compost” de desechos vegetales de actinomicetos y hongos mesofílicos que actúan en esta etapa, ya que son los encargados de degradar los restos de materiales vegetales más complejos (O’Ryan-Herrera y Riffo-Prado, 2007). También hubo diferencias significativas entre subtratamientos (Kruskal-Wallis Chi square = 0.0205), con una mayor temperatura en el subtratamiento de 50 kg.

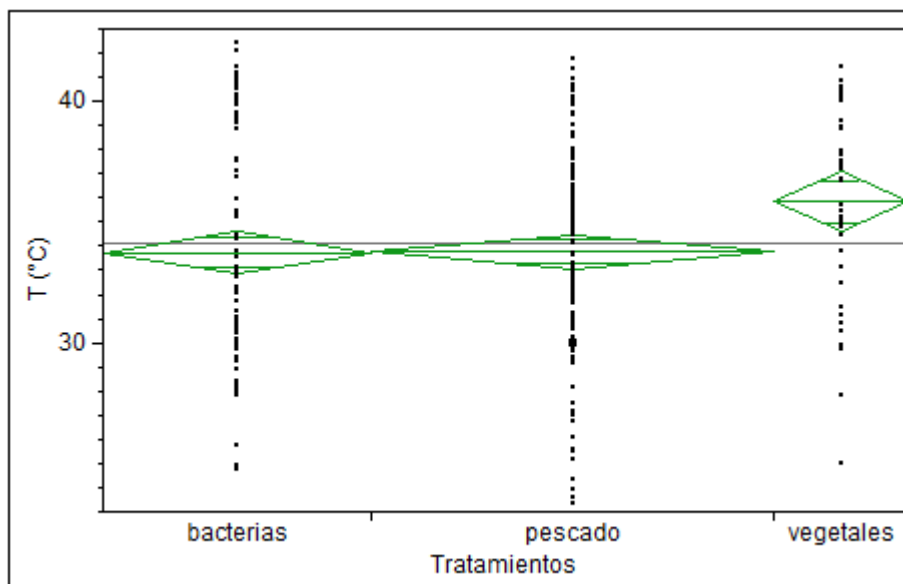


Figura 16. Comparación de fase de maduración entre tratamientos con el programa JMP® 8.0.

Se esperaba encontrar mayores temperaturas en todos los tratamientos de 150 kg, sin embargo esto no fue así para todas las etapas, solamente se observó en la etapa inicial o mesofílica. Por lo tanto es posible, que las cantidades agregadas fueran insuficientes para registrar una diferencia en función del peso del desecho empleado.

7.2.2. pH

Para la medición del pH (Tabla 6) se tomó lectura de las muestras obtenidas cada diez días, mostrándose las lecturas de inicio y final, donde se observa que el rango comprendido a lo largo del proceso fue de 8 a 9.

Tabla 6. Valores promedio de pH y desviación estándar de los diferentes tratamientos durante el proceso de compostaje.

Tratamiento	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Muestreo 5	Muestreo 6
Desechos vegetales (N=4)	8.87 ± 0.99	9.13 ± 0.01	8.61 ± 0.08	8.78 ± 0.11	8.88 ± 0.06	8.54 ± 0.11
Desechos de pescado (N=12)	8.35 ± 0.33	8.45 ± 0.10	8.16 ± 0.14	8.45 ± 0.11	8.43 ± 0.21	8.21 ± 0.18
Desechos de pescado con bacterias comerciales (N=8)	8.55 ± 0.14	8.75 ± 0.25	8.27 ± 0.21	8.40 ± 0.10	8.58 ± 0.06	8.25 ± 0.21

Se pudo observar que los valores de pH más altos fueron los del compostaje con desechos vegetales y el menor el del compostaje con desechos de pescado. Sin embargo, las diferencias fueron mínimas y en general se presentaron pH alcalinos. De acuerdo a la literatura, al inicio del proceso de compostaje se pueden presentar pH bajos debido a la descomposición de las proteínas y la formación de amonio-amoniaco, liberando ión amonio cuando hay mayor actividad bacteriana; también hay presencia de varios ácidos orgánicos en los cuales predominan el ácido acético y el ácido láctico, pudiendo reducir el pH hasta 4 (Castrillón-Quintana *et al.*, 2006). Sin embargo, en este estudio de compostaje no se detectó una disminución inicial del pH, quizá porque la acidificación se llevó a cabo de forma inmediata y la medición del pH en este experimento fue realizada cinco días después de comenzar el proceso.

7.2.3. Humedad

La medición del contenido de humedad en el proceso (Tabla 7), se realizó después de cada muestreo, donde se puede observar un incremento de este parámetro alcanzando valores superiores al 50 %:

Tabla 7. Valores promedio de humedad y desviación estándar de los diferentes tratamientos durante el proceso de compostaje.

Tratamiento	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Muestreo 5	Muestreo 6
Desechos vegetales (N=4)	39.12 ± 2.92	46.16 ± 1.21	52.97 ± 5.73	50.25 ± 1.46	47.83 ± 2.69	37.59 ± 4.36
Desechos de pescado (N=12)	45.81 ± 4.38	47.01 ± 3.66	52.80 ± 2.72	49.12 ± 6.40	47.45 ± 2.76	41.13 ± 4.66
Desechos de pescado con bacterias comerciales (N=8)	46.23 ± 3.10	48.32 ± 4.90	52.39 ± 3.14	49.02 ± 5.68	45.64 ± 3.23	38.60 ± 2.85

A partir del décimo día del proceso, la mayoría de las pilas alcanzaron el 40% de humedad el cual está dentro del rango ideal durante el proceso según la NTEA-006-SMA-RS-2006 (40-60%). Después del segundo muestreo se pudo observar que los tres tratamientos tuvieron niveles buenos de humedad. Los tres tratamientos tuvieron fluctuaciones entre 45 y 53%, esto quiere decir que se mantuvieron las pilas de compostaje en condiciones ideales para poder llevar el proceso adecuadamente (NTEA, 2006; Tucker y Douglas, 2007; Isaza-Arias *et al.*, 2009).

7.2.4. Materia Orgánica

La concentración de materia orgánica (Tabla 8) muestra un ligero incremento en el transcurso del proceso, sin embargo la diferencia no fue significativa entre el inicio y el final del compostaje (t-student, $p = 0.2652$). Además, no se detectaron diferencias entre tratamientos ($p = 0.4061$, ANOVA), ni entre subtratamientos ($p = 0.1042$, ANOVA).

Tabla 8 Valores promedio de materia orgánica y desviación estándar de los diferentes tratamientos durante el proceso de compostaje.

Tratamiento	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Muestreo 5	Muestreo 6
Desechos vegetales (N=4)	66.70 ± 2.95	66.25 ± 1.04	66.30 ± 2.82	67.14 ± 2.29	68.91 ± 2.78	73.32 ± 3.33
Desechos de pescado (N=12)	65.09 ± 4.19	60.40 ± 4.24	68.19 ± 6.41	67.13 ± 2.88	69.53 ± 1.85	71.71 ± 1.24
Desechos de pescado con bacterias comerciales (N=8)	62.12 ± 3.46	65.17 ± 3.56	67.72 ± 3.36	67.02 ± 1.89	67.84 ± 1.98	71.19 ± 2.47

De acuerdo a Julca-Otiniano *et al.* (2006), los microorganismos implicados en el proceso de compostaje (principalmente los hongos), pasan a formar parte de la materia orgánica contenida en el “compost” final. Por lo tanto, el incremento que se observó en el producto final, pudo ser debido a la proliferación de hongos y bacterias.

El producto final se comparó con un fertilizante orgánico comercial a base de estiércol inoculado con bacterias aeróbicas termofílicas (Organodel®). El producto comercial tuvo 67.59 % de materia orgánica, siendo similar al promedio de materia orgánica obtenido con el compostaje con residuos de pescado (71.45%).

