

Actividad microbiana en el proceso de compostaje aerobio de residuos sólidos orgánicos

Microbial activity in the aerobic composting process of organic solid waste

Salazar Arce, Takeshi

E. P. Ingeniería Ambiental - Universidad Peruana Unión - Lima

Recibido 18 de agosto del 2014 - Aceptado 12 de noviembre del 2014

Resumen

El objetivo de esta revisión es describir la actividad microbiana en el proceso de compostaje aerobio de los sólidos orgánicos. El compostaje es el proceso de descomposición termofílica aerobia de residuos sólidos orgánicos por poblaciones mixtas de microorganismos en condiciones controladas, para producir un material orgánico estabilizado y humificado conocido como compost. En las etapas del proceso de compostaje, los microorganismos mesofílicos y termófilos intervienen en la descomposición de la materia orgánica. Para mejorar la composición química y la estructura del compost se adicionan insumos tales como activadores, inoculantes y enriquecedores. La aplicación de activadores orgánicos como mejoradores del proceso de compostaje facilita la biotransformación de los residuos orgánicos. La eficiencia en la degradación de la materia orgánica en el proceso del compostaje depende inicialmente y primordialmente de las comunidades microbianas, las cuales aceleran el proceso de descomposición del material orgánico.

Palabras clave: Compostaje, microorganismos, actividad microbiana, residuos sólidos orgánicos, aerobio

Abstract

The aim of this review is to describe the microbial activity in the aerobic composting process of organic solids. Composting is the aerobic thermophilic decomposition process of organic solid wastes by mixed populations of microorganisms in controlled conditions to produce a stabilized and humified organic material known as compost. In stages of the composting process, mesophilic and thermophilic microorganisms involved in the decomposition of organic matter. To improve the chemical composition and structure of the compost are added inputs such as activators, inoculants and enriching. The application of organic activators as enhancers of the composting process facilitates the biotransformation of organic waste. The efficiency of organic matter degradation in the composting process depends initially and primarily of microbial communities, which accelerate the decomposition of organic material.

Keywords: Composting, microorganisms, microbial activity, organic solid waste, aerobic

Introducción

La inadecuada gestión de residuos sólidos urbanos es uno de los principales problemas relacionados con la prestación de servicios básicos a nivel mundial (Altamirano y Cabrera 2006). Los residuos sólidos urbanos esta compuesto por residuos de origen doméstico, comercial, institucional, construcción, servicios municipales biomédicos e industrial. El 51 % de los residuos urbanos es de origen doméstico. Los residuos sólidos domiciliarios están compuestos principalmente por desechos domésticos, a veces con la adición de desechos comerciales recogidos de una determinada área, la cual se encuentra en estado solido o semisólido. El 59 % de los residuos domésticos está compuesto por material orgánico (Berent & Vedoya, 2005).

El hombre con sus actividades industriales y agrícolas generan una gran cantidad de residuos sólidos tanto orgánicos como inorgánicos, que con frecuencia ocasionan impactos al medio ambiente por su inadecuada gestión y tratamiento. El aumento de la cantidad de residuos sólidos está asociado directamente al aumento de la población, los procesos de transformación industrial, agroalimentarios y el consumismo de la población (Bustos, 2009).

El Banco Interamericano de Desarrollo (BID, citado por Azurduy y otros 2009) informa que los países en vías de desarrollo generan un mayor porcentaje de material orgánico biodegradable a diferencia de los países altamente desarrollados. Esta realidad se presenta en América Latina y el Caribe, donde la generación de residuos orgánicos oscila entre un 40 y 70 % (Acurio et al., citados por Azurduy et al., 2009).

Actualmente, ante tal situación se fueron buscando alternativas de tratamiento de los residuos sólidos orgánicos para transformarlos en materia útil para otras actividades productivas, minimizando los efectos negativos sobre el medio ambiente (Azurduy et al., 2009).

