



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA DE BIOTECNOLOGÍA

**DISEÑO DE UN SISTEMA AEROBIO PARA EL
TRATAMIENTO ACELERADO DE RESIDUOS SÓLIDOS
MUNICIPALES**

INFORME TÉCNICO DE LA OPCIÓN CURRICULAR EN LA MODALIDAD DE:
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTA:
SANDRA SOLIS LÓPEZ

DIRECTOR INTERNO:

Dr. Sergio García Salas

Mayo del 2006.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 La composta.....	1
1.2 Etapas básicas del proceso de composteo.....	2
1.3 Variables que determinan el proceso de composteo.....	2
1.4 Tecnologías de composteo.....	7
1.5 Aplicación de la composta.....	11
1.6 Beneficios de la composta.....	11
2. ANTECEDENTES.....	12
3. JUSTIFICACIÓN.....	13
4. OBJETIVO GENERAL.....	14
4.1 Objetivos particulares.....	14
5. HIPÓTESIS.....	14
6. MÉTODOS Y MATERIALES.....	15
6.1 Determinación de la composición de la mezcla.....	15
6.2 Síntesis y análisis técnico del proceso.....	19
6.3 Diseño del reactor.....	19
6.4 Comparación del sistema propuesto.....	19
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
7.1 Determinación de la composición de la mezcla.....	20
7.2. Diseño del proceso.....	30
7.3 Diseño del reactor.....	35
7.4 Comparación de nuestro proceso en el reactor vs.pila.....	37
8. CONCLUSIONES.....	44
10. BIBLOGRAFIA.....	47
11. GLOSARIO DE TERMINOS.....	48
12. ANEXO 1.....	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Etapas básicas del proceso de composteo.....	2
Figura. 2. Tendencia de temperatura y pH durante el proceso de composteo	3
Figura 3. Temperatura de la mezcla en función del tiempo de tratamiento.	4
Figura 4. Unidades de compostaje en reactor:.....	9
Figura 5. Variación de la temperatura promedio vs tiempo.....	20
Figura 6. Variación de la humedad vs tiempo	21
Figura 7. Temperatura promedio vs tiempo para tipos de activadores biológicos	22
Figura 8. Densidad promedio de las mezclas con 10% de texturizante	23
Figura 9. Variación de la temperatura con los diferentes texturizantes.....	24
Figura 10. Aumento de la densidad de las mezclas con texturizante al 10%.	25
Figura 11. Generación de lixiviados	26
Figura 12 Reducción del peso de las muestras con 10% de texturizante	27
Figura 13 Reducción en volumen de las muestras con 10% de texturizante.....	27
Figura 14. Diagrama de bloques del proceso de composteo.	30
Figura 15. Diagrama de flujo para el tratamiento se residuos sólidos orgánicos.	33
Figura 16. Diagrama del reactor.....	36
Figura 17. Balance de materia en el reactor, para el proceso en lote.....	37
Figura 18. Diagrama y dimensiones de la pila y el reactor.....	38
Figura 19. Lugar donde fueron colocados los sensores en el reactor y en la pila.	39
Figura 20. Temperaturas obtenidas durante el día en el reactor.	40
Figura 21. Comparación de humedad y adición de agua en el reactor vs. pila.....	41
Figura 22. Generación de lixiviados	42
Figura 23. Comparación de la temperatura en el reactor vs. pila tradicional	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Capacidad de retención de agua de algunos texturizantes.....	5
Tabla 2. Datos de residuos sólidos, relación C/N, humedad, Peso específico. (3,7).....	15
Tabla 3. Composición de mezclas para experimentos de lodos activados.....	16
Tabla 4. Composición de la mezcla para pruebas de los activadores.	16
Tabla 5. Composición de las mezclas para experimentos de texturizante.....	17
Tabla 6. Peso y altura de las mezclas con texturizante	17
Tabla 7. Mezclas con combinación de texturizante.....	18
Tabla 8. Densidad promedio de la mezclas.	23
Tabla 9. Densidad de las mezclas al 10% de texturizante	25
Tabla 10. Mezclas con variación de % de paja y aserrín.	28
Tabla 11. Frecuencia de mezclado	28

1. INTRODUCCIÓN

La mayor evidencia de la evolución de la sociedad de nuestro tiempo es, la transformación y consumo de productos innecesarios. Los grandes niveles de producción de los mismos indicadores de los hábitos, han generado en paralelo una influencia negativa hacia el medio ambiente, lo que se ve reflejado en la contaminación de agua, suelo y aire. A través del tiempo se han desarrollado distintos procesos para eliminar o disminuir los agentes CONTAMINANTES que genera el hombre, estos procesos pueden ser de carácter físico, químico o biológico, este último aprovecha la capacidad que tienen los microorganismos para degradar los contaminantes y transformarlos en productos ya sea inocuos o menos contaminantes(1).

Uno de estos métodos biológicos es el composteo Ya que toda materia orgánica eventualmente se descompone. La palabra composta proviene del latín *componere*, que significa juntar (5).

1.1 La composta

La naturaleza por si sola produce humus que es la composta, pero en el humus no interviene la mano del hombre y en la composta sí.

La composta aligera el proceso natural de descomposición proveyendo al ambiente ideal para bacterias y otros microorganismos que actúan sobre los residuos orgánicos. El producto final es la materia orgánica llamada humus de color oscuro y olor a tierra húmeda que sirve como un excelente fertilizante y mejorador de suelos.

El compostaje es un tratamiento apropiado para residuos orgánicos tales como restos alimenticios, de áreas verdes, vegetales, de mataderos, agrícolas, granjas, lodos de depuradora o albañal, etc. Los microorganismos que realizan el proceso tienen requerimientos básicos que deben ser atendidos. La aireación, la humedad y la correcta relación de nutrientes se combinan para crear un buen ambiente de compostaje (2).

1.2 Etapas básicas del proceso de composteo.

El proceso de composteo se muestra en el la figura1.

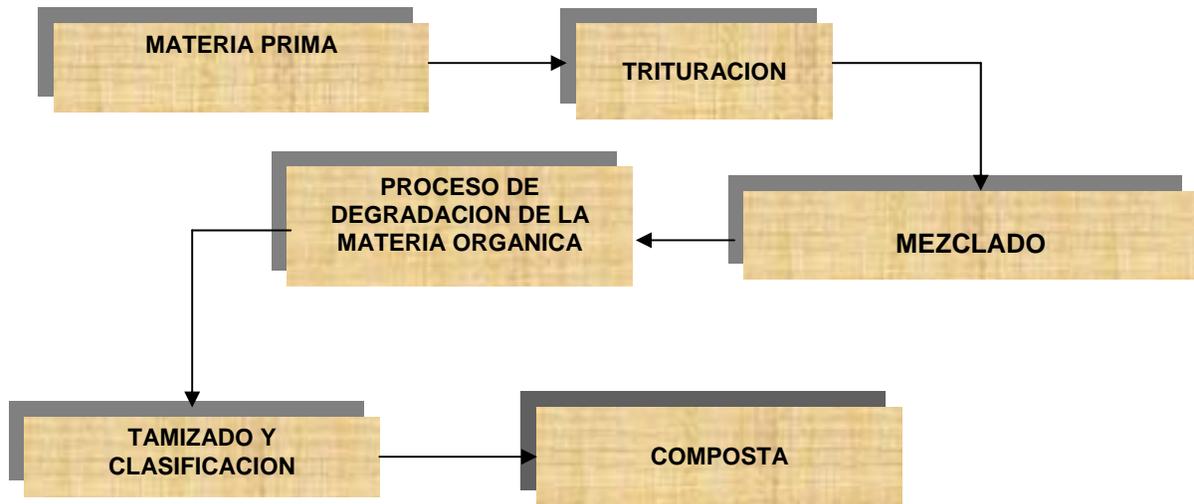


Figura1. Etapas básicas del proceso de composteo.

1.3 Variables que determinan el proceso de composteo

La humedad de la mezcla debe de estar entre 40% y 60% para asegurar condiciones óptimas de compostaje. Si es más alta la humedad, puede ocurrir el caso de putrefacción anaeróbica y generar malos olores. Cuando es muy húmedo el material a compostar, se puede añadir material con menos humedad (papel no reciclable, desechos de parques y jardines, desechos de carpintería etc.).

La temperatura del material debe mantenerse al menos una semana sobre 65°C o durante 2 semanas sobre 55 °C para lograr condiciones de sanidad suficientes, (eliminación de organismos nocivos al suelo o a plantas). La temperatura no debe sobrepasar los 70 °C, ya que esto inhibe el proceso biológico. En la figura 2 se muestran las etapas psicrófilas: 15 a 25 °C, mesófilas: 25 a 45 °C, y termófilas: 45 a 60 °C en el proceso de compostaje, conforme pasa el tiempo.

El pH óptimo es de 7. Se puede añadir cal o químicos según las características de los residuos sólidos orgánicos.

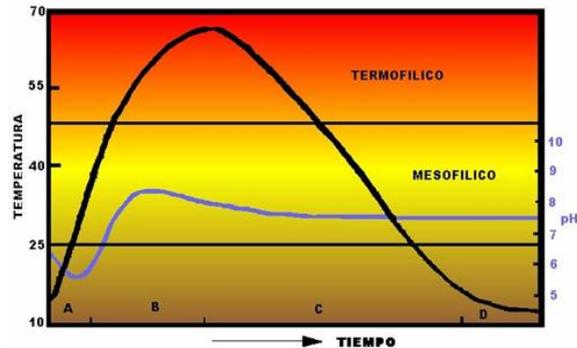


Figura. 2. Tendencia de temperatura y pH durante el proceso de composteo (1).

La tasa C/N es otro parámetro importante que debe ser controlado. Este parámetro es muy importante para determinar el proceso de fermentación y asegurar la calidad del producto. Para poder utilizar la composta como abono, la tasa C/N no debe pasar de 35 o ser menor de 15. Se recomienda una relación C/N de 30 para asegurar que exista el nitrógeno necesario para la síntesis celular y carbono como fuente de energía (4). Si esta relación existe en una proporción muy elevada de nitrógeno, éste se pierde en forma de malos olores, si por el contrario el elemento excedente es el carbono, el proceso se lleva a acabo de manera lenta, por lo que se sugiere hacer inicialmente algunas pruebas, tanto de velocidad como de producción de malos olores.

Durante el proceso 2/3 del carbono presente en los residuos es transformado en CO₂ y el resto es combinado con el nitrógeno para el desarrollo celular. Esta relación se procura que inicialmente sea de 30, ya que por arriba o por debajo de este valor, se pueden presentar algunos de los problemas mencionados anteriormente (1). Para disminuir la relación C/N al intervalo de valores óptimo, se puede agregar a las mezclas, los desechos crudos lodos de tratamiento de las aguas residuales, heces fecales, residuos de la agricultura o de fosas sépticas. Por el contrario, para aumentar la relación C/N, se deben agregar materiales de base celulósica, como papel, desechos de la industria de madera etc. El tiempo de composteo varía de 4 a 5 meses con una relación de carbono/nitrógeno final de 12 a 15 (1).

El oxígeno en el composteo es un factor determinante, ya que la carencia de oxígeno lleva el proceso a anaerobiosis, lo que produce malos olores. La composta debe tener espacios libres para que pueda penetrar el oxígeno y desplazar al CO₂ y otros gases a la atmósfera.

El exceso de aire puede provocar la pérdida excesiva de calor y la evaporación de agua. Se dice que por cada gramo de materia orgánica volátil de los residuos se requieren 144 mg de O₂. (9). La literatura sugiere que se requiere suministrar 0.6 - 1.8 m³aire/día/kg de sólidos volátiles durante la fase termofílica del composteo. (9)

Para favorecer la aireación en las mezclas existen varias formas. por ejemplo:

- Colocar en medio de la pila materiales como ramas que permitan el paso de aire.
- Poner la pila en estratos, de acuerdo a los diferentes tipos de desechos y darle vuelta cada cierto tiempo.
- Colocar chimeneas desde la base al tope y luego quitarlas para que permitan el paso de aire.
- Por volteos de la pila, y/o hilera manual o mecánicamente.
- Por una correcta construcción de la pila, que permita al aire difundirse hasta el centro.(2)

La pila debe aumentar su temperatura en 1 o 3 días y el volteo puede hacerse cuando esta llega a un valor máximo de 45 a 65° C. Nunca debe voltearse la pila más de una vez cada 5 días. La figura 3 muestra una gráfica de la frecuencia de volteos, en la que observamos la temperatura alcanzada y en esta el tiempo de degradación de los residuos dependiendo de la aireación.

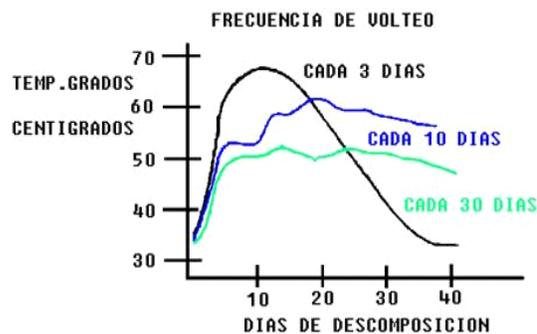


Figura 3. Temperatura de la mezcla en función del tiempo de tratamiento. Efecto de la frecuencia de volteo de la mezcla (4).

El tamaño de partícula es un factor que tiene que ver con la presencia de oxígeno presente entre el material, para lo cual es importante que el material presente mayor área de superficie para el contacto, entre las enzimas y microorganismos con los residuos orgánicos esto se logra triturando el material para que tenga un tamaño de 2 a 5 cm. pero cuidando que no sea tan pequeño que compacte la mezcla, dificultando el paso de aire al interior de la pila.

Texturizante para mejorar la estructura de la composta. Las pilas de composta usualmente necesitan un agente (texturizante) que disminuya la densidad de la mezcla para mejorar la estructura, su porosidad, la permeabilidad del oxígeno y evitar la compactación. Si la porosidad de la composta aumenta puede tener como resultado la pérdida de agua. Por lo tanto el material texturizante debe de ser absorbente para retener la humedad. La tabla 1 muestra la capacidad de retención de agua de los texturizantes. Algunos de los materiales usados como agentes texturizantes son la paja, el pasto, paja de arroz, viruta de madera, residuos de poda, materiales sintéticos y composta, la adición del material texturizante absorbe el exceso de humedad y aumenta los espacios donde puede entrar el aire (9).