7.2.5. Carbono

La concentración de carbono (Tabla 9) también tuvo un ligero aumento entre el inicio y el final del proceso de compostaje; sin embargo, esta diferencia no fue significativa (t-student, $p = 0.2654$). Tampoco se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos ($p = 0.4059$ ANOVA), ni entre subtratamientos ($p = 0.1043$, ANOVA).

Tabla 9. Valores promedio de carbono y desviación estándar de los diferentes tratamientos durante el proceso de compostaje

Tratamiento	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Muestreo 5	Muestreo 6
Desechos vegetales (N=4)	38.69 ± 1.71	38.43 ± 0.60	38.46 ± 1.63	38.94 ± 1.33	39.97 ± 1.61	42.53 ± 1.93
Desechos de pescado (N=12)	37.76 ± 2.43	35.04 ± 2.46	39.55 ± 3.72	38.94 ± 1.67	40.33 ± 1.07	41.59 ± 0.72
Desechos de pescado con bacterias comerciales (N=8)	36.03 ± 2.00	37.80 ± 2.06	39.28 ± 1.95	38.88 ± 1.09	39.35 ± 1.15	41.30 ± 1.43

También se comparó el porcentaje de carbono en producto final con el fertilizante orgánico (Organodel ®) mencionado anteriormente, donde el producto comercial tuvo 39.20 %, siendo similar al promedio de carbono obtenido con el compostaje con residuos de pescado (41.44%).

7.2.6. Nitrógeno total

En la tabla 10 se pueden observar los contenidos de nitrógeno obtenidos para cada tratamiento a lo largo del proceso de compostaje.

Tabla 10. Valores promedio de nitrógeno total y desviación estándar de los diferentes tratamientos durante el proceso de compostaje.

Tratamiento	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 6
Desechos vegetales (N=4)	0.75 ± 0.17	0.11 ± 0.00	0.33 ± 0.25	68.93 ± 21.79
Desechos de pescado (N=12)	0.49 ± 0.05	0.42 ± 0.18	0.50 ± 0.24	52.40 ± 21.53
Desechos de pescado con bacterias comerciales (N=8)	0.75 ± 0.36	0.30 ± 0.18	1.23 ± 0.78	62.21 ± 11.11

A lo largo del proceso de compostaje el porcentaje de nitrógeno total para cada tratamiento presentó diferencias significativas, ya que al inicio de cada proceso los valores fueron bajos, incrementándose considerablemente para el sexto

muestreo (Wilcoxon Rank Sum, $p < 0.0001$) (Figura 17). No se detectaron diferencias entre tratamientos (Kruskal-Wallis Chi-square = 0.6847), ni entre subtratamientos) Kruskal-Wallis Chi-square = 0.8683.

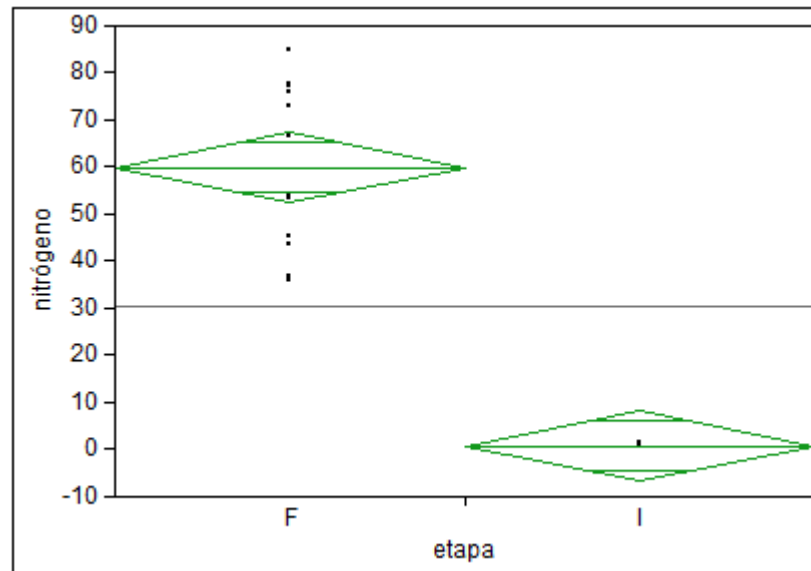


Figura 17. Comparación (programa JMP® 8.0) de la concentración de nitrógeno al inicio y al final del proceso de compostaje.

El incremento en nitrógeno se presenta durante el proceso de mineralización, que consiste en el paso del nitrógeno orgánico al inorgánico a través la actividad de los microorganismos y que esto lo haciéndolo asimilable para las plantas. Este proceso se da en conjunto con los cambios de temperatura que se presentan durante el proceso de compostaje, principalmente en la etapa termofílica y con las condiciones de humedad adecuadas (Alexander, 1980; Stevenson, 1982).

7.2.7. Relación C/N

En la tabla 11 se pueden observar los cambios en la relación C/N por tratamientos en cada muestreo, durante el proceso de compostaje.

Tabla 11. Valores promedio de relación C/N y desviación estándar de los diferentes tratamientos durante el proceso de compostaje.

Tratamiento	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 6
Desechos vegetales (N=4)	52.90 ± 14.50	356.95 ± 5.08	159.60 ± 116.27	0.64 ± 0.17
Desechos de pescado (N=12)	75.70 ± 7.20	103.24 ± 50.35	96.68 ± 64.57	0.88 ± 0.32
Desechos de pescado con bacterias comerciales (N=8)	56.09 ± 35.24	122.52 ± 60.45	42.52 ± 25.58	0.62 ± 0.10

Se presentaron diferencias significativas en la relación C/N a lo largo del proceso de compostaje, ya que al inicio de los diferentes tratamientos los valores fueron altos, disminuyendo considerablemente a lo largo del proceso (t-student $p < 0.0001$) (Figura 18). Esta disminución fue ocasionada por el incremento de nitrógeno a lo largo del proceso, ya que los valores de carbono

se mantuvieron constantes (Rynk *et al.*, 1992). Sin embargo, no se presentaron diferencias significativas entre tratamientos ni entre subtratamientos (Kruskal-Wallis Chi-square = 0.3570 y 0.8975).

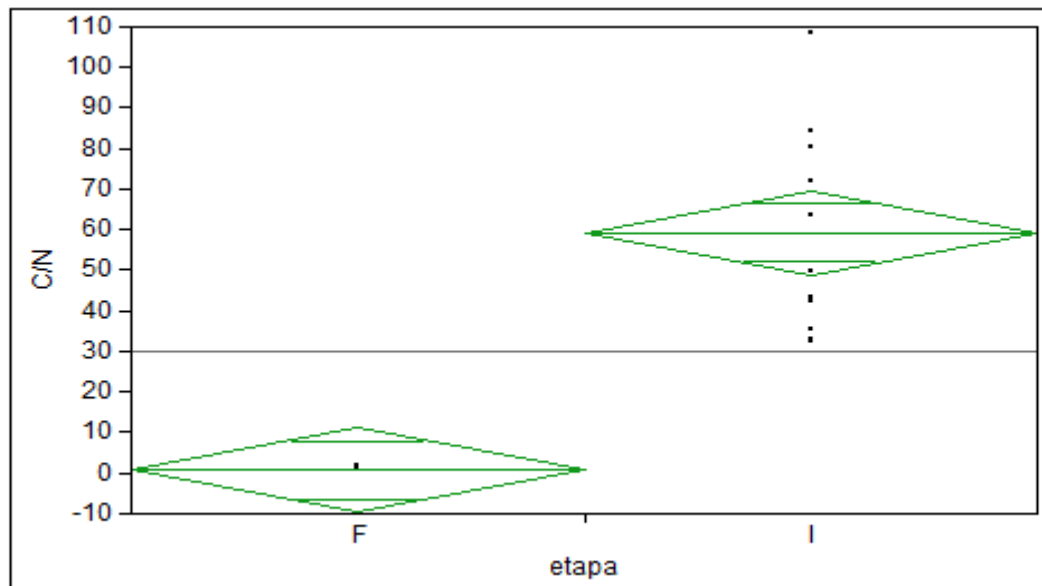


Figura 18. Comparación (programa JMP® 8.0) de la relación C/N al inicio y final del proceso de compostaje.