Una alternativa de tratamiento de los residuos sólidos orgánicos es el compostaje, que es la degradación de residuos orgánicos por la acción de microorganismos, alterando la estructura molecular de los compuestos orgánicos. Puerta (2004) menciona que según el tiempo de descomposición, se da el grado de madurez al realizar biotransformación o degradación parcial y mineralización o degradación completa, considerada esta como la descomposición total de las moléculas orgánicas en dióxido de carbono, residuos inorgánicos inertes o minerales que se incorporan a la estruc-

tura del suelo, de los microorganismos y de las plantas. El producto final del proceso de compostaje es el compost, el cual se utiliza como acondicionador de suelo en la actividad agrícola y en la biorremediación de suelos.

El proceso de compostaje se lleva a cabo durante 3 a 4 meses, tiempo en el cual se alcanza el grado de madurez al realizar el proceso de biotransformación, mineralización o degradación completa de los residuos orgánicos. El proceso puede resultar lento y presentar elevados costos de operación, por lo cual es necesario buscar formas de acelerar el proceso sin que se altere la calidad del producto y que permita obtener un sustrato orgánico de óptima calidad al término del tratamiento (Soto y Muñoz, citados por Vásquez et al., 2000).

Con el avance tecnológico y estudios recientes, se han planteado diversas alternativas de solución. Un claro ejemplo es la incorporación de aditivos o inoculantes a la composta con el fin de acelerar el proceso. Uno de los aditivos incorporados al proceso de compostaje son los activadores (Uranga, citado por Azurduy et al., 2009), que son un suministro de azúcares, nitrógeno, cepas seleccionadas de bacterias u otros microorganismos, enzimas, plantas medicinales y preparados biodinámicos. Dalzell et al. (citados por Azurduy et al., 2009) indica que todos estos aditivos incrementan la población de microorganismos en los primeros días y aceleran dicho proceso permitiendo disminuir el tiempo de compostaje.

La utilización de microorganismos nativos es una forma de acelerar el proceso de compostaje, aplicando la técnica de bioaumentación. Con la disminución del tiempo de compostaje de 150 días a 40 días, utilizando microorganismos nativos para lograr una rápida aceleración del proceso. El producto final podrá ser utilizado en la actividad agrícola. La producción de compost acelerado a partir de residuos sólidos orgánicos contribuirá a la conservación y recuperación del ecosistema, pues en el proceso no se generan desechos como producto del tratamiento que causen efectos contaminantes al medio (Vázquez et al., 2010). El objetivo de esta revisión es recoger información para describir la actividad microbiana en el proceso de compostaje aerobio de los sólidos orgánicos.

El Compostaje

El compostaje es el proceso de descomposición termofílica aerobia de residuos sólidos orgánicos por

poblaciones mixtas de microorganismos en condiciones controladas, para producir un material orgánico estabilizado y humificado que en condiciones favorables a la actividad microbiana se descompone lentamente. El producto final obtenido, de naturaleza húmica, puede ser utilizado como fertilizante, enmienda orgánica. (Vicente et al., 1996). Por lo tanto el compostaje es considerado una técnica de estabilización y tratamiento de los residuos sólidos orgánicos.

La transformación de la fracción orgánica de los residuos domiciliarios a través del proceso de compostaje constituyen un adecuado procedimiento de tratamiento y valorización de los residuos, evitando los efectos que causa su vertido e inadecuado tratamiento al medio ambiente, obteniendo como resultado final del proceso un material que tiene un interesante valor agronómico. Por lo tanto, el compostaje en la actualidad se propone como una de las mejores alternativas para la gestión de residuos de naturaleza orgánica (Solans et al., 2008).

El Compost

Tchobanoglous et al. (citado por Agámez 2006) define el compost como el producto final que queda después de cesar toda actividad microbiana en la descomposición aerobia biológica de los materiales orgánicos.

De acuerdo al estado de madurez de un compost estos son clasificados como:

- **Compost Estable:**
Butler et al. (citado por Agámez, 2006) declara como al nivel de actividad de la biomasa microbiana existente en el proceso de compostaje.
- **Compost Maduro:**
Butler et al. (citado por Agámez, 2006) establece al grado de finalización del proceso de compostaje. Este puede ser evaluado a través de la

medición de varios cambios en las propiedades químicas, físicas y biológicas de los sustratos, dependiendo de la utilización que el producto vaya a tener.