Tabla 1. Capacidad de retención de agua de algunos texturizantes.

Texturizante	lb de agua /b	texturizante	lb de agua /
	Texturizante		lb texturizante
Paja de cebada	2.1	Arena	0.25
Cáscaras de cacao	2.7	Bagazo de la caña de	2.2
Stover de maíz (hecho tiras)	2.5	Paja del trigo (completa)	2.2
Granos de maíz	2.1	Paja del trigo	2.95
Cáscaras de la semilla del	2.5		
Paja	2.6	Madera	
		Corteza fino seco	2.5
Hojas (broadleaf)	2	Corteza curtiendo	4
(agujas del pino)	1	Astillas del pino	3
Cáscaras de la avena	2	Aserrín	2.5
Paja de la avena (completa)	2.8	Viruta	2
Paja de la avena (desmenuzada)	3.75	Agujas	1
Cáscaras del cacahuete	2.5	Astillas de madera dura	1.5
Musgo de la turba	10	Viruta	1.5
Paja de centeno	2.1	Aserrín	1.5

Ensminger, M.E. Dairy Cattle Science. Interstate Printers' Publishers, Danville. (9).

Población microbiana. Como ya hemos comentado, el compostaje es un proceso dinámico debido a las actividades combinadas de una amplia gama de bacterias y hongos, ligados a una sucesión de ambientes.

A lo largo del proceso van apareciendo formas resistentes de los microorganismos cuando las condiciones de temperatura hacen imposible su actividad. Diferentes especies de microorganismos pueden sucederse o coincidir en el tiempo, su procedencia puede ser a través de la atmósfera, del agua, del suelo o de los mismos residuos. Una población comienza a aparecer mientras otras están en su máximo o ya están desapareciendo, complementándose las actividades metabólicas de los diferentes grupos.

En la primera etapa aparecen bacterias y hongos mesófilos con predominio de las primeras. Cuando la temperatura llega a 40 °C, aparecen bacterias y hongos termófilos y los primeros actinomicetos. Por encima de los 70° cesa la actividad microbiana. Al bajar de nuevo la temperatura, reaparecen las formas activas, detectándose también la actividad de protozoos, miriápodos, etc.

Las bacterias se encuentran distribuidas por toda la pila, mientras que los hongos y actinomicetos están situados a 5-15 cm. de la superficie, dándole un aspecto grisáceo característico.

El tiempo de composteo varía de 4 a 5 meses con una relación de carbono/nitrógeno final de 12 a 15. Este tiempo puede acelerarse o retrasarse en función de la proporción de carbono, nitrógeno y humedad presente en la mezcla a compostear, así si un material es muy rico en azúcares y proteínas, será procesado en un tiempo corto, ya su estructura es más sencilla de 5 a 6 carbonos. Por lo tanto, es más fácil de romper para los microorganismos. Por otro lado, un material rico en ligninas, retarda el proceso debido a su estructura química, pues contiene anillos aromáticos que hacen más difícil de romper la estructura, para la obtención del carbono, que es la fuente de energía de los microorganismos.

La bioaugmentación es una práctica para acelerar el proceso de composteo, que consiste en agregar microorganismos a las mezclas para incrementar la población de microorganismos, con el propósito de aumentar la velocidad de degradación de materia orgánica.

Las cepas de microorganismos utilizadas pueden ser cepas autóctonas o cepas especializadas. Las cepas autóctonas se obtienen a partir de los mismos residuos a degradar, mientras que las cepas especializadas se obtienen para un tipo particular de residuo. Las cepas usadas en la bioaugmentación se denominan activadores biológicos.

1.4 Tecnologías de composteo.

a. Compostaje en pilas con aireación por volteo.

El compostaje en pilas es el sistema más antiguo y más sencillo. La operación de este sistema es muy fácil. Después de haber separado todo material no biodegradable de la basura biodegradable, el material se coloca en pilas triangulares.

El tamaño de las pilas es muy importante para el proceso de compostaje. No debe superar cierto máximo, y tampoco debe quedarse bajo un volumen mínimo. Para asegurar la proliferación de los microorganismos que realizan el compostaje, se necesita una "masa crítica" mínima de 50 a 100 kg de basura biodegradable. Con esa masa, ya se puede iniciar y mantener durante un tiempo suficiente la reacción exotérmica del proceso aeróbico, que asegura las temperaturas necesarias para la alcanzar la sanidad del material.

Las pilas de material biodegradable se deben cubrir con pasto, hojas de planta de banano o material similar para evitar el problema de olor y no atraer las moscas. Una vez por semana se deben mezclar las pilas para airear y homogenizar el material. El mezclado del material se puede hacer manualmente con palas. Se debe remover el material de cobertura para el mezclado (4). El tamaño de las pilas es variable, pero como regla general esta puede tener el largo que se desee y 2 veces el ancho que lo alto, por ejemplo, si la pila mide 1.5 m de alto se recomienda que de ancho tenga 3.0 m (1).

El compostaje mecanizado en pilas es un sistema muy parecido el compostaje manual en pilas. Las diferencias más importantes son:

- La basura biodegradable se la puede colocar en pilas más altas (hasta 2.50 - 3m)
- Si se utilizan cargadores para la mezcla/ revuelta, se pueden utilizar pilas continuas; si se utiliza una máquina especial de mezcla/ revuelta, la basura puede colocarse en una sola pila muy extendida.

-
- Con las pilas más altas y más concentradas, se necesita menos espacio.
 - Con la aireación y el riego automático, el tiempo necesario para el compostaje se reduce a aproximadamente 3 meses.

b. Compostaje en pilas estáticas

El sistema de pila estática aireada, consiste en una red de tuberías de escape o aireación sobre la cual se coloca la fracción orgánica procesada de los residuos sólidos, la altura de las pilas son de aproximadamente de 2 a 2.5 metros, a menudo se coloca una capa de composta, para la mitigación de olores.

Se coloca un inyector de aire individual a cada pila para tener un mejor control de la aireación. Después de la fermentación del material se desmonta la pila y se recupera el texturizante mediante tamización (7).

c. Reactor o digestor

El compostaje en reactor se lleva a cabo dentro de un contenedor o recipiente cerrado. Se ha utilizado como reactor en estos sistemas todo tipo imaginable de contenedor, incluyendo torres verticales, depósitos horizontales, rectangulares y circulares algunos se observan en la figura 4. Se pueden dividir los sistemas de compostaje en reactor en dos categorías importantes: flujo-pistón y dinámico (lecho agitado). En sistemas flujo-pistón, la relación entre las partículas de la masa fermentándose permanece igual durante todo el proceso, y el sistema funciona bajo el principio de salida según el orden de entrada.

En un sistema dinámico, el material fermentándose se mezcla mecánicamente durante el procesamiento (13).

Se diseñan sistemas mecanizados para minimizar los olores y el tiempo de elaboración mediante el control de condiciones como son el aire, la temperatura y la concentración de oxígeno.

Se ha visto incrementada la popularidad de los sistemas de compostaje en reactor, esto se debe a que se puede tener un control de olores y de elaboración, al mejor rendimiento, a los menores costos de mano de obra y a los menores requisitos de espacio (16). El tiempo de retención para los sistemas en reactor varía de 1 a 2 semanas, pero virtualmente todos los sistemas emplean un período de curado de 4 a 8 semanas después del período de fermentación activa (7).

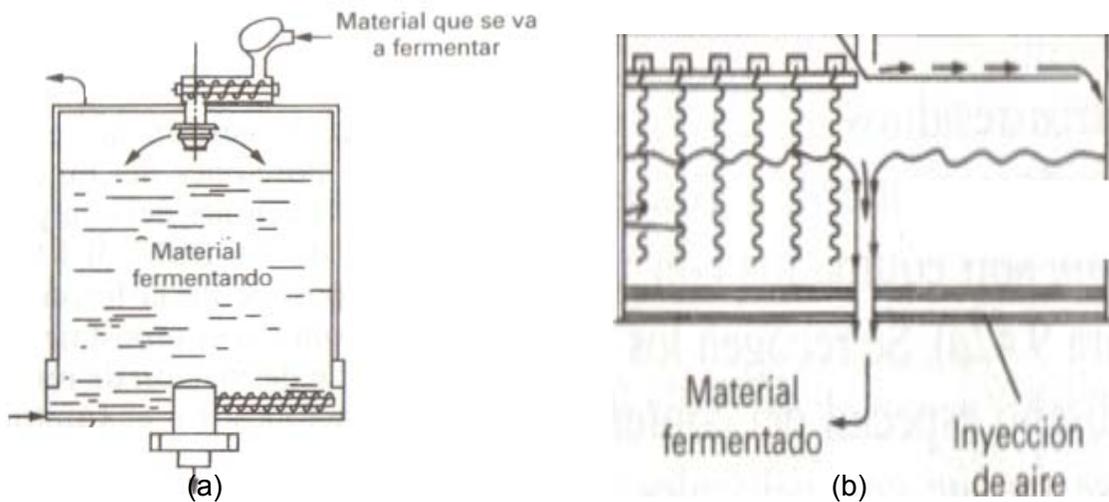


Figura 4. Unidades de compostaje en reactor: a) reactor flujo pistón sin mezcla, b) reactor con mezcla vertical (13).

Existen diferentes tecnologías en la actualidad respecto al compostaje en reactor (7).

DANO Biostabilizer

Tambor rotativo, ligeramente inclinado sobre la horizontal, 270-360 cm de diámetro; hasta 4,5 m de longitud. De uno a cinco días de digestión seguida por su colocación en hileras. Sin trituración. Aireación forzada en el tambor.

Earp-Thomas

Tipo silo con 8 niveles de distinta altura. Los residuos triturados descienden de nivel en nivel con arados. El aire pasa hacia abajo a través del silo. Utiliza un inóculo patentado. Digestión de 2 a 3 días, seguida de su colocación en hileras.

Farirfield-Hardy	Depósito circular. Unas hélices verticales, montadas sobre dos brazos radiales giratorios, mantienen en agitación el material triturado. Aireación forzada a través del fondo del depósito y agujeros en las hélices. Tiempo de retención de 5 días.
Farmascreen	Tambor hexagonal, tres de sus lados son cribas. Los residuos son triturados. Alimentado en lotes. Se sellan las cribas para el compostaje inicial. Se produce la aireación durante la rotación con las cribas abiertas. Tiempo de retención de 5 días.
Frver-Eweson	Los residuos triturados están colocados en un recipiente vertical que tiene 4 o 5 niveles perforados y brazos especiales que fuerzan el material a través de las perforaciones. Se fuerza el aire a través del recipiente. Tiempo de retención de 4 a 5 días.

Los sistemas mecánicos se diseñan para minimizar los olores y el tiempo del proceso, mediante el control de las condiciones ideales tales como el flujo de aire, la temperatura y la humedad.

Producción de olores. Sin un control correcto del proceso de compostaje la producción de olores puede convertirse en un problema, especialmente en el compostaje en hileras. Está justificado el decir que cada instalación de compostaje existente ha tenido un problema de olores, y en algunos casos numerosos problemas. Como consecuencia, la localización de la instalación, el diseño del proceso y la gestión biológica de olores son de una importancia crítica.

Localización de la instalación. Algunas cuestiones importantes en la localización relacionadas con la producción y el movimiento de olores incluyen una correcta atención a los microclimas locales porque afectan a la disipación de olores, el uso de zonas adecuadas de seguridad y el uso de instalaciones partidas (distintos lugares para compostaje y maduración).

Diseño y operación del proceso correctos. El diseño y la operación correctos son muy importantes para minimizar la producción de olores.

Si las operaciones de compostaje van a tener éxito, se debe proporcionar una atención especial a los siguientes temas: reprocesamiento, necesidades de aireación, control de temperatura y necesidades de volteo (mezcla). Las instalaciones utilizadas para preparar los materiales residuales para el compostaje deben ser capaces de mezclar completamente y eficazmente cualquier aditivo necesario, como por ejemplo nutrientes, inóculos y humedad, con el material residual que se va a fermentar (7).

1.5 Aplicación de la composta

La composta es un excelente producto para el acondicionamiento orgánico de terrenos, proporcionando una mayor capacidad de retención de agua, un aumento en la capacidad de aireación, aumento de filtración del riego y disminuye la compactación del terreno así como un buen fertilizante, se puede utilizar como abono o como tierra humus que se aplica en la agricultura, se tienen algunos parámetros para considerar una composta de buena calidad.

1.6 Beneficios de la composta.

La composta se agrega al suelo para abonarlo y mejorar la textura. Al abonarlo se vuelve más eficiente, los nutrientes se continúan desprendiendo por un período largo de tiempo y las plantas lo van utilizando a medida van creciendo. La composta es un abono más uniforme y dura más que el abono químico.

La textura se mejora porque se agregan materiales fibrosos que permiten que el aire y la humedad entren al suelo. El suelo con composta es ligero y no compacto, permitiendo que las raíces de las plantas crezcan mejor y más rápido. Una mejor estructura del suelo aumenta su capacidad para almacenar agua y facilita el transporte de nutrientes a las plantas, lo que repercute en una mayor producción.

Agregar composta al suelo se considera la forma natural para abonarlo y reconstruir la calidad del suelo (2).

2. ANTECEDENTES

Actualmente en la ciudad de México se generan casi 12 000 t/día de residuos sólidos municipales y en la zona metropolitana del Valle de México pasan ya las 20 000 t/día, lo anterior representa un gran reto para las autoridades del Distrito Federal y del Estado de México.

A nivel nacional, la situación tampoco es halagadora, en nuestro país en el año 2001 contaba con una población aproximada de 100 millones de habitantes, donde la generación diaria de residuos era de más de 83 800 toneladas.

La generación de residuos sólidos en la ciudad de México, es un problema prioritario ya que el 41% de los residuos es de origen orgánico (8), en la actualidad existen diferentes formas de minimizarlos, una de ellas es el compostaje.