En España se realizó compostaje con desechos frescos y congelados (sardina, atún, macarela, y calamar), algas y corteza de pino en una relación de peso de 1:1:3, donde se obtuvo una relación C/N final de 22.56 ± 1.24 (López-Mosquera, 2011). Este valor fue mayor comparado con el del presente estudio.

También se comparó la relación C/N con el fertilizante orgánico (Organodel®), el cual tuvo un valor de 28.48, también muy superior al obtenido en este estudio. Por lo tanto, la calidad en función de C/N fue mejor en el producto generado en este estudio con residuos de pescado ya que a menor relación C/N se tiene mayor cantidad de nutrientes.

7.2.8 Resultados de Lombricompostaje

En la Tabla 12 se observan los resultados obtenidos para los tratamientos de lombricompostaje, derivados de una única muestra representativa de cada uno de los subtratamientos al final del proceso:

Tabla 12. Datos obtenidos del proceso de lombricompostaje.

Subtratamiento	Humedad	Materia orgánica	Carbono	Nitrógeno	Relación C/N
Desechos de pescado con Lombriz roja de California (N = 6)	43.97 ± 2.54	24.90 ± 1.94	14.44 ± 1.13	25.82 ± 16.54	0.73 ± 0.43

Los datos del presente lombricompostaje muestran que se cumple la NTEA-006-SMA-RS-2006 en todos estos parámetros analizados.

7.2.9. Metales pesados

Los metales analizados y comparados con la norma técnica ambiental (NTEA-006-SMA-RS-2006) fueron cadmio (Cd), cobre (Cu) y zinc (Zn); así mismo, también se analizó hierro (Fe) y mercurio (Hg), los cuales no están contemplados en la norma anteriormente mencionada.

Respecto al cadmio, en la Figura 19, se puede observar que la concentración inicial aumentó al final del proceso en los distintos tratamientos; además, estos

valores sobrepasaron el nivel que se marca en la NTEA-006-SMA-RS-2006 como límite permisible (<1 ppm).

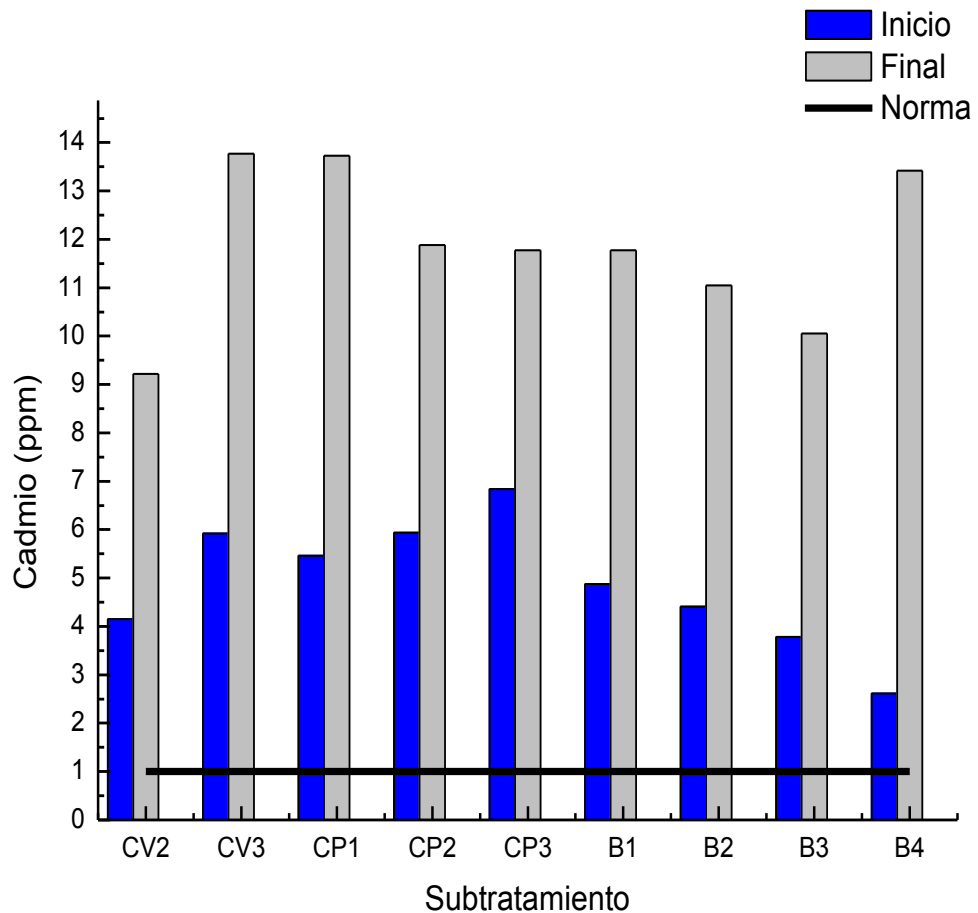


Figura 19. Concentración de cadmio al inicio y final del proceso de compostaje.

Los resultados obtenidos para Cu (Figura 20), indican que los niveles iniciales de concentración en los distintos tratamientos eran elevados, observándose un incremento al final de los procesos de compostaje, sobrepasando el nivel permitido que se marca en la NTEA-006-SMA-RS-2006 (30 ppm).

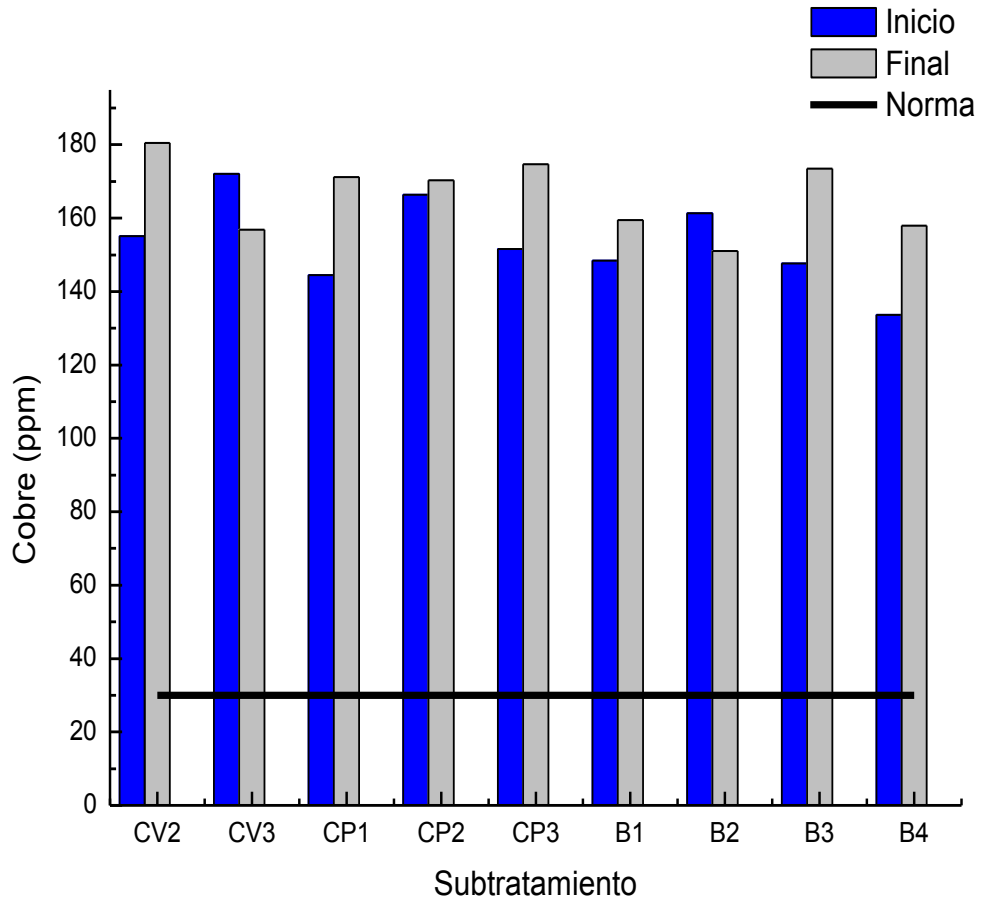


Figura 20. Concentración de cobre al inicio y final del proceso de compostaje.