Tipos de Compostaje

El tipo de compostaje depende de las condiciones previas que se establecen al proceso. Se puede distinguir dos tipos de compostaje: compostaje aerobio y compostaje anaerobio (OPS, 1999).

Compostaje Aerobio

El compostaje aerobio es un proceso exotérmico de degradación y estabilización biológica del material orgánicos en presencia de oxígeno, mediante la acción combinada de una serie de poblaciones de microorganismos asociados a una sucesión de factores ambientales, obteniendo como principales productos del metabolismo biológico: dióxido de carbono, agua y calor. La actividad microbiológica de degradación en condiciones aerobias produce del orden de 13000 kJ por kilogramo de oxígeno consumido. El proceso provoca la variación de temperatura del sistema (Zurcan, 2010).

Compostaje Anaerobio

El compostaje anaerobio o biometanización, es la descomposición de la fracción orgánica en ausencia de oxígeno obteniendo como productos finales metano, dióxido de carbono y numerosos productos orgánicos de bajo peso molecular como ácidos y alcoholes. La materia orgánica, actúa como nutriente de microorganismos anaerobios, que la descomponen y dan como producto final biogás, compuesto por metano y anhídrido carbónico. El método anaerobio se lleva a cabo mediante digestores o fermentadores (Cuadros, 2008).

En la tabla 1 se compara los procesos del compostaje aerobio y anaerobio.

Tabla 1

Comparación entre los procesos del compostaje aerobio y la digestión anaerobia para el procesamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos

Características	Procesos Aerobios	Procesos Anaerobios
Uso energético	Consumidor neto de energía	Productor neto de energía
Productos finales	Humus, CO ₂ , H ₂ O	Lodos, CO ₂ , CH ₄
Reducción de volumen	Hasta el 50%	Hasta el 50%
Tiempo de procesamiento	20 a 30 días	20 a 40 días
Objetivo primario	Reducción de volumen	Producción de Energía
Objetivo secundario	Producción de compost	Reducción de volumen, estabilización de residuos

Fuente: Barradas (2009)

Materiales para el Compostaje

Lograr un compost con una baja presencia de impurezas, un buen grado de compuestos agrónomicamente útiles, un bajo contenido de contaminantes y una reducida carga de patógenos, depende de dos factores básicos: la composición inicial de los materiales de partida y el manejo del proceso (Huerta y otros 2010). Teniendo en consideración el primer termino expuesto, la importancia de la materia orgánica fermentable reside en el hecho de ser el sustrato y fuente de nutrientes de los microorganismos que intervienen en el proceso de compostaje. Las propiedades físicas van a acondicionar el acceso a los nutrientes, oxígeno y agua de los microorganismos. Mientras que la composición química determina el tipo y la cantidad de nutrientes disponibles (Cuadros, 2008).

Cualquier producto orgánico fermentable o biodegradable puede ser compostado.

Residuos Urbanos o Municipales

Representa la fracción biodegradable de los desechos urbanos, tales como cartón, papel, restos de comida, entre otros. El contenido del material orgánico representa el 68 % de los residuos urbanos. La calidad del compost depende directamente de la composición de los residuos urbanos (Cuadros, 2008).

Residuos Agroindustriales

Residuos que proceden de la industrialización de productos tales como maíz, trigo, hortalizas, madera, cacao, café, entre otros (SAGARPA, 2007).

Subproductos Agrícolas

Residuos de la cosecha, así como de la trilla y la molienda. Por lo general, todo el residuo que se genera es utilizado en el proceso de compostaje (SAGARPA, 2007).

Desechos del Ganado

Incluyen el estiércol y contenido del tubo digestivo de animales ganaderos. Las aguas residuales de los mataderos o de instalaciones de transformación de subproductos animales (Cuadros, 2008).

Residuos Forestales

Los restos de árboles, hojarascas, ramas son fuente importante para la elaboración de compost. Estos desechos contienen grandes cantidades de celulosa y lignina que se descomponen parcialmente en la pila de compostaje (SAGARPA, 2007).

Cuadros (2008) menciona que durante el proceso de fomentación existen algunos compuestos orgánicos que no se descomponen completamente, como ocurre con la lignina y queratina, debido a la resistencia de los enlaces entre polímeros.