3. JUSTIFICACIÓN

La generación de residuos sólidos, es un problema difícil de resolver, la generación per cápita es de 0.86 kg/hab./día, lo que indica una falta de conciencia ambiental, esto aunado a la falta de educación, información e infraestructura se convierte en un gravísimo problema. Se publicó la ley de residuos sólidos, que pretende dar un manejo adecuado a estos pero aun así, ya no dispone de un sitio de confinamiento final para estos nos lleva a buscar nuevas alternativas, para dar solución a este problema, sabiendo que el 41% de estos es de residuos orgánicos, los cuales pueden regresar al medio ambiente, en forma de un biofertilizante que tengo efectos benéficos, evitando que estos sean un contaminante.

Los actuales procesos utilizados en las plantas composteadoras, para el tratamiento de los residuos sólidos municipales no hacen posible que el compostaje sea una alternativa viable (5), ya que los procesos requieren de grandes extensiones y de periodos prolongados para la degradación, por lo cual es necesario buscar nuevos diseños que permitan controlar las variables de operación dentro de valores óptimos para el proceso. Las variables de operación a controlar son temperatura, pH, humedad, niveles de oxígeno, estas variables son la clave para obtener un producto de calidad, al obtener un diseño integral que nos permita llevar a cabo el proceso de composteo de una forma rápida, para así tratar mayor cantidad de residuos en un menor tiempo, sin tener que sacrificar la calidad final del producto.

El diseño de un proceso en el cual se lleve a cabo dentro de un reactor, nos permitirá disminuir el tiempo y el área necesaria para el proceso de compostaje, aunque la literatura marca como desventaja los costos, trataremos de que sea rentable este proceso.

4. OBJETIVO GENERAL

Diseñar un proceso aerobio a nivel piloto para el tratamiento acelerado de residuos sólidos orgánicos de origen municipal.

4.1 Objetivos particulares.

1. Conocer la mezcla de residuos sólidos que permita acelerar el proceso.
2. Realizar la síntesis y análisis técnico del proceso
3. Determinar la geometría, tamaño y contención de un reactor, necesarios para mantener las variables de proceso dentro de valores óptimos
4. Comparación del proceso propuesto con el tradicional

5. HIPÓTESIS

El diseño de un proceso para el composteo de residuos sólidos orgánicos, que controle las variables de operación, permitirá i) acelerar la degradación de materia orgánica, ii) evitar la generación de malos olores, iii) minimizar la influencia de las condiciones climáticas sobre el proceso y iv) obtener un producto de buena calidad para su uso en la agricultura.

6. MÉTODOS Y MATERIALES

El proceso de composteo es un proceso que ha sido estudiado desde hace mucho tiempo, por lo que existe mucha información sobre él. Para nuestro caso, suponemos que la información de la literatura es válida también para los residuos sólidos orgánicos de origen doméstico, que son los residuos que se trataron en este trabajo.

6.1 Determinación de la composición de la mezcla

Con base en valores reportados en la literatura (7,4), de la relación C/N, humedad y pH, que se consideran óptimos para la degradación biológica aerobia de los residuos sólidos, se estableció la composición de las mezclas, con el propósito de conocer la mezcla que favorezca la aceleración del proceso de degradación de los residuos sólidos orgánicos.

Además de los parámetros de proceso mencionados en el párrafo anterior, también en este trabajo, se probaron diferentes activadores biológicos y texturizantes para investigar su efecto sobre la velocidad del proceso de degradación de materia orgánica, se utilizó la nomenclatura de M1, para la mezcla 1, M2 para la mezcla 2, y así sucesivamente.

Los residuos orgánicos que se sometieron al proceso de compostaje son los residuos de comida y fruta, puesto que son los de mayor generación, y más difícil de compostear, por su alto contenido de humedad que es del 80 y 90% respectivamente. Los experimentos se realizaron por triplicado.

Tabla 2. Datos de residuos sólidos, relación C/N, humedad, Peso específico. **(3,7)**

Residuo	Humedad %w	Peso específico kg/m ³	C/N
Comida	80	540	15
Fruta	90	359	34
Pasto	50	297	12
Paja	30	101	128
Aserrín	20	291	200
Lodos activados	80	1000	15

A. Activador biológico

Los activadores biológicos fueron: lodos activados de purga de plantas de tratamiento, humus, composta compuesta y dos cepas “108-multipropósito” y “103-multipropósito”. Para probar los activadores biológicos se utilizaron las mezclas mostradas en las tablas 3 y 4.

Tabla 3. Composición de mezclas para experimentos de lodos activados.

Componente (%)	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5
Lodos activados de purga	0	2.5	5	7.5	10
Pasto	5	5	5	5	5
Fruta	47.5	46.2	45	43.7	42.5
Comida	47.5	46.2	45	43.7	42.5

Tabla 4. Composición de la mezcla para pruebas de los activadores biológicos: humus, composta compuesta y dos cepas “108-multipropósito” y “103-multipropósito”.

Residuo	% peso
Fruta	39
Comida	39
Texturizante (aserrín)	20
Activador biológico	2

B. Texturizante

Los texturizantes usados fueron pasto, aserrín, paja, plástico PET y taparrosas, haciendo combinaciones con algunos de ellos. Los parámetros medidos fueron la temperatura, densidad y generación de lixiviados. En la tabla 5 se muestra la composición de las mezclas para los experimentos realizados con diferentes texturizantes.

Tabla 5. Composición de las mezclas para experimentos de texturizante.

Componente	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5	Mezcla 6	Mezcla 7
Fruta (%)	450	450	450	450	450	450	450
Comida (%)	450	450	450	450	450	450	450
Paja (%)	100		50		50		
Aserrín (%)		100		50		50	

La variable de respuesta en los experimentos realizados en este trabajo fue la temperatura, debido a que al igual que la generación de dióxido de carbono, es un indicador proporcional de la actividad metabólica de los microorganismos.

C. Altura de la mezcla

Para conocer el efecto del peso de la propia mezcla sobre la generación de lixiviados, se hicieron experimentos en los que se varió la altura de la mezcla. Para ello, se diseñó un sistema de tubos, en los que se podía cambiar la altura de las mezclas, equipado con medios para la recolección de lixiviados. En estos experimentos, también se probaron diferentes texturizantes y combinaciones de ellos. El peso y la altura probados en los experimentos de texturizante se muestran en la tabla 6. La tabla 7 muestra la combinación de texturizantes. Los parámetros medidos en estos experimentos fueron temperatura, humedad, densidad y generación de lixiviados.

Tabla 6. Peso y altura de las mezclas con texturizante

Peso (g)	Altura (cm)
400	20
960	40
1570	60
2030	80
2600	100

Las pruebas se hicieron con texturizante al 5, 10 y 15 %.

Tabla 7. Mezclas con combinación de texturizante.

<i>Componentes</i>	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4
Paja (%)	0	3	7	10
Aserrín (%)	10	7	3	0
Residuos sólidos(%)	90	90	90	90

D. Técnicas analíticas

Las mezclas preparadas fueron analizadas con métodos de normas (anexo 1). Las determinaciones fueron las siguientes:

NMX-AA-016-1984	Determinación de humedad
NMX-AA-021-1985	Determinación de materia orgánica
NMX-AA-024-1984	Determinación de nitrógeno total
NMX-AA-025-1984	Determinación de pH-método potenciométrico
NMX-AA-067-1985	Determinación de relación carbono/nitrógeno

E. Densidad

La densidad se determinó empleando la siguiente ecuación:

$$\rho = w / v$$

donde:

ρ : densidad de mezcla (g/cm^3)

w: peso de la mezcla (g)

v: volumen del contenedor (m^3)

6.2 Síntesis y análisis técnico del proceso

La síntesis del proceso se realizó con base en una revisión de la literatura sobre procesos de composteo, teniendo como bases de diseño globales los concernientes a las tecnologías limpias, seguras y rentables. El análisis técnico del proceso se basó en la determinación de los balances de materia y energía.

6.3 Diseño del reactor

Para determinar la geometría, tamaño y contención, necesarios para mantener las variables de proceso dentro de valores óptimos, se realizaron análisis de tecnologías existentes para la producción de composta, se determinaron las bases de diseño, y se obtuvo información de experimentos anteriores, sobre humedad, temperatura, pH, densidad, relación C/N y generación de lixiviados del proceso de tratamiento acelerado.

6.4 Comparación del sistema propuesto

Se realizaron experimentos con la mezcla encontrada, llevando el proceso de composteo en el reactor y el sistema tradicional de pilas de volteo.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Determinación de la composición de la mezcla

A. Activador biológico

Lodos activados de purga

Las figuras 5 y 6 muestran el comportamiento de la temperatura y humedad, respectivamente, al utilizar lodos activados de purga en el tratamiento de la composta. La temperatura no aumenta lo necesario para destruir a los microorganismos patógenos. También, la humedad al inicio de la primera semana es muy alta, ya que los lodos ocupados para preparar las mezclas, tenían una humedad de 65%. Con el uso de texturizante, que fue pasto, se esperaba que la humedad bajara, pero no fue así. La humedad fue mayor a 65%, por lo que el proceso estuvo en anaerobiosis, debido a que el agua ocupó los espacios libres por donde se transportaría el oxígeno (4)

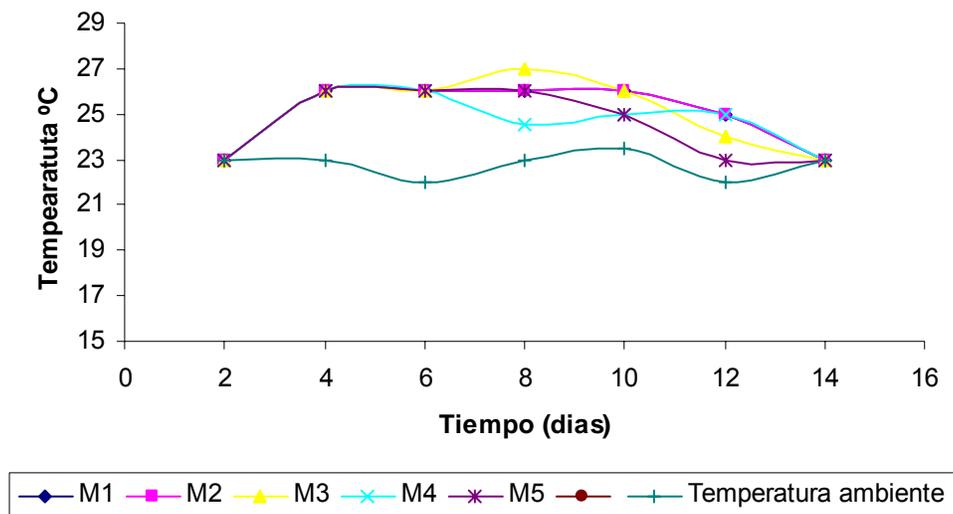


Figura 5. Variación de la temperatura promedio vs tiempo.

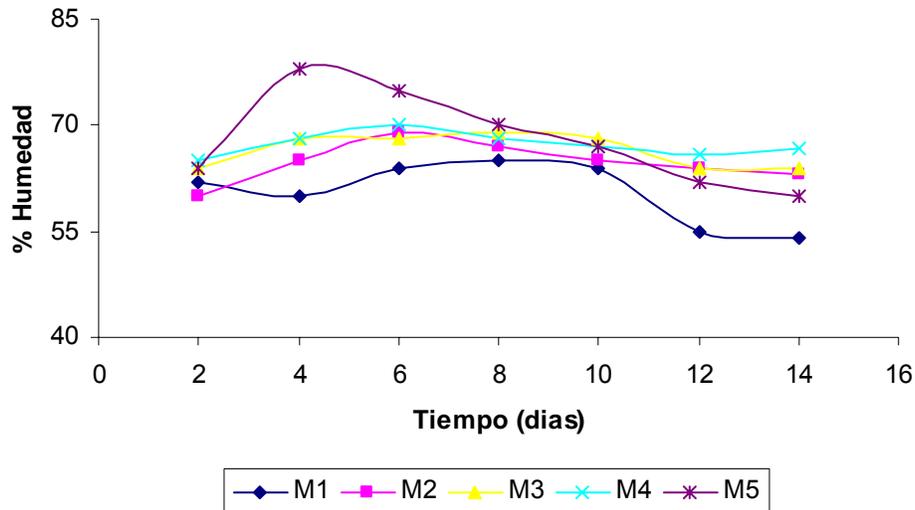


Figura 6. Variación de la humedad vs tiempo.

Después de 10 días de proceso, la humedad siguió alta y la mezcla se compactó un 50%. Además, las mezclas tenían una textura como a chicle y olor desagradable.

Los resultados arrojaron una baja degradación de los residuos, se observó que los lodos utilizados en las pruebas tenían un efecto adverso en el proceso de compostaje. Contrario a lo que se esperaba.

La figura 7 muestra la temperatura alcanzada durante el proceso de degradación de materia orgánica en función de los siguientes activadores biológicos: cepa 108- Multipropósito, 103- Multipropósito, humus y composta compuesta con un porcentaje del 2% en peso. En la tabla 4 se muestra la conformación de las mezclas para este experimento.

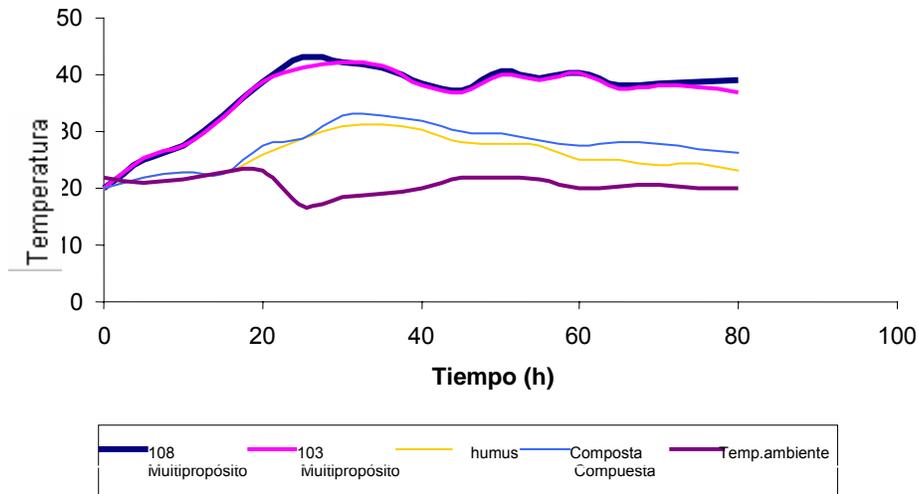


Figura 7. Temperatura promedio vs tiempo para diferentes tipos de activadores biológicos.