Las concentraciones iniciales obtenidas para Zn (Figura 21) en los distintos tratamientos, aumentaron al final de cada proceso, sobrepasando el nivel que se marca en la NTEA-006-SMA-RS-2006 como máximo permitido (<90 ppm).

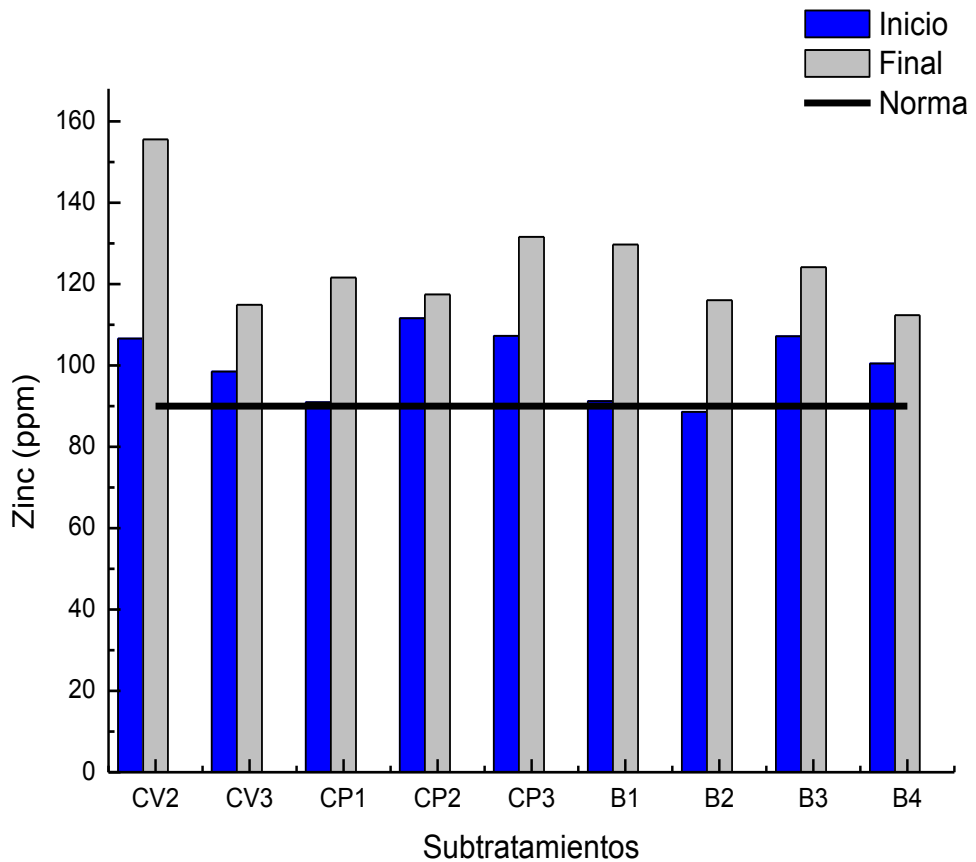


Figura 21. Concentración de zinc al inicio y final del proceso de compostaje.

Con respecto a hierro (Figura 22) en casi todos los tratamientos se presentó la misma tendencia que en los metales anteriormente mencionados, ya que el contenido fue mayor al final de los procesos de compostaje, a excepción del tratamiento CV2, donde su contenido se vio reducido.

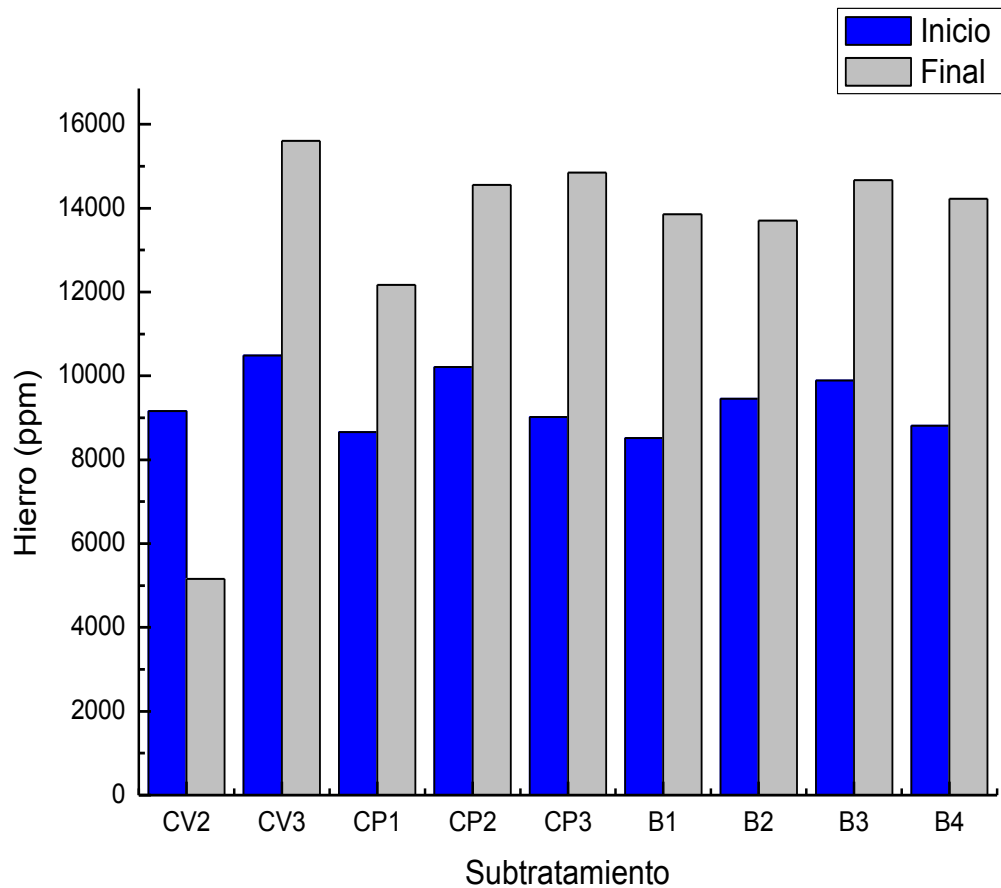


Figura 22. Concentración de hierro al inicio y final del proceso de compostaje.

También se analizaron las concentraciones de mercurio, ya que existen estudios que demuestran una bioacumulación de este metal en la cadena alimenticia marina debido a deposición atmosférica en los mares (García-Hernández *et al.*, 2007), lo cual fue importante considerar por el tipo de materia prima utilizada en este estudio. Los resultados indicaron un incremento de las concentraciones de mercurio al final del proceso, con excepción de los tratamientos CV2 y B2 en los cuales se redujo un poco la concentración de este metal, aunque el límite máximo para concentración en alimentos es < 1 ppm y los resultados expresados son en ppb (Figura 23).