Descripción General del Proceso del Compostaje Aerobio

Precompostaje

Se denomina precompostaje, a todos aquellos procedimientos que se realizan antes de la conformación de las parvas o camellones, que tienen como objetivo acondicionar la masa de residuos para optimizar el proceso. Algunos de estos procedimientos que se realizan son: Balance de nutrientes (corrección de la relación C/N), corrección del pH, triturado y molienda (OPS, 1999).

Algunos tipos de residuos, pueden presentar poca carga biológica o masa microbiana. En estos casos es conveniente aplicar técnicas de bioaumentación. Las más sencillas de estas técnicas consisten básicamente en inocular artificialmente los desechos con una carga de microorganismos (OPS, 1999).

Proceso del Compostaje

Se caracteriza por el predominio de los metabolismos respiratorios aerobios y por la alternancia de etapas mesotérmicas (10 – 40 °C) con etapas termogénicas (40 – 75 °C), y con la participación de microorganismos mesófilos y termófilos respectivamente. Las elevadas temperaturas alcanzadas, son consecuencia de la relación superficie/volumen de las pilas o camellones y de la actividad metabólica de los diferentes grupos fisiológicos participantes en el proceso. Durante la evolución del proceso se produce una sucesión natural de poblaciones de microorganismos que difieren en sus características nutricionales (quimioheterótrofos y quimioautótrofos) (OPS, 1999).

En las pilas de compostaje se distingue dos regiones o zonas:

- Zona central o núcleo de compostaje: Esta zona esta sujeta a los cambios térmicos más evidentes.
- Zona cortical o la corteza: Zona que rodea al núcleo y cuyo espesor dependerá de la compactación y textura de los materiales utilizados para el proceso (OPS, 1999).

Etapas del Compostaje:

Dentro del núcleo se identifican las siguientes etapas:

Etapas Mesofílica:

Es el inicio del proceso de compostaje, en el cual la zona central presenta una temperatura ambiental que comienza a incrementarse mientras paralelamente disminuye el pH, se produce el desarrollo de la flora mesofílica predominando las bacterias, levaduras, mohos y actinomicetos mesofílicos que se desarrollan entre 20 y 40 °C de temperatura. Vento (2000) informa que en esta etapa se descompone con rapidez los azúcares, el almidón, las proteínas y las grasas liberando gran cantidad de energía lo que conlleva a que se multipliquen rápidamente los microorganismos y se eleve la temperatura en el interior de la pila llegando a más de 50° C en un corto tiempo. Esta etapa puede durar de 24 a 72 horas. Esta etapa, es notoria cuando el material ingresa fresco al compostaje. Si el material tiene ya un tiempo de acopio puede pasar inadvertida (OPS, 1999).

Etapas Termofílica:

Se caracteriza por desarrollarse a temperaturas entre 40 a 60° C, por acción de degradación de la materia orgánica de los microorganismos termófilos, principalmente por hongos del grupo de actinomicetos (*Micromonospora*, *Streptomyces* y *Actomyces*) (Álvarez 2008). La temperatura alcanzada durante esta etapa del proceso garantiza la higienización y eliminación de patógenos, larvas y semillas. Dependiendo del material de partida y de las condiciones ambientales, el proceso puede durar entre una semana, en sistemas acelerados, y uno a dos meses en sistemas de fermentación lenta. Transcurrido el tiempo de la fase termofílica, disminuye la actividad biológica y se estabiliza el medio (Pérez, 2008).

Etapas de descomposición mesofílica de enfriamiento:

Se realiza la degradación de la celulosa y la lignina por bacterias y hongos (*Aspergillus* y *Mucor*) (Álvarez 2008). Con el agotamiento de los nutrientes y la muerte de los microorganismos termófilos, comienza el descenso de la temperatura, aproximadamente a temperaturas iguales o inferiores a los 40° C. Se desarrollan nuevamente los microorganismos mesofílicos que utilizarán como nutrientes la celulosa y lignina restantes en la pila (OPS, 1999).