La figura 7 muestra que la temperatura máxima y el tiempo que tarda en alcanzarla, es casi el mismo para “108 y 103 Multipropósito”. se realizaron experimentos variando la concentración del activador, así como mezclas de estos activadores. El uso de las mezclas de activadores, de 1g de cada una de ellas por cada 3 kg de mezcla de residuos, ocasionó aumentos de temperatura, indicando con ello una aceleración del proceso, debido a una mayor actividad metabólica

B Texturizante

La segunda parte de la experimentación fue dirigida a encontrar el % de texturizante adecuado para minimizar la cantidad de lixiviados y elevar la temperatura del proceso, se pretendió tomar como texturizante el PTE y taparrosas para reutilizar este tipo de plásticos, las mezclas se realizaron sin activador, los cuales se muestran en la tabla 5. Los lixiviados fueron medidos cada 5 días.

Las mezclas preparadas para estos experimentos, se realizaron con residuos municipales (domiciliario, restaurante y tianguis), los texturizantes, paja y el aserrín son reportados en literatura con gran capacidad de retención de agua, se cortaron para obtener una longitud de aproximadamente 10 cm y un diámetro de partícula de 2 cm, para poderlos recuperar posteriormente al tamizar la composta.

Con este experimento también se obtuvo la densidad de las mezclas, realizando esta medición como se menciona en la parte de métodos, la densidad es un factor importante que determina el espacio libre o vacío en la mezcla, además que este resultado es necesario para el diseño del reactor, los resultados obtenidos se muestran en la en la tabla 8, figura 8 y 9.

Tabla 8. Densidad promedio de la mezclas.

Tiempo (días)	Densidad (g/cm ³)						
	Paja	Aserrín	Paja+ PTE	Aserrín+ PTE	Paja+ taparrosas	Aserrín+ taparrosas	Sin texturizante
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
0	0,382	0,598	0,5	0,5166	0,506	0,617	0,8616
6	0,32	0,534	0,45	0,5201	0,489	0,629	0,874
12	0,31	0,5	0,42	0,502	0,48	0,608	0,908
15	0,28	0,47	0,415	0,487	0,476	0,59	0,91

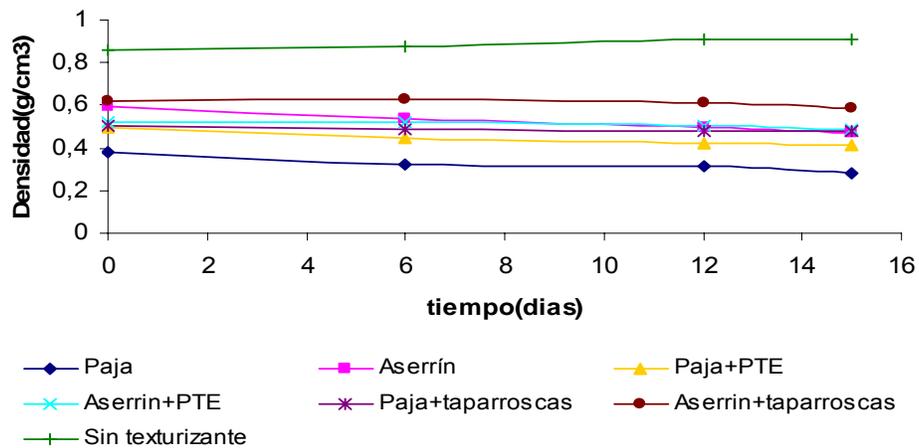


Figura 8. Densidad promedio de las mezclas con 10% de texturizante.

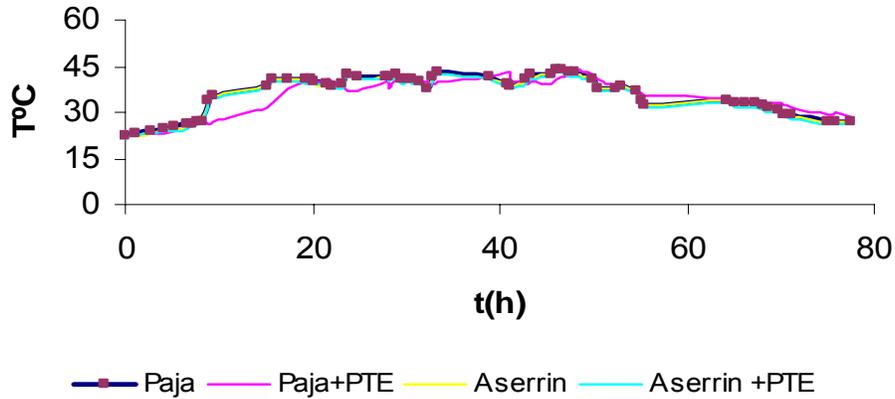


Figura 9. Variación de la temperatura con los diferentes texturizantes.

Se observa que los texturizantes favorables para el proceso de composteo son paja y aserrín, estos contribuyen a elevar la temperatura del proceso, así mismo se observó que al utilizar el PET y las taparrosas, se generaban más lixiviados, ya que estos texturizantes si nos pueden dar porosidad pero no tienen capacidad de absorción, se tendría que aumentar el % de texturizante (paja y aserrín), para poderlos integrar al proceso, por lo tanto se decidió solo trabajar con paja y aserrín, variando su porcentaje en peso. Los texturizantes fueron retirados por tamizado.

Primero se realizaron experimentos todos por triplicado, con una relación 1/1 de paja y aserrín, para saber cual era el porcentaje adecuado en peso, para minimizar la generación de lixiviados y tener una densidad más baja que nos indica mayor porosidad, se realizaron pruebas con diferentes porcentajes, 5, 10 y 15 % del peso total de la mezcla, las cuales se realizaron sin activador, las variables medidas fueron; altura, generación de lixiviados, peso, reducción de volumen y densidad.

Estas variables son determinantes para el dimensionamiento del reactor, ya que las alturas propuestas nos indican cuanto se puede tener como diámetro del reactor a nivel piloto, y con esta saber la cantidad de lixiviados que se generaran, la densidad y el peso nos permite saber el grado de compactación y así saber la porosidad, la cual permite la difusión de aire a través de la mezcla; se muestran solo los resultados con el 10% de texturizante, debido a que se obtuvieron los mejores resultados, al compararlo con los obtenidos al usar 5 y 15% de texturizante.

En la tabla 9 se muestran los resultados obtenidos de la variación de la densidad de las mezclas tomadas en 3 periodos de 3 días cada uno, en la figura 10 se muestra gráficamente el aumento de la densidad y se puede observar que la muestra 4 y 5 son las no presentan un cambio drástico La densidad inicial es el valor que se toma para dimensionar el reactor, ya que es la menor, lo que nos indica un mayor volumen.

Tabla 9. Densidad de las mezclas al 10% de texturizante

Mezclas	1er. Medición $\rho(\text{g/cm}^3)$	2.do Medición $\rho(\text{g/cm}^3)$	3er Medición. $\rho(\text{g/cm}^3)$
1	0,56	0,619	0,7
2	0,617	0,65	0,69
3	0,66	0,68	0,85
4	0,626	0,67	0,8
5	0,6	0,57	0,63

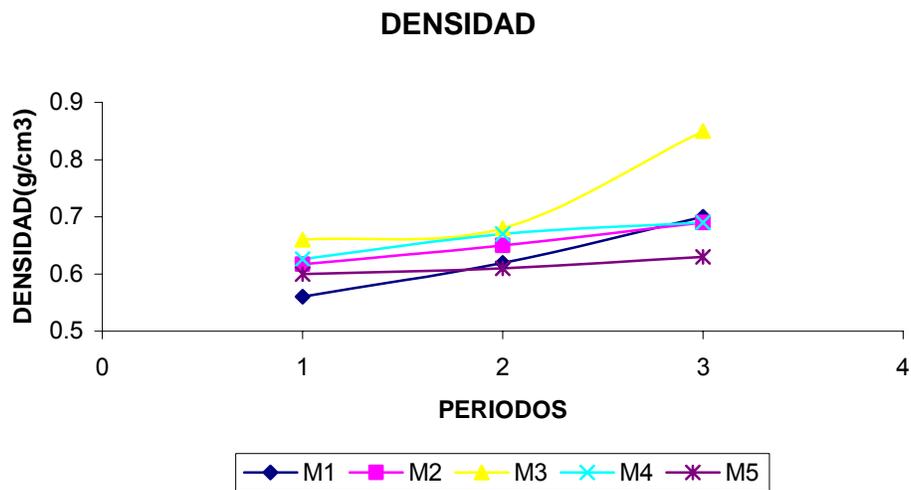


Figura 10. Aumento de la densidad de las mezclas con texturizante al 10%.

C. Generación de lixiviados

La densidad como ya se menciona anteriormente va ligada a la compactación y a la generación de lixiviados, lo que produce una reducción del volumen y del peso. La figura 11 muestra la generación de lixiviados. La figura 12 muestra la reducción en peso y en la figura 13 muestra esquemáticamente la reducción de volumen. Se puede observar que las mezclas M4 y M5 son las que tienen menor generación de lixiviados por kg de muestra y disminuye en un 40%, estas mezclas con altura de 80 y 100 cm, se observa que son las de mayor altura, por lo tanto hay un mayor peso que ejerce una mayor fuerza de compactación, la generación de lixiviados es de 5 mL por kg de mezcla

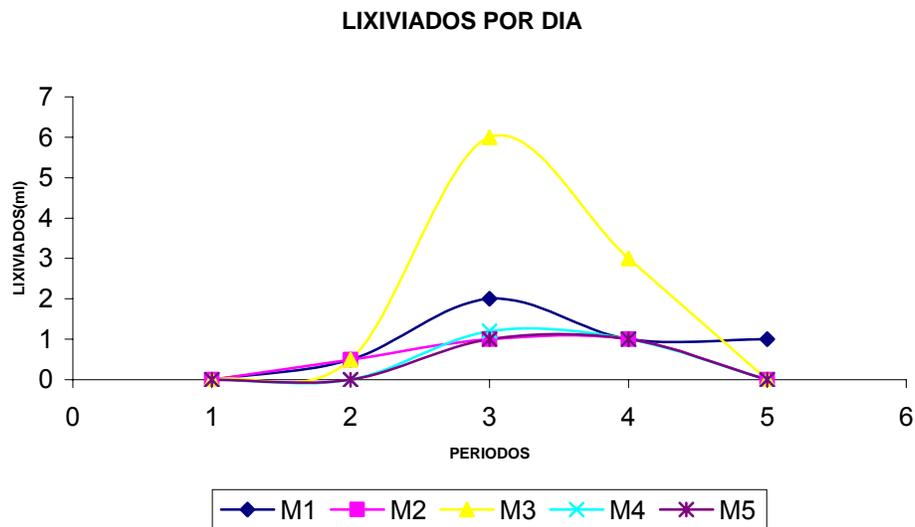


Figura 11. Generación de lixiviados

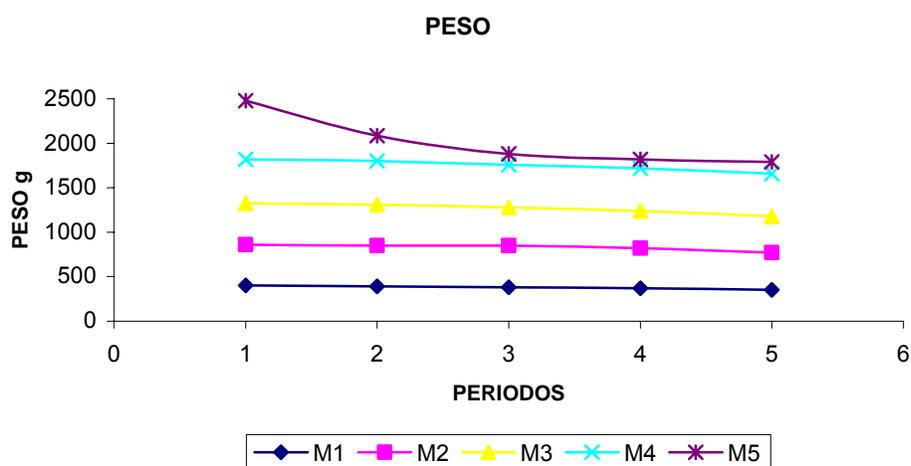


Figura 12 Reducción del peso de las muestras con 10% de texturizante

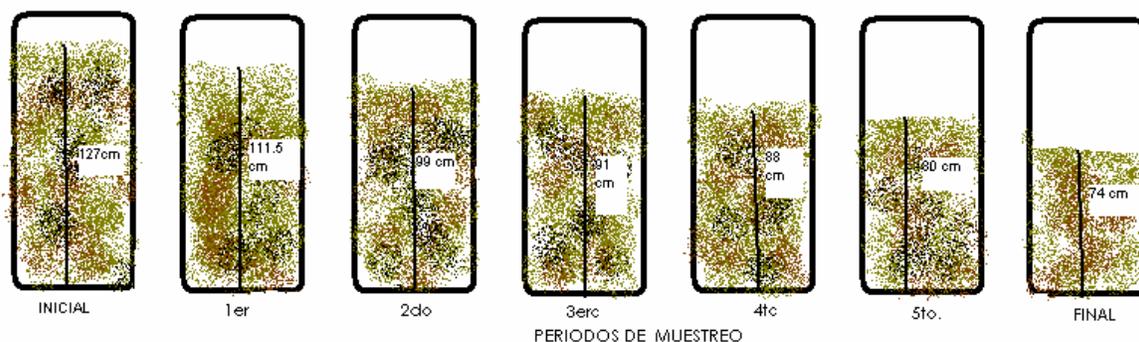


Figura 13 Reducción en volumen de las muestras con 10% de texturizante.