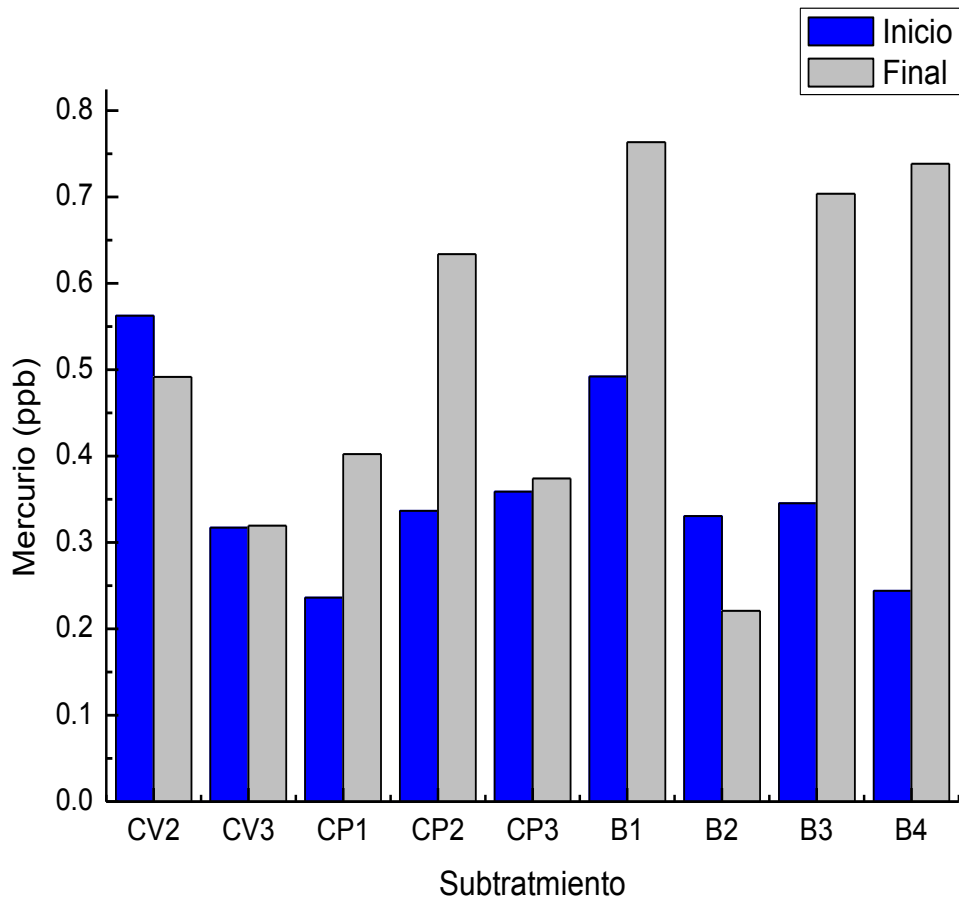


Figura 23. Concentración de mercurio al inicio y final del proceso de compostaje.

En general, la concentración de los metales pesados se incrementó al final del proceso estando por arriba de lo permisible en la NTEA-006-SMA-RS-2006 (no estando contemplados en la misma hierro y mercurio), esto pudo deberse a que en el primer muestreo aún no se habían incorporado todos los componentes del compostaje (ej. estiércol, zacate, pescado, vegetales y aserrín), los cuales se fueron homogenizando a lo largo del proceso, hasta obtener un producto final homogéneo, el cual tuvo el aporte de todos los materiales con posibles concentraciones de metales, resultando al final en una sumatoria de todos los materiales. Además, durante el proceso de compostaje

se produce un aumento del contenido de cenizas y con él, el de todos los elementos que forman parte de la fracción mineral (entre ellos los metales pesados).

También pudo deberse a que son elementos muy abundantes en los suelos, donde todos éstos son considerados macronutrientes y minerales (excepto cadmio, aunque también tiene una fuerte presencia en los suelos de la región de Guaymas, Sonora) existiendo una estrecha relación entre la materia orgánica y la biodisponibilidad de estos metales para formar complejos especialmente en ambientes alcalinos (Riechaman, 2002), que fueron las condiciones que prevalecieron a lo largo de este proceso de compostaje (González-M., 1993; Baker y Senef, 1995; González-M., 1995; Yin *et al.*, 1996).

7.2.10. Parámetros microbiológicos (Coliformes fecales y *Salmonella* spp.).

Al inicio del compostaje, se pudo observar una cantidad alta de coliformes fecales (Tabla 13) en la mitad de los tratamientos, valores que sobrepasaron los límites permitidos en la NTEA-006-SMA-RS-2006. Sin embargo, al final del proceso de compostaje de todos los tratamientos, las concentraciones de estas bacterias disminuyeron considerablemente, cumpliendo así con lo establecido en la norma correspondiente. Lo cual fue posiblemente favorecido por la fase termofílica, en la cual se generan temperaturas superiores a los límites de resistencia de estos microorganismos.

Tabla 13. Conteo de coliformes fecales al inicio y al final del compostaje

Tratamiento	Tratamiento	Coliformes fecales (NMP) en base seca	
		Inicio	Final
		NTEA- 006-SMA-RS-2006	<1000
Desechos vegetales	CV2	159	<3
	CV3	332	70
Desechos de Pescado	CP1	2015	828
	CP2	4653	14
	CP3	176	<3
Desechos de Pescado con Bacterias comerciales	B1	48661	<3
	B2	44566	<3
	B3	422	6
	B4	835	6
Desechos Pescado con Lombriz roja de California	L1	6439	7
	L2	164	<3
	L3	49256	<3

Con respecto a *Salmonella* spp., no se detectó la presencia de esta bacteria durante todo el proceso de compostaje para todos los tratamientos realizados.

7.2.11. Comparación de los Diferentes “Compost”

Se observaron diferencias significativas entre subtratamientos Kruskal-Wallis

Chi-square= 0.0753) en la etapa mesofílica presentando mayores temperaturas el subtratamiento de 150 kg, y en la etapa de maduración se observaron mayores temperaturas en el tratamiento de vegetales. Sin embargo, no se observó una diferencia marcada en todas las fases entre subtratamientos (50, 100 y 150 kg), ya que resultó similar realizar un “compost” con 50 kg que uno con 150 kg. Con base en lo anterior, se podría plantear que para observar diferencias significativas en el “compost” final, es necesario aumentar la cantidad de pescado o vegetales agregados al tratamiento de mayor volumen, por ejemplo, tener tres tratamientos de 50, 150 y 300 kg, considerando que en la formulación la relación C/N se encuentre dentro de un rango aceptable (alrededor de 30).

Entre tratamientos (vegetales, pescado, pescado con bacterias y pescado con lombriz roja de California) no se presentaron diferencias significativas (Kruskal-Wallis Chi-square= 0.3497) en la calidad del producto final (nutrientes), es decir, no existió diferencia entre una composta de vegetales o una de pescado, ni entre una de pescado con bacterias comerciales que una sin bacterias comerciales, así como tampoco en la de pescado con lombriz roja de California como sin ellas.

En el caso del tratamiento con bacterias esto pudo deberse a que este tipo de organismos solamente opera a temperaturas menores de 40 °C, que corresponden a la etapa mesofílica del proceso, por lo que juegan un papel importante solo al inicio del compostaje, ya que a partir de la etapa termofílica realmente no existe una diferencia de temperatura con el resto de los tratamientos y como se observó en el presente trabajo, el producto final no fue superior al del resto de los tratamientos.

En el caso del lombricompostaje, no se tuvo gran diferencia comparada con el compostaje, ya que no fueron suficientes las cantidades de vegetales y pescado agregados a las pilas, por lo que las lombrices no tuvieron suficiente alimento y

su actividad fue limitada, además de que las temperaturas ambientales se incrementaron y el cultivo no tuvo las condiciones ideales para desarrollarse, por lo cual no logró destacar de los demás tratamientos al contar con el producto final, además de que posiblemente el tiempo de muestreo en los análisis fue prematuro. Es por ello que se recomienda aumentar la cantidad de pescado o vegetales en el compost y mantener el cultivo de lombrices en las mejores condiciones para su desarrollo y así poder mejorar su proceso de adaptación.