Etapas de Maduración:

Se estabiliza y polimeriza el compost a temperatura ambiente, desciende el consumo de oxígeno y se elimina la fitotoxicidad (Álvarez 2008). Escasean los nutrientes y desciende la actividad bacteriana (Rodríguez, 2011).

La OPS (1999) indica que las etapas mencionadas, no se cumplen en la totalidad de la masa en compostaje, es necesario, remover las pilas de material en proceso, de forma tal que el material que se presenta en la corteza, pase a formar parte del núcleo. Estas remociones y reconfiguraciones de las pilas se realizan en momentos puntuales del proceso, y permiten además airear el material, lo que provoca que la secuencia de etapas descripta se presente por lo general más de una vez.

Factores del Proceso de Compostaje

El manejo del proceso es importante para obtener un compost de buena calidad, por lo tanto es necesario establecer las condiciones óptimas para el desarrollo de los microorganismos. Las condiciones que favorecen el desarrollo de los microorganismos aeróbicos están dadas por la presencia de oxígeno, agua, temperatura y disponibilidad de nutrientes (Córdoba, 2006).

Hay otros factores como el pH, fuentes energéticas de fácil solubilización y la superficie de contacto, que también favorecen la actividad de la población microbiana (Soto y Muñoz, citados por Córdoba, 2006).

La relación Carbono/Nitrógeno (C/N)

La relación C/N es determinante para la formación de compost, puesto que el carbono es fuente de energía y el nitrógeno es necesario para el crecimiento y funcionamiento celular de los microorganismos (Richard, citado por Córdoba 2006). Una alta relación C/N retarda el proceso y una baja impide la descomposición, por lo que se considera que una relación de 30/1 es favorable para el desarrollo de los microorganismos (Soto y Muñoz, citados por Córdoba, 2006).

Los materiales que son verdes y húmedos, como residuos de césped, restos de verduras, poseen alto contenido de nitrógeno y por lo tanto una relación C/N más baja. Por el contrario, una relación más alta contienen los residuos de color café y seco, hojas otoñales, virutas de madera, aserrín y papel, ya que contienen mayor cantidad de carbono (Richard, citado por Córdoba, 2006).

En algunos casos el material inicial a utilizar en el proceso de compostaje puede no presentar una relación C/N inicial apropiada. En este caso, se debe realizar una mezcla con otros materiales para lograr una relación apropiada (OPS, 1999).

Estructura y Tamaño de los Residuos

El tamaño de las partículas afecta la superficie de contacto. Por lo tanto la disminución del tamaño de estas aumenta la superficie y por consiguiente, la actividad de los microorganismos descomponen rápidamente los residuos (Soto y Muñoz, citados por Córdoba 2006). En el caso de disponer de residuos de diferentes estructuras físicas se recurre al procesamiento del mismo, para lograr un tamaño adecuado y un proceso rápido. Para un diámetro medio máximo de partículas de 20 mm resulta un incremento significativo de la biodisponibilidad y del tiempo de compostaje. El tamaño indicado de 20 mm a 10 mm es aconsejable para realizar el compostaje. Trituraciones menores a 3 mm tienden a compactarse en los asentamientos de las pilas e inhiben el flujo del aire, por tal razón no es recomendable (OPS, 1999).

Temperatura

El factor de la temperatura dentro del proceso sirve como indicador ya que el proceso se inicia a temperatura ambiente, pero a medida que aumenta la actividad de los microorganismos, alcanza valores cercanos a 55 y 60° C, esta etapa se conoce como termófila, donde se realiza la eliminación de patógenos, semillas y larvas. En la siguiente etapa disminuye la temperatura entre 30 – 35° C y 40 – 45° C, donde se bioestabiliza la materia orgánica (C/N cercano a 18), y finalmente la humificación (C/N menor a 12) donde se llega a temperaturas mesófilas (CEMPRE, citado por Córdoba 2006).

Durante el proceso de fermentación la temperatura se deberá mantener entre los 35 y 60° C para evitar el desarrollo de agentes patógenos, parásitos y semillas de malas hierbas (Fuentes, citado por Córdoba 2006).