D. Combinación de texturizantes

Obteniendo los resultados anteriores se decidió hacer variaciones respecto a la relación 1/1 que se había manejado de paja con aserrín para disminuir la generación de lixiviados, el texturizante ayuda a mantener la temperatura, en la tabla 10 se muestran la composición de la mezclas las cuales se realizaron por triplicado con un peso de 3 kg, haciendo la medición de lixiviados se realizo durante 7 días, con remoción cada 24 horas.

Tabla 10. Mezclas con variación de % de paja y aserrín.

<i>Mezcla</i>	<i>%Paja</i>	<i>%Aserrín</i>	<i>%Residuos Sólidos</i>	<i>$\rho(g/cm^3)$</i>	<i>Generación de lixiviados ml</i>
1	0	10	90	0.68	6
2	3	7	90	0.65	6.5
3	7	3	90	0.617	3
4	10	0	90	0.56	5.5

E. Frecuencia de mezclado

Obteniendo que la mezcla con 3% de Aserrín y 7% de paja disminuye notablemente la generación de lixiviados y aumenta la porosidad a la mezcla, con esta combinación de texturizante en la cual se midió el tiempo de mezclado para mantener la mínima generación de lixiviados los resultados se muestran en la tabla 11, en la cual podemos observar que si se mezcla cada 12 h, la generación de lixiviados es menor que si se mezcla cada 24 h, además que si el mezclado es suave la temperatura no se ve afectada.

Tabla 11. Frecuencia de mezclado

<i>Frecuencia de mezclado</i>	<i>Recolección de lixiviados (mL)</i>					<i>Total</i>
	<i>1er. muestreo</i>	<i>2do. muestreo</i>	<i>3er. muestreo</i>	<i>4to. muestreo</i>	<i>5to. muestreo</i>	
Cada 12 h	0	1	1.5	1	0	3.5
Cada 24 h	1	2.5	5	4	2	14.5
Cada 48 h	1.5	3	7	3	1	18.5

Con esta mezcla se pueden ocupar sólidos con hasta el 75% de humedad y poderla bajar hasta un 55-60% de humedad de mezcla, y ocupar un diámetro o altura de 80-100 cm. para obtener 30-40 ml de lixiviados/ kg. de mezcla, siempre y cuando la revuelta sea cada 12 h o bien de 0.3 a 0.5 rpm.

CON LOS RESULTADOS SE TIENE QUE LA MEZCLA QUE AYUDA A MANTENER HUMEDAD, TEMPERATURA Y LA MENOR GENERACIÓN DE LIXIVIADOS ES:

89.9% RESIDUOS SÓLIDOS
3% ASERRIN
7% PAJA
0.1 % ACTIVADOR BIOLÓGICO

7.2. Diseño del proceso

El proceso de composteo se muestra en la figura 14.

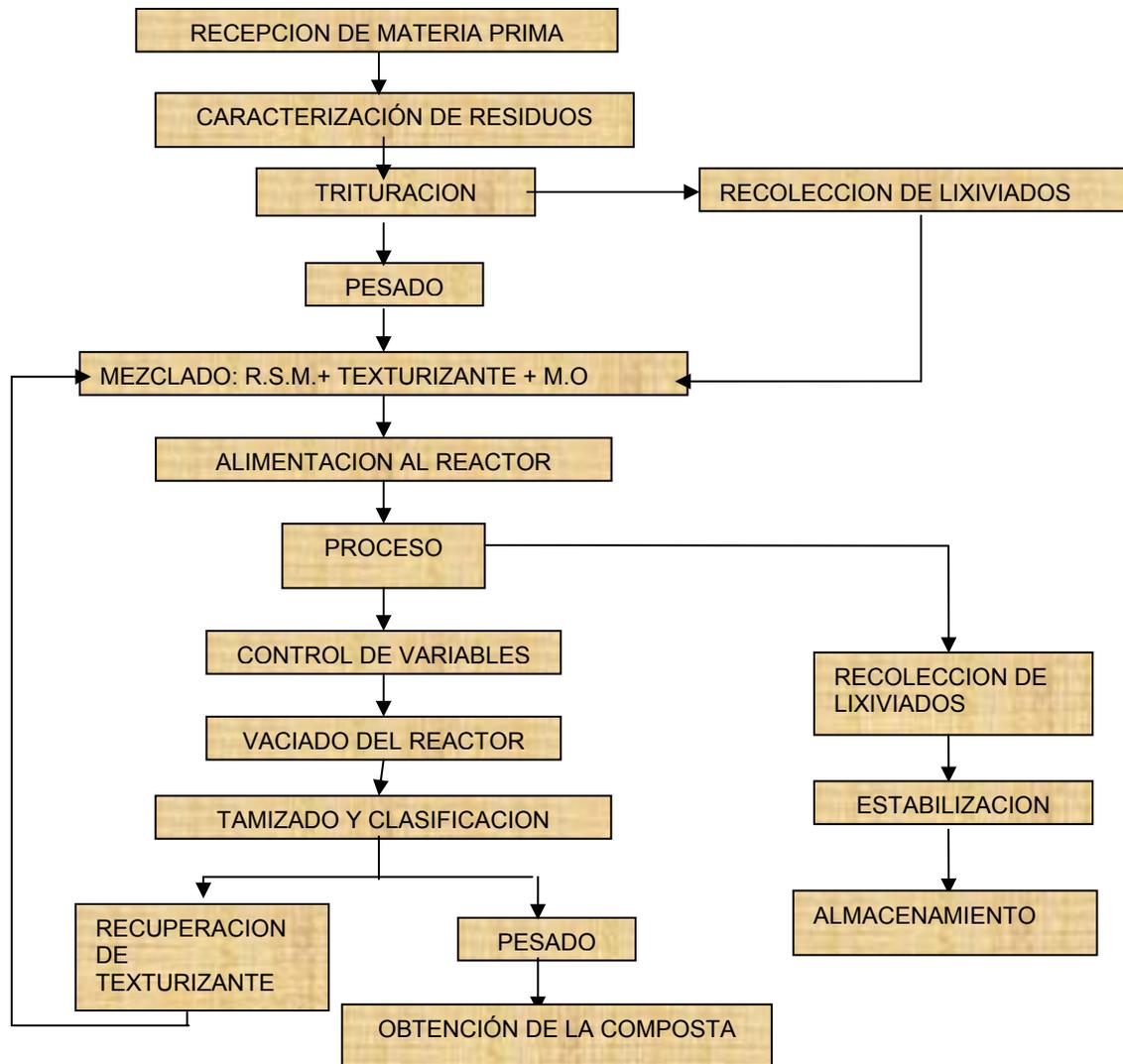


Figura 14. Diagrama de bloques del proceso de composteo.

Descripción del proceso de composteo.

Recepción de los residuos

El proceso se iniciaba en la recepción de los residuos sólidos orgánicos los cuales eran caracterizados, realizando determinación de humedad la cual variaba entre 80-90%, con un tamaño de partícula mayor de 10 cm., y se verificaba visualmente que no contenían contaminantes para el proceso como plástico, vidrio, o algún compuesto tóxico.

Los residuos eran almacenados temporalmente, para posteriormente pasar a la trituración.

Trituración de los residuos

Los residuos eran triturados o cortados para reducir el tamaño de partícula que debe ser de 3 a 5 cm, para el proceso de composteo, en la trituración se generan lixiviados los cuales eran recolectados para reintegrarlos a la mezcla, La paja que se ocupaba como texturizante también era cortada para obtener un diámetro de 10 cm, ya triturados los residuos y el texturizante eran pesados.

Pesado de componentes de la mezcla

Los componentes de la mezcla son pesados, en una báscula de 50 kg y colocados en un contenedor, en donde posteriormente eran transportados al área de mezclado.

Mezclado

El mezclado de los residuos sólidos, con la paja, aserrín y activador se realizaba en un utilizando un área lisa de 2 x 2 m con una pala, el mezclado era realizado hasta lograr una apariencia visual homogénea, la mezcla era llevada al reactor donde es vertida para comenzar su degradación.

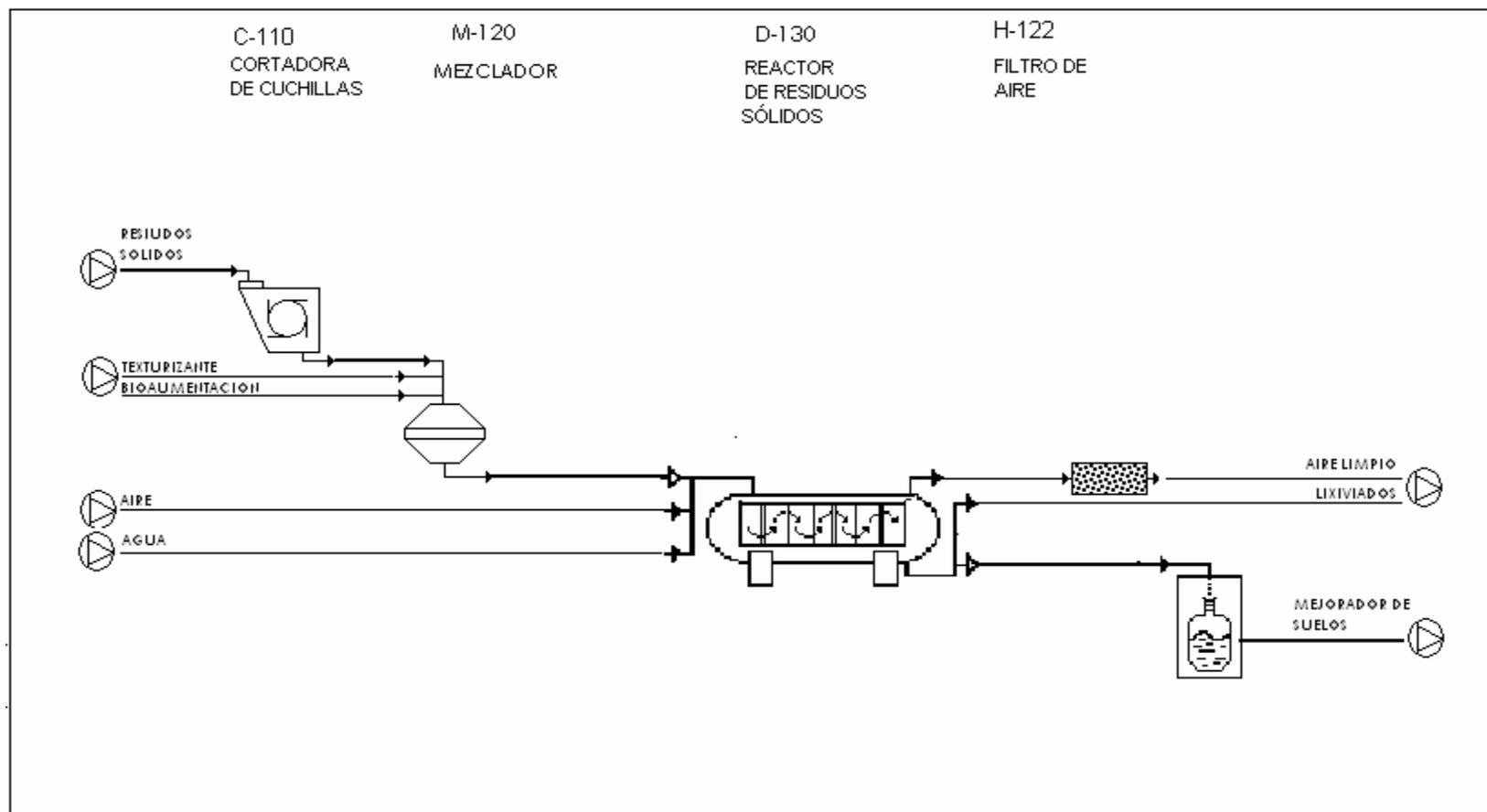
En el Reactor

Durante el proceso de degradación con un tiempo de 28 +/- 2 días la mezcla es monitoreada con sensores de temperatura, se realiza determinación de humedad y determinación de pH, para tener controladas estas variables, es decir mantenerlas dentro de intervalos óptimos, la aireación se realizaba con el mezclador manualmente con un movimiento a favor de las manecillas del reloj por un tiempo de 15 minutos transcurrido el tiempo de proceso de 28 días y el decremento de la temperatura, se realizaban determinaciones de humedad, pH y relación C/N, si la mezcla cumple con la características para ser usado como abono como son C/N de 12, humedad de 40%, pH de 6-7 y olor a tierra mojada, el reactor es vaciado a un contenedor o tina.

Tamizado de la composta

La composta obtenida del reactor era tamizada, con mayas 3, 8, 15 mm de abertura, de la marca montinox tamiz de pruebas físicas, la composta retenida en la maya 15 mm era separada y se puede utilizar como abono en jardines y en la agricultura, la composta retenida en la maya de 8 y 3 mm se puede utilizar como abono para macetas y en viveros y la composta que pasaba la maya de 3 mm era incorporada al proceso de compostaje como activador. El texturizante, recuperado también era reincorporado al proceso, pero no se consideraba como la misma capacidad de absorción que el texturizante limpio, por lo que solo del 7% que se utilizaba de paja solo el 1% era tomado del texturizante recuperado, la composta era pesada y almacenada.

Figura 15. Diagrama de flujo para el tratamiento se residuos sólidos orgánicos.



f. Descripción del proceso en el reactor

El tiempo de residencia fue de 28 +/- 2 días, el cual se realizó en tres etapas, las cuales están determinadas por la temperatura, que permiten garantizar la degradación-reducción de los residuos, lo que repercute en el diámetro de partícula y en el volumen (14).

Primero se realiza la alimentación del reactor con la mezcla, para iniciar el proceso de degradación.