Al no haber diferencias significativas en la mayoría de los parámetros medidos entre los diferentes tratamientos, se puede disponer de ambos tipos de desechos (vegetales o pescado) para el proceso de compostaje tradicional, ya que el uso de bacterias comerciales no agregó beneficios al compost.

7.2.12. Comparación de resultados con la NTEA-006-SMA-RS-2006

Se ha mencionado a lo largo del presente trabajo, que para determinar la calidad del proceso de compostaje, realizado tanto con desechos vegetales como de pescado, es necesario comparar sus características con las especificadas en la Norma Técnica Ambiental (NTEA-006-SMA-RS-2006). De acuerdo a estos resultados (Tabla 14), la relación C/N, materia orgánica y microorganismos patógenos, en todos los tratamientos se encuentran dentro lo establecido en esta norma como permisible. Sin embargo, las concentraciones de metales pesados fueron superiores a lo especificado por la NTEA-006-SMA-RS-2006. La presencia de metales pudo deberse a un enriquecimiento natural de los componentes del compostaje, y debido a que el mercurio, que es un metal tóxico, no excedió el límite recomendable, es posible utilizar este fertilizante sin riesgo para la salud. Sin embargo, en futuros compostajes se

recomienda identificar la fuente de metales al inicio del proceso y tratar de disminuir su aportación.

Tabla 14. Comparación del proceso de compostaje con la NTEA-006-SMA-RS-2006.

Parámetro	NTEA-006-SMA-RS-2006	Resultados (rangos)
Relación C/N*	< 12	0.52 - 1.16
Materia Orgánica*	> 15 %	69.75 - 74.54 %
pH	6.5 - 8.0	7.98 - 8.62
Cadmio	< 1 ppm	1.14 - 13.77 ppm
Cobre	< 30 ppm	144.98 - 180.49 ppm
Zinc	< 90 ppm	112.36 - 165.48 ppm
Coliformes fecales	< 1000 NMP/g en base seca	<3 – 828 NMP/g en base seca
<i>Salmonella spp.</i>	< 3 NMP/g en base seca	< 3 NMP/g en base seca para todos los tratamientos

*Se consideraron los tres tratamientos generales: verduras, pescado y pescado con bacterias. No se incluyó el tratamiento de lombricomposta en metales pesados por presentar problemas en el proceso.

7.2.13. Análisis de Extracto de Lombricomposta

El compost utilizado para el lombricompostaje de los 3 tratamientos (L1, L2 y L3), pasó por varios lavados, y se midió la conductividad eléctrica (34 $\mu\text{s}/\text{cm}^2$), sin embargo, al no haber una norma específica que regule al té obtenido del lombricompostaje, se comparó con el té comercial Lombricol®, mostrándose los

resultados en la Tabla 15.

Tabla 15. Comparación de concentración de nitrógeno y fósforo en el té de lombricomposta realizado y té de lombricomposta comercial.

Nutriente	Té de Lombricomposta (g/L)	Lombricol® (g/L)
Fósforo	0.76	0.31
Nitrógeno	1.14	3

Con base a estos nutrientes (fósforo y nitrógeno), que son de los más significativos que se toman en cuenta para el regado de las plantas, se puede considerar al té obtenido como una solución altamente concentrada, que necesitaría ser diluida a una décima parte antes de ser utilizada.

VIII. CONCLUSIONES

- 1) El proceso de compostaje (etapa mesófila, termófila y de maduración) se llevó a cabo adecuadamente de acuerdo a lo reportado en la literatura, en todos los tratamientos y subtratamientos del experimento.
- 2) La composición del producto final (“compost”) fue similar en todos los tratamientos y subtratamientos, no se encontraron diferencias entre compostaje con desechos vegetales, desechos de pescado, desechos de pescado con bacterias y desechos de pescado con lombriz roja de California; ni se encontraron diferencias entre las cantidades de producto adicionado (50, 100 y 150 kg).
- 3) La calidad del producto final “compost” es comparable con los fertilizantes orgánicos comerciales y los reportados en la literatura, ya que el porcentaje de materia orgánica es similar y la relación C/N es superior.
- 4) El “compost” cumplió con los parámetros establecidos en la NTEA-006-SMA-2006 en lo que respecta a la relación C/N, materia orgánica y microorganismos patógenos, sin embargo, las concentraciones de metales pesados sobrepasaron los límites establecidos en esta norma.
- 5) Es factible utilizar los residuos de pescado para el proceso de compostaje, obteniéndose un producto final comparable al compost generado con residuos vegetales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alexander, Martin (1980). Introducción a la microbiología del suelo. 2da. Edición. AGT Editor, S.A. México. 491 pp.

Alvarenga, Gonçalves, Fernandes, De-Varenes, Duarte, Cunha-Queda y Vallini (2009). "Reclamation of a mine contaminated soil using biologically reactive organic matrices." *Waste Management & Research*(27): 101-111 p.

Alwan, Buckley y O' Connor (1993). "Silage from fish wastes Chemical and microbiological aspects." *Irish Journal of Agricultural Food Research* (32): 75-81 p.

Arvanitoyannis y Kassaveti (2008). "Fish industry waste: treatments, environmental impacts, current and potential uses." *International Journal of Food Science & Technology* 43(4): 726-745 p.

Atiyeh, Subler, Edwards, Bachman, Metzger y Shuster. (2000). "Effects of vermicomposts and composts on plant growth in horticultural container media and soil." *Pedobiología*(44): 579-590 p.

Baker y Senef (1995). Chapter 8: Copper. Heavy metals in soils. Alloway, B.J. London, Blackie Academic and Professional: 179-205 p.

BASA (2009). "Solibac Compost." Retrieved 21 de Abril, 2014, from <http://www.basa.mx/PDF/SolibacCompost.pdf>.

Carney, Lawson, Breitenbeck y Schellinger (2000). Composting. Louisiana, LSU AgCenter: 8 pp.

Castrillón-Quintana, Bedoya-Mejía y Montoya-Martínez (2006). "El efecto del pH sobre el crecimiento de microorganismos durante la etapa de maduración en pilas estáticas de compost." *Producción + Limpia* 1(2): 12 pp.

CONAPESCA (2011). Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca. Mazatlán, Sinaloa. Edición 2011. México. 305 pp.

Corbitt, R.A. (2003). Manual de referencia de Ingeniería Medioambiental. BrageMcGraw-Hill interamericana de España, S.A.U. Madrid: 1608 pp.

Diario Oficial de la federación. (1995). Bienes y servicios. Método para la determinación de Salmonella en alimentos. Norma Oficial Mexicana NOM-114-SSA1-1994. 22 de Septiembre de 1995.

Edwards y Loftly (1977). Biology of earthworms. 2da. Edición. Londres. 426pp.

FAO (2013). Manual de compostaje del agricultor - Experiencias en América Latina. Santiago de Chile. 107 pp.

FDA (2011). Bacteriological Analysis Manual Online. Estados Unidos: 945 pp.

Félix-Herrán, Sañudo-Torres, Enrique, Rosa y Víctor (2008). "Importancia de los abonos orgánicos." Ra Ximhai 4(1): 57-67 p.

Fuccz-Gamboa, Gómez-Moreno, Cárdenas-Guzmán y Campos-Pinilla (2007). "Comportamiento de coliformes fecales como indicadores bacterianos de contaminación en diferentes mezclas de biosólido y estériles utilizados para la restauración ecológica de la cantera Soratama, Bogotá." Universitas scientiarum 12(II): 111-120 p.

Fundación-Terra (2003). Perspectiva ambiental 28: Compostaje. FundaciónTierra. Barcelona. 34pp.

Fundación-Terra (2007). Perspectiva ambiental 41: Lombrices trabajando. Fundación Tierra. Barcelona. 36 pp.