Aireación

Es el parámetro básico de una fermentación aerobia. La aireación de la materia orgánica deberá asegurar la incorporación del oxígeno del aire y la eliminación del anhídrido carbónico producido durante el compostaje. La concentración óptima de oxígeno en el interior de las pilas de fermentación esta comprendida entre el 5 y el 15 en volumen. La ventilación de las pilas se asegura por medio de volteos periódicos de las pilas de compostaje o a través de sistemas de aireación, que inyectan aire a través de tuberías perforadas a lo largo de la pila (Cuadros, 2008).

Humedad

La humedad es relevante para el éxito del proceso de compostaje, se considera que entre un 50 y 80 % de

contenido de humedad es adecuado para el desarrollo de las colonias de microorganismos (Brutti, citado por Córdoba 2006). Valores inferiores al 40% de humedad pueden limitar sensiblemente el compostaje. Por encima del valor 80% se presenta anaerobiosis. A lo largo del compostaje, y sobre todo en las primeras fases, con las altas temperaturas se genera grandes pérdidas de agua, teniendo en cuenta las condiciones, habrá que corregir con la incorporación de agua a la pila (Cuadros, 2008).

pH

El pH sirve como parámetro de control. Para el crecimiento de la mayoría de las bacterias, el pH óptimo varía entre valores de 6 y 7.5 mientras que en el caso de hongos este rango se amplía entre valores de pH 5.5 a 8.0. Durante el proceso de compostaje hay una sucesión de diversos microorganismos y reacciones variantes que hacen que el valor del pH varí considerablemente (Cuadros, 2008).

La basura fresca es ligeramente ácida entre 6 y 7. Al comienzo de la reacción debe bajar a un rango entre 4.5 y 5.5. Luego a medida que la temperatura aumenta, debe llegar entre 8 y 9, mientras que al finalizar el proceso el pH debe acercarse a un valor neutro (Morales, citado por Córdoba, 2006).

Las transformaciones dentro de una composta están condicionadas por diversos factores que van a influir directamente sobre la calidad del compost. En la tabla 3 se detalla los principales factores que influyen en el proceso de compostaje.

Actividad Microbiológica en el Compostaje

El éxito de un proceso de compostaje, dependerá de aplicar los conocimientos de microbiología, considerando la pila de compost como un medio de cultivo. Existen diversas especies diferentes de microorganismos a lo largo del proceso de compostaje. En la etapa mesofílica se presentan poblaciones de bacterias heterotróficas, las cuales disminuyen en la fase termofílica. Luego existe un ligero aumento en la fase de estabilización. La población de bacterias celulolíticas va disminuyendo en la medida que el compostaje va avanzando. Las condiciones cercanas a la neutralidad del pH, favorecen al crecimiento de las bacterias. El contenido de humedad en la fase inicial de 50 – 60% permite el desarrollo de la población de microorganismos. En cuanto a la temperatura, las bacterias mesófilas son favorecidas en la fase inicial, debido a

Tabla 3

Factores que intervienen en el proceso de compostaje

Parámetro	Observaciones
Tamaño de partícula	Para obtener resultados óptimos el tamaño de los residuos sólidos deberían estar entre 15 y 30 mm.
Relación C/N	Las relaciones iniciales de carbono y nitrógeno (por masa) de entre 25 y 50 son óptimas para el compostaje aerobio.
Mezcla y siembra	EL tiempo de compostaje puede reducirse mediante la siembra con residuos sólidos parcialmente descompuestos. También se puede añadir lodos de aguas residuales.
Contenido de humedad	EL contenido de humedad debería estar entre el 40 y el 50 % durante el compostaje.
Mezcla/voltoeo	Para prevenir el secado, encostramiento y la canalización de aire, el material que esta compostándose debería ser mezclado o volteado regularmente o cuando sea necesario. La frecuencia de la mezcla o volteo dependerá del tipo de compostaje.
Temperatura	Para obtener mejores resultados, la temperatura debería mantenerse entre 55 y 60 °C para el resto del periodo de compostaje activo.
Control de Patógenos	Si se lleva a cabo correctamente, se pueden destruir todos los patógenos, hierbas malas y semillas, durante el compostaje.
Requisitos de oxígeno	El aire con por lo menos el 50 % de la concentración del oxígeno inicial restante debería llegar a todas las partes del material que esta compostándose para conseguir resultados óptimos.
Control de pH	Para lograr una descomposición aerobia optima, el pH debería permanecer en el rango de 6.5 a 8.0. Para minimizar la perdida de nitrógeno en la forma de gas amonio, el pH no debería sobrepasar el valor de 8.5
Grado de descomposición	El grado de descomposición puede estimarse mediante la medición de la bajada final de temperatura, el grado de la capacidad de autocalentamiento, la cantidad de materia orgánica descomponible y resistente en el material compostado, la subida en el potencial redox, la absorción de oxígeno, el crecimiento del hongo <i>Chaetomium gracilis</i> , y el ensayo almidón – yodo.