La primera etapa .Es la mesofílica en la cual la temperatura va de 25 °C y los 45 °C en un tiempo de 1 a 2 días, debido a que el consorcio microbiano se adapta rápidamente, empieza a elevar la temperatura en un tiempo de 3-4 hrs. Durante esta etapa hay se mezcla 15 min. aproximadamente, cada 12 h.

La segunda etapa Es la termofílica la cual para el proceso de composteo es la más importante, donde la temperatura va de los 45°C a los 65°C, tiene una duración de 10-15 días, en esta hay que controlar todas las variables de proceso las cuales son:

- Temperatura 55-65°C
- pH 5 a 7
- Humedad 60%

En esta etapa inicialmente la materia orgánica es utilizada por microorganismos degradadores, los cuales en un proceso exotérmico elevan la temperatura de la masa aproximadamente de 45-65°C. En esta fase se presentan microorganismos termófilos aerobios, debido al movimiento continuo de la materia durante la fermentación. Durante esta fase termofílica; que tiene una duración aproximada de entre 10 y 15 días, se eliminan los organismos patógenos para seres humanos y las larvas de insectos garantizando de esta forma obtener sanitariamente el producto final.

La tercera etapa, La fase de maduración, hay un decremento en la temperatura y en la humedad, hasta que se obtiene un producto estable de aspecto oscuro y cuyas propiedades agronómicas son comparables con las del humus. Finalmente, se percibe olor a tierra mojada

La tercera etapa es de un tiempo de 10-15 días, en el cual el material se estabiliza después, para esta etapa el diámetro de partícula es menor a 2 cm, como tenemos controladas las variables del proceso el tiempo se reduce casi 4 veces que por el método tradicional, el cual es de 4-6 meses.

Es importante mencionar que se está buscando un aislante para el reactor ya que cuando la temperatura ambiente baja, la de la mezcla también, entre 5-10 °C, esto pasa durante la noche.

Terminado el tiempo dentro del reactor se traslada a área de almacenaje de composta donde se empacará en costales para su utilización.

7.3 Diseño del reactor

A. Bases de diseño

Capacidad de tratamiento: 1 Tonelada.

Requerimiento de aire: 0.4626 m³/h

Relación superficie a volumen mínima

El tamaño del reactor permite manejar una cantidad suficiente de mezcla, para que se alcancen temperaturas semejantes a las obtenidas en grandes volúmenes de mezclas. En consecuencia, el tamaño del reactor permite obtener información para el escalamiento del proceso.

B. Descripción del reactor

El reactor tiene una forma cilíndrica interior de 2.2 m de longitud, diámetro de 1 m y volumen de 1.6 m³. el cual es de plástico de alta densidad cuenta con un mezclador manual central, el cual se giraba cada 12 h y en caso de que se desee hacer continuo el movimiento se puede realizar velocidad de 0.3 -05 rpm con este mezclado se logra mantener un buen proceso aerobio.

En la figura 16 se muestra el diagrama del reactor, el cual esta conformado por dos cilindros concéntricos, el interno esta cubierto en su totalidad por perforaciones de 5 mm de diámetro con separación de 5 cm cada una, lo que ayuda que el intercambio de calor con el medio ambiente se mínimo y permite el libre paso de los lixiviados hacia la pared externa.

El reactor tiene una inclinación de 5 ° para que los lixiviados se dirijan al fondo del reactor donde fueron recolectados en un deposito de almacenamiento de 30 * 30 cm que se encuentra al final de nuestro reactor y el aire tiende a subir y así se dirigirse a filtro que se colocaría en la parte superior del reactor. Las tapas del reactor cuentan con una perforación central de 7.5 cm de diámetro, por la que pasa el mezclador. Cabe mencionar que nuestro reactor contaba con sensores que median la temperatura, lo que permitirá un mejor control sobre el proceso.

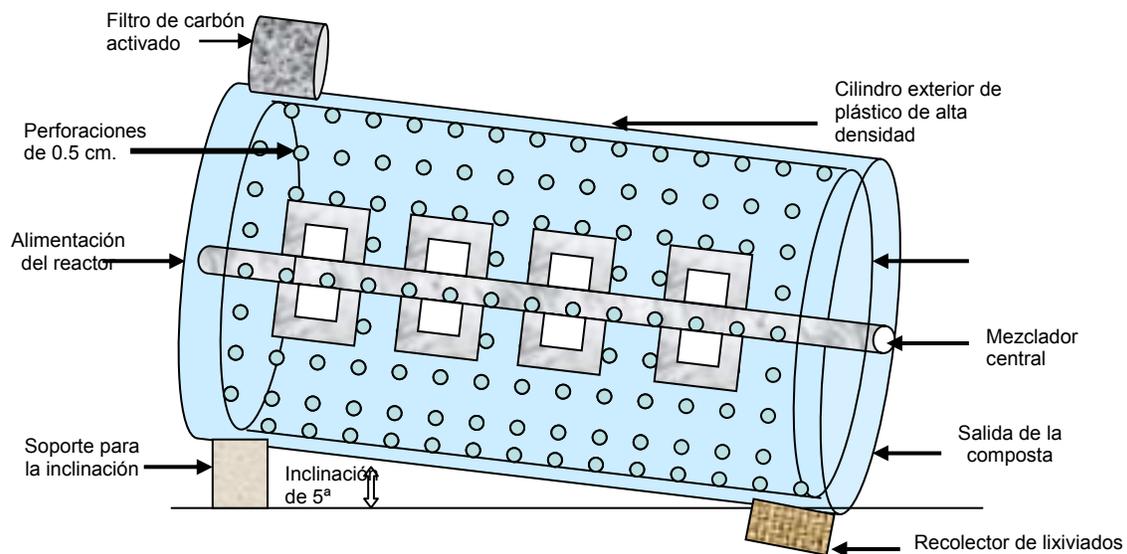


Figura 16. Diagrama del reactor.

C. Balance de materia en el reactor

Con los resultados obtenidos conjuntamente con los reportados en literatura (1,7) se realizo un balance de materia en la figura 17, solo se realizo en el reactor ya que la transformación importante de la materia prima se lleva en este.

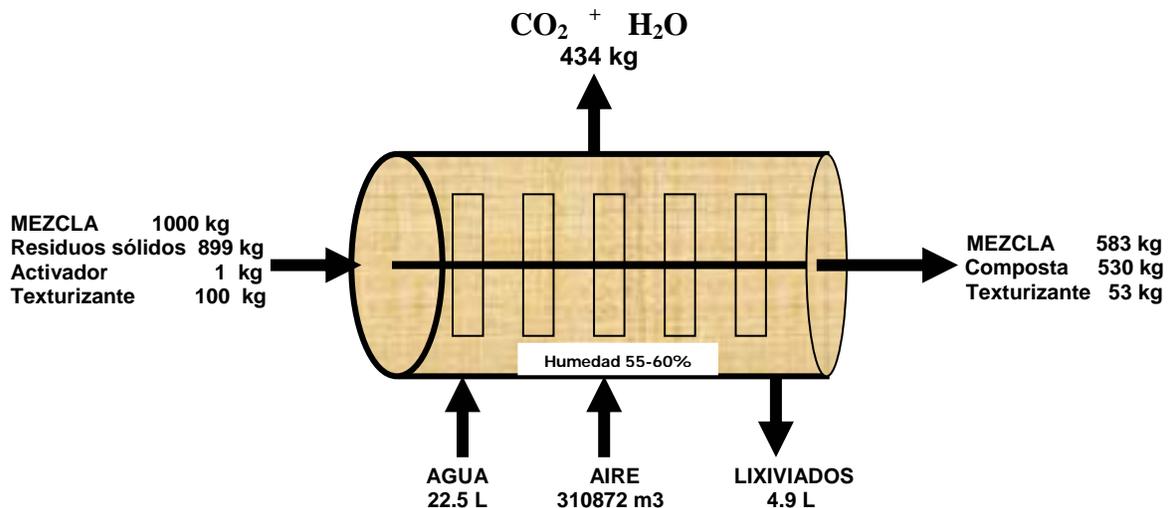


Figura 17. Balance de materia en el reactor, para el proceso en lote.

7.4 Comparación de nuestro proceso en el reactor con el proceso tradicional de pila.

A. Descripción del reactor y la pila

En la figura 18 se muestra la forma y dimensiones del reactor y de la pila para este experimento, como se puede observar las dimensiones ocupadas son menores a las propuestas, esto se realizo, debido a la poca disponibilidad de los residuos sólidos que eran proporcionados para nuestros experimentos y el reactor solo contaba con el cilindro interno. En el caso de la pila se tomo de literatura (1) en dimensionamiento de base 2 h y altura h.

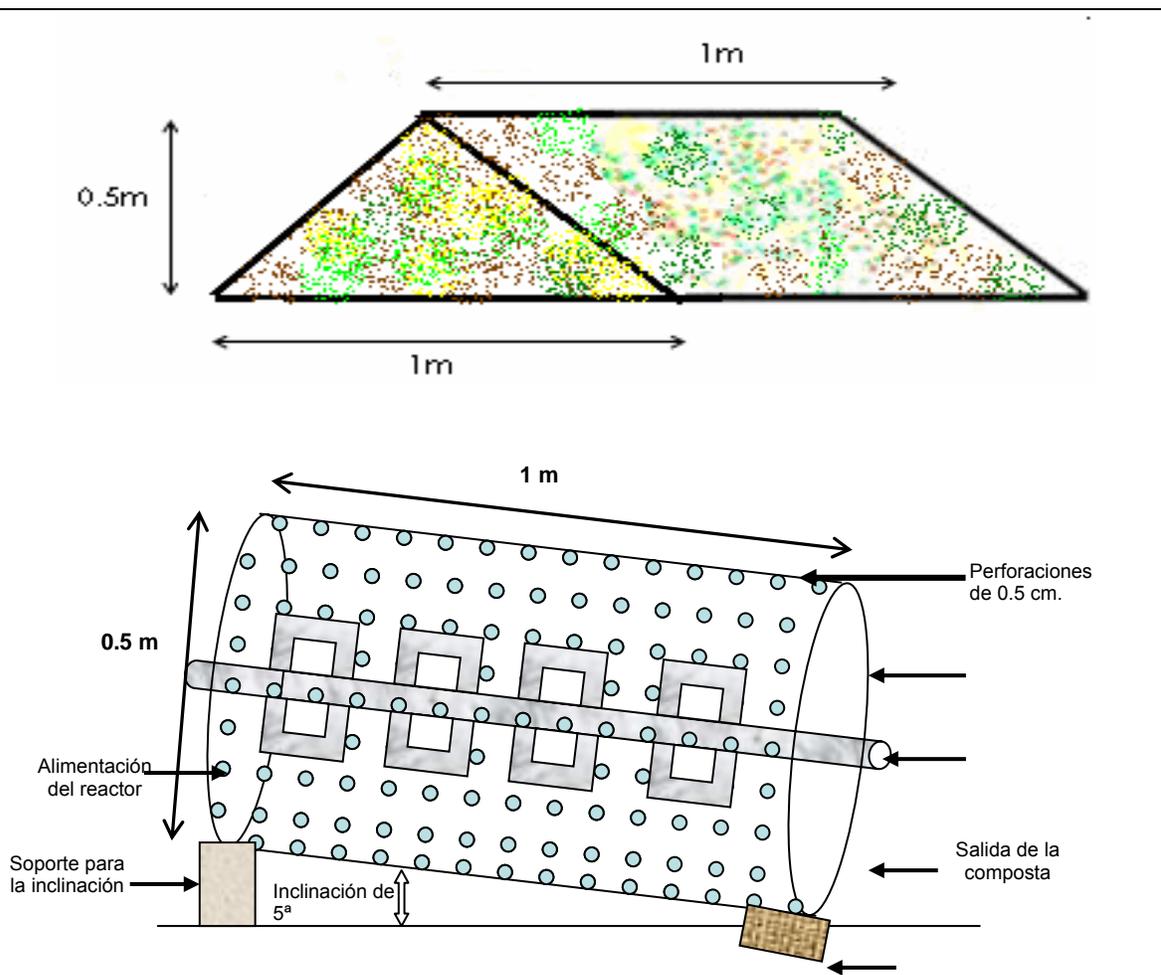


Figura 18. Diagrama y dimensiones de la pila y el reactor.

B. Descripción del experimento.

El reactor fue alimentado con 250 kg de mezcla, 89.9% residuos sólidos, 3% aserrín, 7% paja y 0.1 % activador, la misma cantidad y mezcla se colocó en la pila, tanto la pila como el reactor fueron monitoreados por 2 semanas para ver el comportamiento de la temperatura, y la humedad. Los sensores fueron colocados a diferentes profundidades de 10 cm y 25 cm, como la muestra la figura 19, el reactor y la pila fueron tratados de la misma y realizaron las mismas determinaciones. El mezclado se realizó cada 12h con un tiempo aproximado entre 10-15 minutos, hasta que tuviera una apariencia homogénea.

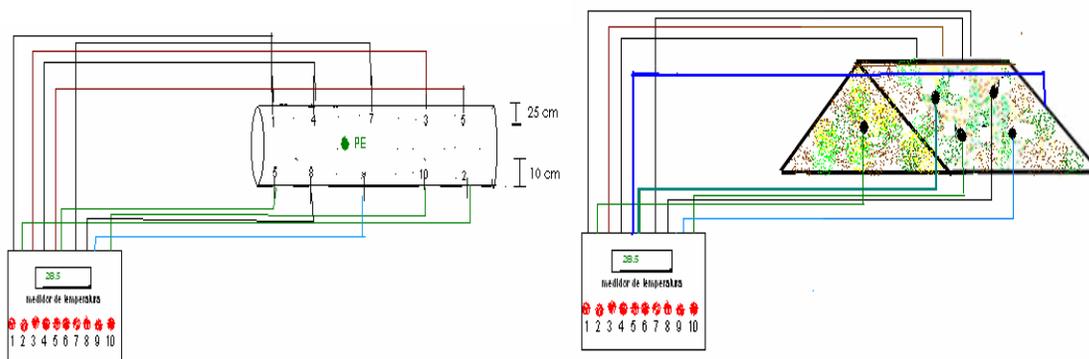


Figura 19. Lugar donde fueron colocados los sensores en el reactor y en la pila.