Gajalakshmi, Ramasamy y Abbasi (2001). "Potential of two epigenic and two anelid earthworm species in vermicomposting of wáter hyacinth." Bioresource Technology(76): 177-181.

García-Hernandez, Cadena-Cárdenas, Betancourt-Lozano, García-de-la-Parra, García-Rico y Márquez-Farías (2007). "Total mercury content found in edible tissues of top predator fish from the Gulf of California, Mexico." Toxicological & Environmental Chemistry 89(3): 507-522.

García-Pérez (2006). La lombriz de la tierra como biotecnología en la agricultura. Universidad Autónoma Chapingo. Estado de México. 178 pp.

González-M. (1993). "Reducción de toxicidad del cobre y cadmio en alfalfa mediante el uso de abonos orgánicos." Agricultura Técnica (Chile)(57): 245-249.

González-M. (1995). Cap. 17: Cooper upper critical levels for plants on copper-polluted soils and the effect of organic additions. Science and technology letters Northwood. Adriano, D.C.: 195-203.

Gracia-Fernández (2012). Efectos del compost sobre las propiedades del suelo: evaluación comparativa de compost con separación en origen y sin separación en origen. Ingeniería ambiental, química y procesos biotecnológicos. Cartagena, Universidad Politécnica de Cartagena. Maestría: 108 pp.

Grazalezma-Torres (2011). Estudio de mercado del sector de los residuos sólidos urbanos en México. Madrid: 80 pp.

Henao (1996). Manejo técnico de los residuos sólidos urbanos. Memorias curso taller alternativas para disminuir los impactos ambientales en los sistemas de producción agropecuaria: Aspectos técnicos y legales. Palmira, Colombia: 8-17 p.

Himelbloom (1994). " Microbial analysis of a fish dump site in Alaska." Bioresource Technology(47): 229-233.

Hudson (2008). Mercury and composting fish waste - A pilot project. Odanah, Great Lakes Indian Fish & Wildlife Commission: 1-22.

Ingham (2005). The Compost Tea Brewing Manual. Corvallis, Oregon.

INIA (2008). Producción y uso del humus de lombriz. Lima: 1-11.

Isaza-Arias, Pérez-Méndez, Laines-Canepa y Castañón-Nájera (2009). "Comparación de dos técnicas de aireación en la degradación de la materia orgánica." Universidad y Ciencia Trópico Húmedo 25(3): 233-243.

J. Benton Jones Jr. (2001). Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis. Boca Ratón. CRC Press LLC. 363 pp.

Jouquet, Blanchart y Capowiez (2014). "Utilization of earthworms and termites

for the restoration of ecosystem functioning." *Applied Soil Ecology* 73: 34-40.

Julca-Otiniano, Meneses-Florián, Blas-Sevillano y Bello-Amez (2006). "La materia orgánica, importancia y experiencias de su uso en la agricultura." *IDESIA* 24(1): 49-61.

Labrador (1996). *La materia orgánica en los Agrosistemas*. Mapa/Mundi-Prensa. Madrid.

Labrador (2001). *La materia orgánica en los agrosistemas*. Mapa/Mundi-Prensa. Madrid, España, Ministerio de agricultura, pesca y alimentación: 152-180.

Laos (2003). *Compostaje de residuos orgánicos de actividades productivas y urbanas en la región Andino-Patagónica: determinación de índices de madurez para su utilización agronómica*. Argentina, Universidad Nacional de Comahue. Doctorado: 148 pp.

Laos, Mazzarino, Walter, Roselli, Satti y Moyano (2002). "Composting of fish offal and biosolids in northwestern Patagonia." *Bioresource Technology* 81: 179-186.

Liao, Jones, Lau, Walkemeyer, Egan y Holbek (1997). "Composting of fish wastes in a full scale invessel system." *Bioresource Technology* 59: 163-168.

Liao, May y Chiening (1995). "Monitoring process efficiency of a full scale invessel system for composting fisheries wastes." *Bioresource Technology* 54: 159-163.

Liu, Chen, Cai, Liang y Huang (2009). "Immobilization and phytotoxicity of Cd in contaminated soil amended with chicken manure compost." *Journal of Hazardous Materials*(163): 563-567.

López-Mosquera, Fernández-Lema, Villares, Corral, Alonso y Blanco (2011). "Composting fish waste and seaweed to produce a fertilizer for use in organic agriculture." *Procedia Environmental Sciences* 9: 113-117.

López-Wong (2010). *Estudio del uso de residuos industriales no peligrosos a través del proceso de compostaje y su aplicación para el cultivo de maíz y frijol*. Tlaxcala, Instituto Politécnico Nacional - Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada Tlaxcala. Maestría en Biotecnología: 146 pp.

López (2003). Producción de Compost. Abonos orgánicos y plasticultura. Gómez Palacio, Universidad Juárez del Estado de Durango: 63-84.

Luque (1997). Alternativas económicas para el manejo de residuos orgánicos en centros de reciclaje. X Jornada de Conservación Ambiental. Valencia, Venezuela, Fundación para la investigación agrícola: 10.

Martínez, C. C., C. Martínez y A.N. Méndez. 2002. Utilización de lombricomposta en la producción de hortalizas ecológicas. Lombricultura y abonos orgánicos. Memorias del II Simposium Internacional y Reunión Nacional. Junio. Facultad de Ciencias Agrícolas. UAEM. 140-142 p.

Mouat (1975). Absorption by soil of water - soluble phosphate from earthworm cast: Plant and soil. Palmira, Universidad Nacional: 13-15 p.

Muñoz (2004). "Diseño experimental: Para la variación de la relación carbono-nitrógeno, al compostar residuos de galería con diferentes proporciones de inóculo." Facultad de Ciencias Agropecuarias 2(1): 93-100 p.

Mustin (1987). Le compost. Gestion de la matière organique. Dubusc, François. París. 954 pp.

NMX (2007). NMX-FF-109-SCFI-2007 Humus de lombriz (lombricomposta) - Especificaciones y métodos de prueba. 24 pp.

Nogales, Cifuentes y Benítez (2005). "Vermicomposting of winery wastes: a laboratory study." Journal of Environmental Science and Health Part B: 659-673 p.

NTEA (2006). Norma Técnica Estatal Ambiental NTEA-006-SMA-RS-2006 que establece los requisitos para la producción de los mejoradores de suelos elaborados a partir de residuos orgánicos. Toluca de Lerdo, México: 64 pp.

O'Ryan-Herrera y Riffo-Prado (2007). El compostaje y su utilización en la agricultura. Santiago, Chile. 36 pp.

Ojeda (2014) Volverá PASA al servicio de limpia en Guaymas:OCI. El imparcial. <http://www.elimparcial.com/EdicionEnLinea/Notas/Sonora/12032014/818959-Volvera-PASA-al-servicio-de-limpia-en-Guaymas-OCI.html> visitado 13 de Mayo de 2014.

Olalde Portugal, V. y Aguilera Gómez, L.I. (1998). "Microorganismos y biodiversidad." *Terra* 16(3): 289-292 p.

Preciado, Sánchez, Velazco, Frías, Fortis, García, Rueda y Márquez (2010). Soluciones nutritivas preparadas con fuentes orgánicas de fertilización. Editores García, J.L., Salazar, E., Orona, I., Fortis, M., Trejo, I.; Durango, Universidad Juárez del Estado de Durango.

rh Auditoría y Gestión Ambiental (2005). Generación y caracterización de residuos sólidos. Guaymas, Sonora: 50 pp.

Riechaman (2002). The responses of plants to metal toxicity: A review focusing on copper, manganese and cinc., Australian Minerals and Energy Environment Foundation: 54 pp.

Rodríguez Salinas y Córdova y Vázquez (2006). Manual de compostaje municipal. 1ª. Edición. México. 102 pp.

Rynk, Van de Kamp, Willson, Singley, Richard, Kolega, Gouin, Laliberty, Kay, Murphy, Hoitink y Brinton (1992). On-farm Composting handbook. Northeast Regional Agricultural Engineering Service. 186 pp.

Santamaría-Romero, S., Ferrera C. R. Almaraz S. J., Galvis S.A. y B. I. Barois. 2001. Dinámica y relaciones de microorganismos, C-Orgánico y N-Total durante el composteo y vermicomposteo. *Agrociencia*, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México. 377-384 p.

Schaub y Leonard (1996). "Composting an alternative of waste management." *Trends in food science & technology* 7: 263-268 p.

SEDESOL, SDUV, OF y DGIE (2001). "Manual técnico administrativo para el servicio de limpia municipal." 114 pp.

Solomón-R., Berg-R., Martin-W. y Ville (1996). *Biología*. McGraw-Hill, Internacional. México. 1193 pp.

Soto, G. C. Muñoz. 2002. Consideraciones teóricas y prácticas sobre el compost, y su empleo en la agricultura. Manejo integrado de plagas y Agroecología. Sección Agricultura Orgánica. *Agricultura Ecológica* CATIE. Turrialba. Costa Rica. No. 65 p. 123-125 p.

Soto M. G. (2003). Abonos orgánicos, principios, aplicaciones e impacto en la agricultura. Meléndez, Gloria. San José, Costa Rica. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza: 20-49 p.

Stevenson (1982). Organic forms of soil nitrogen. Nitrogen in agricultural soils. Monography N° 22. Stevenson, In F. J. Wisconsin, USA, American Society of Agronomy: 67-122.

Sztern y Pravia (1999). Manual para la elaboración de compost bases conceptuales y procedimientos. Montevideo. 69 pp.

Tecnología aplicada (2009). "Alimentos orgánicos: Humus de lombriz." Acceso: 21 Mayo 2013, 2013, pcnjreciclaje.blogspot.mx.

Tchobanoglous, Theisen y Vigil (1994). Gestión integral de residuos sólidos. Madrid: 781-783 p.

Tucker y Douglas (2007). Composted paper mill wastes as a peat substitute Reino Unido, University of Paisley: 96 p.

USDA (2010). Chapter 2 Composting. Part 637 Environmental Engineering National Engineering Handbook: 97 pp.

Walker, Clemente y Bernal (2004). "Contrasting effects of manure and compost on soil pH, heavy metal availability and growth of *Chenopodium album* L. in a soil contaminated by piritic mine waste." *Chemosphere*(57): 215-224 p.

Wase D., A.J. y Thayanithy, K. (1992). Biogas production, in *Pollution Control in Livestock Production Systems*. CAB International Ltd. Dewi, I. A. 333-345 p.

Yin, Allen, Li, Huang y Sanders (1996). "Adsorption of mercury (II) by soil: effects of pH, chloride and organic matter." *J. Environ, Qual.* 25: 837-844 p.

ANEXO I. ENCUESTA

Encuestador:_____

Fecha:_____

Sitio:_____

¿En qué empresa trabaja?

¿Cuál es su puesto?

¿En su actividad se generan residuos sólidos de pescados o mariscos?

Sí____ No____

En los próximos 3 meses, ¿qué tipo de residuo cree que generará y más o menos cuánto?

De acuerdo a la disponibilidad de los residuos, ¿Estaría de acuerdo en que los viniéramos a recoger?

Sí____ No____

¿Necesita una solicitud oficial para entregarlos?

Sí____ No____

¿Tiene un teléfono para contacto?

¿Nos podría avisar cuando cuente con ellos?

ANEXO 2. FORMULAS DE PLANTILLA DE COMPOSTAJE

En la plantilla presentada (Tabla 2, página 50), se muestran las cantidades de relación C/N y Humedad en el caso de 100 kg de desecho, a continuación, se exponen las fórmulas con las cuales se obtuvieron los datos para iniciar el proceso de compostaje

1. Las tres primeras columnas de la plantilla (%N, %C y %H) fueron tomadas de una tabla que se encuentra en el Manual de ingeniería ambiental (USDA,2000).
2. La cuarta columna que corresponde a peso seco (%), se calculó restando 100 al porcentaje de humedad.

3. La quinta columna de Nitrógeno en kg, se calculó con la siguiente fórmula:

$$\frac{\text{Peso seco (kg)} * \text{N (peso seco)}}{100} * \frac{\text{peso seco (\%)}}{100}$$

4. La sexta columna de Carbono en kg, se calculó con la siguiente fórmula:

$$\frac{\text{Peso seco (Kg)} * \text{C (peso seco)}}{100} * \frac{\text{peso seco (\%)}}{100}$$

5. La séptima columna de Humedad en kg, se obtuvo con la siguiente fórmula:

$$\frac{\text{Peso (kg)} * \% \text{ Humedad}}{100}$$

6. La octava columna de kg en peso, se insertó la cantidad deseada para cada desecho, en este caso de aserrín, estiércol de vaca, zacate buffel, desechos de vegetales y desechos de pescado.
7. La novena columna de % en peso se calculó dividiendo el peso de cada componente, entre la suma del total en kg de componentes en la pila de compostaje (kg en peso).

En la siguiente tabla, se muestran las cantidades de relación carbono nitrógeno y de humedad obtenidos para cada los de los tratamientos del proceso de compostaje:

Desecho	Cantidad (Kg)	C/N	Humedad (%)
Verduras	100	52.05	55
	150	49	59
Pescado	50	45.24	51
	100	36.21	54
	150	29.35	57

ANEXO 3. DIGESTIÓN DE SEDIMENTOS Y SUELOS

Aparatos:

Horno de microondas CEM Corp. Mod. MARS X con sensor de presión y temperatura

Reactivos y material

- Ácido nítrico concentrado
- Peróxido de hidrógeno al 30%
- Agua destilada
- Filtros Whatman No. 4
- Embudos de plástico

Procedimiento:

Pesado y colocación de muestras en vasos:

1. Pesar 0.25 g de sedimento seco.
2. Colocar el sedimento con mayor materia orgánica en vaso No. 1
3. Agregar 10 mL de ácido nítrico concentrado bajo la campana de vapores
4. Pesar 0.25g de material de referencia
5. Incluir un blanco que consistirá en los 5 mL de ácido nítrico
6. Incluir un duplicado de las muestras del lote
7. Dejar reposar 1 hora las muestras en ácido antes de iniciar la digestión

Primera digestión:

1. Montar los vasos de digestión como se especifica en el **Método:**

Digestión. Montaje de vasos de digestión de LCA

Iniciar el programa **TEJIDO C**, el cual tiene las siguientes etapas:

Etapa	Potencia watts	Potencia %	Rampa	PSI	T°C	Mantenimiento (min)
1	1200	100	05:00	65	100	5:00
2	1200	100	05:00	100	120	5:00
3	1200	100	05:00	140	140	5:00

Segunda digestión:

1. Llevar a cabo el procedimiento de Postdigestión de acuerdo al método que lleva el mismo nombre que se encuentra en el apartado 4.3 Digestión, del manual de operaciones de LCA.
2. Agregar a cada vaso 3 mL de peróxido de hidrógeno al 30%.
3. Volver a armar el equipo y digerir con el mismo programa: TEJIDO C
4. Una vez digeridos por segunda vez, se filtrarán los sedimentos utilizando filtros Whatman del No. 4 en un embudo de plástico y se aforarán a 50 mL con agua destilada. Lavar con agua destilada y ácido al 1.5% todos los materiales antes de pasar a la siguiente muestra.
5. La muestra aforada está lista para ser leída por absorción atómica (AA).

Referencias

- EPA. 1994. Method 3051. Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils and oils.
- CEM Corp. 2001. Microwave accelerated reaction system for extraction. Operation Manual.
- CEM Corp. 2001. HP-500 Plus vessel accessory sets and autovent options. Instructions for use.