C. Temperaturas

En la figura 20 se observa que el proceso cumple con las 2 etapas, que están definidas por la temperatura la mesófila: 25 a 45 °C, que se llevó en 2 días y Termofílica: 45 a 60 °C , la cual se puede observar que duro aproximadamente 10 días. Este experimento fue realizado en la época invernal, lo que nos daba temperaturas ambientales muy bajas, la temperatura reportada en la grafica fue obtenida durante el día, se observa que la temperatura ambiente varia entre 11°C y 21°C, lo que no afectaba al proceso, la fase termofílica obtuvo temperaturas dentro de intervalo óptimo, cabe mencionar que por las noches la temperatura variaba entre 6-12 °C lo que provoco que la temperatura de la composta en el reactor bajara entre 2-4 °C, esta disminución de temperatura no es importante, debido a que el proceso continuaba dentro de intervalos óptimos.

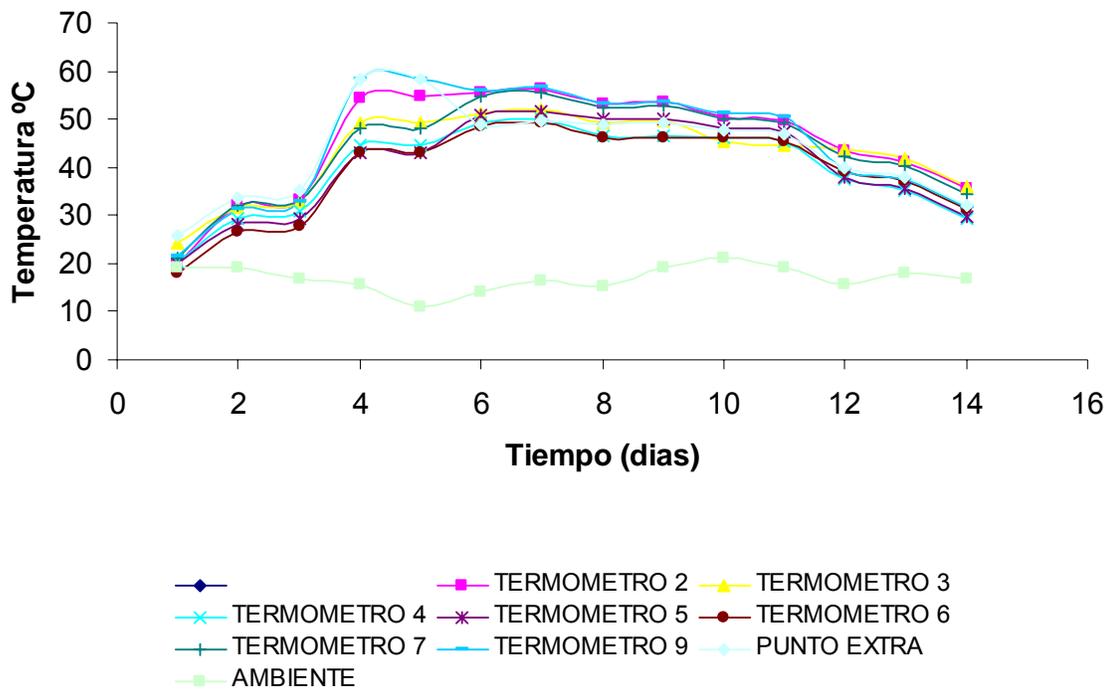


Figura 20. Temperaturas obtenidas durante el día en el reactor.

D. Humedad y adición de agua

La figura 21 muestra una comparación de la humedad obtenida en la pila y el reactor, y la cantidad de agua adicionada para mantener la humedad. Esta determinación se realizó cada 3 días, por triplicado se observa una diferencia a partir del la segunda terminación, la humedad de la composta en el reactor se puede observar dentro de valores óptimos de 50-60% en la fase termofílica, y la cantidad de agua necesaria para mantenerla fue de 2.5 L, debido a que la capacidad de intercambio con el medio ambiente tanto de calor como de vapor de agua es contenida por el material del reactor y por la poca superficie de intercambio con el medio ambiente, a diferencia de los resultados obtenidos con la pila.

Al inicio del experimento se pretendía adicionar la misma cantidad de agua al reactor y a la pila, pero debido a que la pila tiene una mayor área de transferencia, con medio ambiente se le tenía que adicionar mas agua, se observa que la perdida de humedad y la adición de agua es mayor que en el reactor, por lo que se puede observar la humedad se mantiene dentro de intervalos óptimos para el proceso de composteo en el reactor que en la pila tradicional.

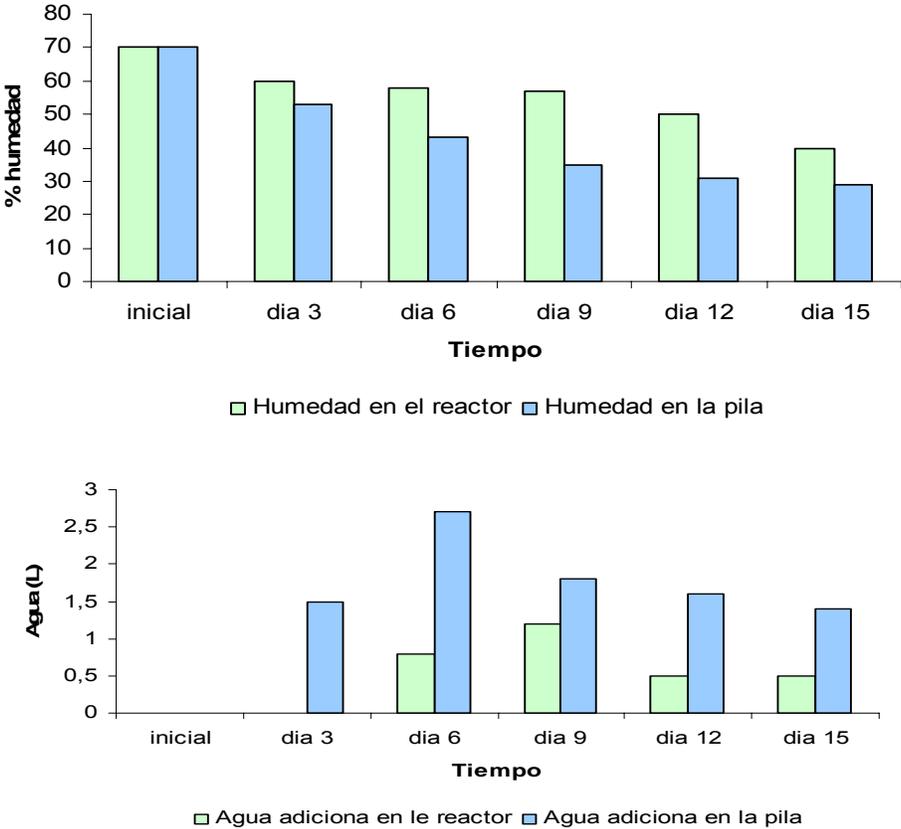


Figura 21. Comparación de humedad y adición de agua en el reactor vs. pila.

E. generación de lixiviados.

La mezcla que se obtuvo puede soportar, una altura de 1 m teniendo una generación de lixiviados de +/- 5 ml por kg de mezcla, siempre y cuando el mezclado sea cada 12 h por un tiempo aproximado entre 10 -15 min.

En la grafica 22 se muestra la generación de lixiviados, en el reactor y la pila la cual podemos observar la diferencia es de 0.4 ml/kg de mezcla/día entre los dos, por lo que se puede decir, que la mezcla obtenida funciona tanto en el reactor como en la pila, para la minimización de generación de lixiviados.

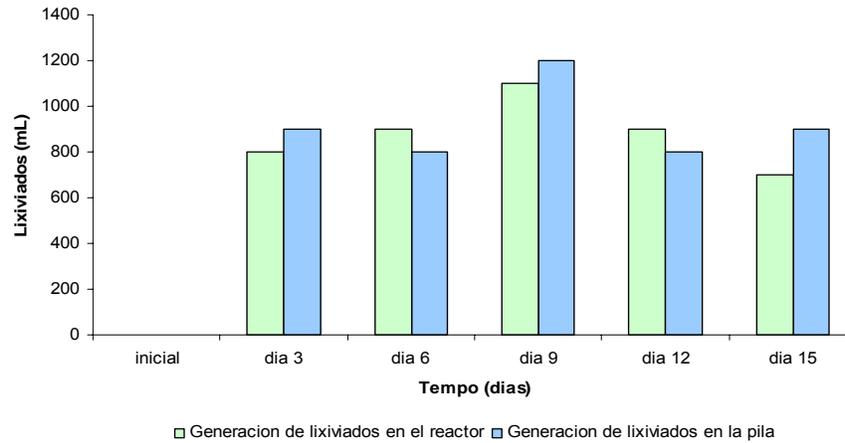


Figura 22. Generación de lixiviados

F. Comparación de temperaturas.

Uno de los parámetros más importantes dentro del proceso de composteo, es la temperatura, en la figura 23, se muestra un comparativo de las temperatura promedio obtenidas por el proceso de composteo dentro del reactor y en la pila tradicional, se observa que en el reactor, no es influido por la temperatura del medio ambiente, se alcanzan las temperaturas para la fase termofílica, se mantiene constante esta temperatura, se observa que la temperatura ambiente influye directamente en le proceso de composteo en la pila, la cual no alcanza las temperaturas termofílicas y las variación de la temperatura esta dada por la temperatura ambiente,

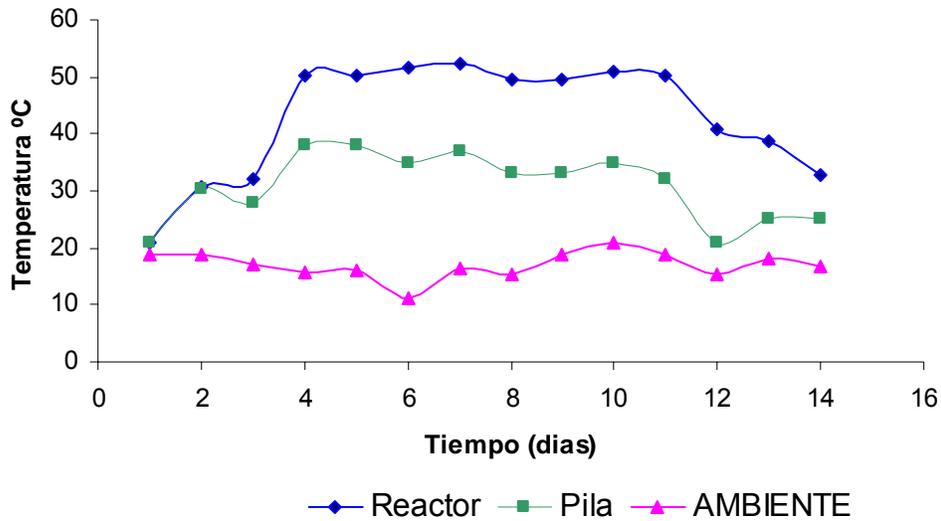


Figura 23. Comparación de la temperatura en el reactor vs. pila tradicional

Al finalizar el tiempo de 28 días se realizó la determinación de pH y relación carbono-nitrógeno, los resultados obtenidos para el reactor fueron de pH de 7.8 y C/N de 13.4 y para la pila fueron de pH 6.3 y C/N de 24.31, esto se esperaba ya que el reactor mantuvo la composta dentro de los intervalos óptimos de operación, de temperatura, humedad y aireación y la pila no.

El proceso propuesto para el composteo de residuos sólidos, permite el control de las variables de proceso, con esto se acelero el tiempo de degradación casi 4 veces a 28 días, la generación de malos olores fue controlada teniendo una buena aireación de la mezcla, se minimizo la influencia de las condiciones climáticas en el proceso, ya que la temperatura ambiente no influía en la temperatura de la mezcla y se minimizo la atracción de la fauna nociva, teniendo controlado la anterior , el producto final tiene una buena calidad.

8. CONCLUSIONES

- La composición de la mezcla de residuos sólidos que permitió acelerar el proceso de composteo, es la siguiente:
 - Residuos sólidos 89.9%
 - Aserrín 3%
 - Paja 7%
 - Activador biológico 0.1%
- La relación C/N inicial fue de 30. En la literatura, se ha comprobado que este valor proporciona la cantidad de nitrógeno y carbono necesarios para la proliferación de microorganismos degradadores de materia orgánica. La relación C/N final fue de 13.4, valor que está en el intervalo que la literatura reporta como óptimo, para composta de buena calidad.
- El reactor fue de forma cilíndrica de 1m de diámetro por 2.2 m de largo, con un volumen de 1.6 m³, capaz de contener una tonelada de mezcla. La geometría del reactor proporciona una menor área de transferencia de calor, permitiendo una menor pérdida de calor y obtener una mayor temperatura. El tamaño del reactor permite manejar una cantidad suficiente de mezcla, para que se alcancen temperaturas semejantes a las obtenidas en grandes volúmenes de mezclas. En consecuencia, el tamaño del reactor permite obtener información para el escalamiento del proceso. La contención del reactor permitió mantener temperaturas ideales durante la mayor parte del proceso; y, el mezclado completo del contenido del reactor, realizado cada 12 horas, minimizó la generación de olores.
- El proceso propuesto para el composteo de residuos sólidos, con un reactor permite el control de las variables de proceso, la temperatura alcanzada en el reactor no se vio afectada por la temperatura del medio ambiente y se obtuvo la temperatura termofílica, lo que nos indica que la actividad de los microorganismos esta realizando la degradación de materia orgánica, controlando esta variable se acelera el tiempo de degradación casi 4 veces a 28 días, se minimizó la

generación de malos olores, teniendo una buena aireación de la mezcla, y se minimizó la atracción de la fauna nociva, teniendo controlado la anterior.

- El producto final tiene una buena calidad a diferencia del proceso llevado en pila tradicional, este se ve afectado por las condiciones climáticas, la temperatura varia en función de la temperatura del medio ambiente, y la humedad también es afectada, lo que repercute en un tiempo de degradación, prolongado hasta 6 meses, tiende a atraer fauna nociva, como moscas y animales que se alimentan de los residuos.
- Finalmente el control de las variables de operación del proceso de composteo en un reactor, permite obtener una composta de buena calidad en menor tiempo, con respecto al proceso tradicional.

9 .RECOMENDACIONES

- Antes de realizar la mezcla se debe caracterizar los componentes ya que la proporción de estas varía de acuerdo a la humedad y procedencia de los residuos sólidos.
- Realizar pruebas a nivel piloto del comportamiento de la mezcla con residuos que contengan humedad mayor a 90 %.
- Se debe determinar un medio aislante para el reactor, para evitar que cuando baje la temperatura ambiente, baje la temperatura de la mezcla.
- Utilizar un sensor de humedad par el reactor.

10. BIBLOGRAFIA

1. Montoya Gómez. Javier Responsable de obras de la UNAM.2003.<http://www.obras.unam.mx/composta/composta.html> .
2. Olds College. Alberta Composting makes Compost. Composting Manual., Canadá.
3. Eweis B. Juana,"Principios de Biorrecuperación", McGraw-Hill, Toronto, 1999. Capitulo 2,8
4. Röben Eva,"Manual de Compostaje Para Municipios" DED/ Ilustre Municipalidad de Loja. Loja, Ecuador. 2002.
5. Rodríguez Salinas Marco Arturo, Tesis "Estado actual de la producción de Composta en el Valle de México," U P I B I.IPN. Septiembre 2001 .
6. Soto Cruz Oscar " Effect of substrate composition on mycelial growth of *Pleurotus ostreatus*. An analysis by mixture and respse surface methodologies", Process biochemistry, UAMI, México 1999.
7. Tchobanoglous,G.,Theisen,H. y Vigil,S.A.,Gestión integral de residuos sólidos. vol.1,McGraw-Hill, Madrid, España,1998.
8. Robles Martínez Fabián. Generación de biogás y lixiviados en los rellenos sanitarios. IPN.2005.
9. Ramírez Sánchez Irving Moisés, tesis "Evaluación de materiales texturizantes en el proceso de composteo de los residuos sólidos orgánicos generados en la central de abasto de la ciudad de México" UPIBI, IPN, Septiembre 2002.
10. Geankoplis C. J. Procesos de transporte y operaciones unitarias, 3era.edición, CECSA. México. 2000. Pp 475-490 y 865-879 .
11. Perry Robert H. Manual del Ingeniero Químico, 7ta edición, McGraw-Hill, Toronto, 2003.
12. Mott L.Robert, Mecánica de fluidos Aplicada 4ta.edición, Prentice Hall. Venezuela 1996, Cap.2
13. Kiely Generard, Ingeniería Ambiental, Fundamentos, entorno, tecnologías y sistemas de gestion, McGraw-hill, España,2003.
14. Ulrich Gael D. Diseño y Economía de los Procesos de Ingeniería Química. McGraw-Hill 1era, Edición Toronto.
15. Rittmann E. Bruce, Biotecnología del Medio Ambiente, principios y Aplicaciones., McGraw-Hill, Toronto, 2001.
16. Cortinas de Nava Cristina. Minimización y Manejo Ambiental de residuos sólidos.1era.edición SEMARNAP. México.1999.

11. GLOSARIO DE TERMINOS

Aerobio.- Organismos que crece en presencia de oxígeno, puede ser facultativo u obligado.

Anaerobio.- Organismo que se desarrolla en ausencia de oxígeno.

Biodegradable.- Sustancias que pueden ser transformadas mediante la digestión de microorganismos en otras químicamente más sencillas.

Composta.- Es un anglicismo de *compost* en la lengua inglesa que se refiere a "una mezcla de sustancias orgánicas descompuestas o estabilizadas para fertilizar u.n suelo". Se utiliza en el área de manejo de residuos sólidos para referirse a abono que es "una sustancia orgánica con que se fertiliza la tierra" En los términos que se emplea el término composta es que considera la lengua inglesa como *compost* o la lengua española como abono.(9) La palabra composta proviene del latín *componere*, juntar (5).

Composteo.- Es un proceso de degradación aeróbica por medio de microorganismos para tratar los residuos de origen orgánicos.

Contaminante.- Los contaminantes de la composta incluyen vidrio, plástico, vidrio, metales pesados y compuestos tóxicos. {

Contenido de humedad.- Cantidad de agua contenida en la material orgánica en degradación.

Descomposición.- Proceso por el que la material orgánica se divide o se transforma en partes más simples.

Inorgánico.- Material de origen mineral.

Lixiviado.- Es el arrastre por el agua de materiales solubles que se drenan de la mezcla de material orgánica.

Materia orgánica.- Residuos sólidos orgánicos típicos generados en la Central de Abastos de la Ciudad de México: Jitomate, plátano, papaya, naranja, piña, lechuga.

Muestreo.- Acción de escoger nuestras representativas de la calidad o condiciones medias de un todo.

Orgánico.- Sustancia cuyo componente constante es el carbono, en combinación con otros elementos.

Patógeno.- Organismo incluido virus, bacterias, hongos y protozoarios capaces de producir una infección y/o enfermedad en al huésped.

Pila de composta.- Materia orgánica mezclada con el texturizante dentro del reactor o celda de composteo.

Texturizante.- Acondicionador, Agente esponjante, soporte. Material que crea una diferente disposición entre sí de las partículas de materia orgánica en la pila de composteo: viruta de Madera, residuos de poda, lirio acuático, composta.

Temperatura ambiente.- temperatura fuera de la pila de composta

Reactor: Equipo, que permite controlar variables de un proceso.

Relación Carbono-Nitrógeno .- Es el parámetro utilizado como control de calidad de los residuos sólidos de un proceso, utilizando como base la materia orgánica.

12. ANEXO 1

TÉCNICAS ANALÍTICAS

1. Determinación de humedad.

- a. Se coloca una cápsula de porcelana en la estufa a 120 °C durante dos horas, transcurrido ese tiempo se pasa al desecador durante dos horas como mínimo o hasta obtener peso constante.
- b. Se vierte la muestra sin compactar hasta un 50% del volumen de la cápsula.
- c. La cápsula es pesada con la muestra y se introduce a 70 °C durante 2 horas, se deja enfriar y se pesa nuevamente. Se repite esta operación las veces que sea necesario hasta obtener peso constante (se considera peso constante cuando entre dos pesadas consecutivas la diferencia es menor al 0,01 %).

CÁLCULOS

$$\% H = \frac{Mh - Ms}{Mh} * 100$$

% H = Humedad en %

Mh = Peso de la muestra humedad en g

Ms = Peso de la muestra seca en g

2. Determinación de materia orgánica

- a. Simultáneamente correr un blanco por cada serie para obtener el factor de corrección.
- b. Triturar la muestra en un mortero hasta obtener una consistencia similar al talco.
- c. Pesar 0,1 g de la muestra y transferirlos a un matraz Erlenmeyer de 250 ml
- d. Agregar con 10 ml de dicromato de potasio.

-
- e. Agregar 20 ml de ácido sulfúrico concentrado.
 - f. Agitar enérgicamente durante un minuto.
 - g. Dejar reposar durante 30 minutos.
 - h. Posteriormente agregar 100 cm de agua. y añadir 3 gotas de fenantrolina.
 - i. Titular con sulfato ferroso amoniacal hasta que vire.

CÁLCULOS

$$\% Mat.org = \frac{(V1N1 - VNF)k}{P}$$

En donde:

V1 = Volumen de solución de dicromato de potasio empleado en la muestra en

N1 = Normalidad de la solución de dicromato de potasio.

V = Volumen de solución del sulfato ferroso gastado en la titulación de la muestra de ml.

N = Normalidad de la solución de sulfato ferroso.

P = Peso de la muestra en g.

K = 0,69

F = Factor de corrección y se obtiene por la siguiente fórmula:

$$F = \frac{VoN1}{VbN}$$

Vo = Volumen de solución de dicromato de potasio empleado en el blanco en ml.

V_b = Volumen de sulfato ferroso gastado en la titulación del blanco en ml.

3. Determinación de pH

- a. Pese 0,5 g composta seca en un vaso de precipitados.
- b. Agregue que 2,5 ml de agua destilada a cada muestra.
- c. Mezcle completamente entonces durante 5 s y dejar reposar durante 10 minutos.
- d. Lea el pH con un pH-metro calibrado anote el pH de la composta en agua

3. Determinación de nitrógeno

- a. Solución indicadora: Disolver 0,5 g de verde de bromocresol y 0,1 g de rojo de metilo en 100 ml de metanol al 95% y ajustar el pH a 4.5.;
- b. Correr un blanco de agua.
- c. Pesar 0,5 g de muestra en matraz Kjeldahl.

- d. Agregar 0.2 g de ácido salicílico y 40 ml de ácido sulfúrico concentrado, agitar, hasta que el ácido se incorpore totalmente a la muestra.
- e. Dejar reposar 30 minutos, y después añadir 10 g de tiosulfato de sodio, agitar y dejar reposar por un período de 5 minutos.
- f. Agregar 10 ml de agua oxigenada y una pizca de mezcla digestora.
- g. Transcurrido el tiempo calentar la mezcla en el matraz Kjeldahl hasta que no exista desprendimiento de humos blancos y la solución se clarifique.
- h. Continuar la digestión durante 30 minutos más.
- i. Añadir 1 g de sulfato cúprico y 10 g de sulfato de potasio llevar a digestión hasta que la solución sea incolora ó de color amarillo paja.
- j. Retirar el matraz y dejar enfriar a temperatura ambiente.
- k. Preparar un matraz Erlenmeyer de 500 ml, dentro del cual se vierten 25 ml de solución de ácido sulfúrico y de 3 a 4 gotas de solución indicadora de naranjo de metilo y se coloca abajo del condensador a manera que la punta quede en seno del líquido.
- l. Agregar al matraz de destilación 4 granallas de zinc y 2 perlas de vidrio.
- m. Adicionar con cuidado 100 ml de solución de hidróxido de sodio 10 N, resbalando por las paredes del cuello del matraz y conectar al destilador.

Destilación

- a. Encender la parrilla del destilador
- b. Inclinar el matraz y agragr con mucho cuidado 150 ml de la solución de hidroxido de sodio.

El matraz se calienta hasta que destile todo el amoniaco hasta un tercio del volumen inicial.

-
- c. Colocar el matraz colector del destilado en forma tal que el tubo de vidrio de descarga conectado al condensador quede sobre la boca del matraz libre del contacto con la solución de ácido bórico 0.1 N y se continúa destilando aproximadamente cinco minutos.
 - d. Se interrumpe el calentamiento, se retira el matraz colector y se titula con la solución de ácido sulfúrico 0.1 N hasta que la solución vire.

CÁLCULOS

El nitrógeno total en por ciento se calcula con la siguiente fórmula:

$$\%N1 = \frac{(AN1 - BN2) * 0.014 * 100}{M}$$

Donde:

A = Volumen de la solución de ácido sulfúrico empleada en la recolección del amoníaco destilado.

N1 = Normalidad del ácido sulfúrico.

B = Volumen de la solución de hidróxido de sodio empleado en la neutralización de la solución de ácido sulfúrico.

N2 = Normalidad de la solución de hidróxido de sodio 0.1 Normalidad sulfúrico.

M = Masa de la muestra en g.

0.014 = Miliequivalente del nitrógeno.

4. Determinación de la relación carbono – nitrógeno

CÁLCULOS

La relación Carbono / Nitrógeno (C/N) está en función del % de materia orgánica (%M.O.), obtenida de acuerdo a la constante de Jackson y del % de Nitrógeno total.

Para determinar el contenido de carbono se multiplica el % de materia orgánica x 0.58, donde:

0,58 = constante dada por Jackson.

Por lo tanto, la ecuación para determinar la relación (C/N) es:

$$C/N = \frac{\% M.O * 0.58}{\% N}$$

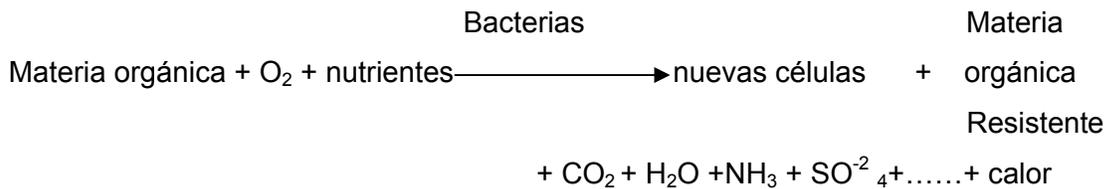
donde: -

% N = % Nitrógeno total

% M.O. = % Materia orgánica

Requerimiento de oxígeno.

Los datos anteriores nos permiten dimensionar el reactor y verificar la forma en que responderá la mezcla dentro del reactor así mismo saber los requerimientos de oxígeno, este dato se obtuvo de la siguiente ecuación:



Teniendo que la material orgánica se representa en una base molar en $C_aH_bO_cN_d$

Y la composición del material resistente (composta) también en base molar como $C_wH_xO_yN_z$ La cantidad requerida de oxígeno requerida para la estabilización aerobia de la fracción biodegradable de los RSO puede estimarse:



Suponiendo (7) que la composición inicial del material orgánico que se va a descomponer tiene como formula $(C_6H_7O_2 (OH)_3)_5$ y que la composición del material residual se estima como $(C_6H_7O_2 (OH)_3)_2$ y considerando que después de la recuperación del texturizante se reduce hasta un 53% del total del proceso inicial tomando en consideración 1000 kg de mezcla al inicial el proceso y final obteniendo 470 kg se tiene:

Se necesitan 708 Kg. de oxígeno por tonelada. Tomando en cuenta que el aire tiene 21% de oxígeno se necesitan 13486 kg de aire para cubrir el requerimiento, tomando la densidad del aire de 10.834 kg m^3 se tiene:

Se necesitan 1245 m^3 de aire para la oxidación total. Teniendo que el proceso se lleva en 28 días se tiene;

$0.4626 \text{ m}^3/\text{h}$ para una 1 tonelada