Fuente: George et al. (1996)

que su actividad metabólica genera altas temperaturas para favorecer a las bacterias termófilas en la fase termofílica, en la fase de estabilización las bacterias mesófilas se encuentran en mayor proporción que las termófilas y celulolíticas (Sánchez, 2009).

Por lo tanto, la eficiencia en la degradación de la materia orgánica en el proceso del compostaje depende inicialmente y primordialmente de las comunidades microbianas. A través de diferentes tipos de enzimas hidrolíticas los microorganismos desempeñan la degradación de materiales orgánicos. Diversas enzimas hidrolíticas se cree que controlan parte de la velocidad a la que los sustratos orgánicos son degradados. Dentro de las importantes enzimas que intervienen en el proceso de degradación de la materia orgánica Mondini y otros, (citado por Irigoien 2009, p. 12) destaca las siguientes: celulasas, despolimerasa celulasa, B-glucosidasa que hidroliza glucósidos, Ureasa que participan en la mineralización del nitrógeno,

fosfatasas y arylsulfatasa que elimina los grupos de fosfato y de sulfatos de los compuestos orgánicos.

La eficiencia con la que los microorganismos realizan las transformaciones químicas, se debe a su gran poder catalítico. Como consecuencia de su pequeño tamaño, bacterias y hongos presentan una relación superficie/volumen muy elevada en comparación con organismos superiores, los que les permite un rápido intercambio de sustratos y productos de desechos entre estos y el medio (OPS, 1999).

Acelerar el proceso de compostaje depende principalmente de la adición de microorganismos. Algunos investigadores aislaron microorganismos del compost y emplearon a los mismos en su fase activa como inóculo (Maplestone et al., Janzen et al., citados por Tortarolo et al., 2007). La búsqueda de un inóculo ideal parece improbable, así como es improbable que algún organismo en particular pueda gobernar todo el proceso. Para lograr esta finalidad, se necesitaría contar

con una mejor comprensión de la estructura y dinámica de la comunidad microbiana durante el compostaje (Bolta et al. citados por Tortarolo et al., 2007).

Cuando no se cuenta con una mezcla adecuada de desechos orgánicos, el proceso de composteo es lento y el producto final es un material de baja calidad. Para evitar esto, se puede adicionar otros insumos para mejorar la composición química y la estructura de las pilas. Entre los insumos tenemos:

Activadores:

Son sustancias que estimulan la descomposición del material orgánico, contienen gran cantidad de proteínas y aminoácidos. Los activadores o catalizadores como el excremento de vaca, suministran una fuente de nutrición para acelerar la reproducción de microorganismos y por consiguiente la descomposición de la materia (Navarro, 2002).

Inoculantes:

Estos son los cultivos especiales de bacterias o medios aislados donde se encuentran los organismos encargados de la descomposición de la fracción orgánica. Los inóculos aceleran el proceso de compostaje (Navarro, 2002). Los inóculos tienen como función:

- Suministrar un tipo de microorganismo que se necesita y esta ausente en el material a compostar.
- Incrementa la población de microorganismos.
- Introduce un grupo de microorganismos mas efectivos que los ya presentes (Navarro, 2002).

Enriquecedores:

Son fertilizantes comerciales incorporados al proceso, la calidad del de nutrientes del compost mejora obteniendo un mejor producto final (SAGARPA, 2007).

Técnicas de Compostaje

Existen diversos tipos de compostaje, los cuales no varían de su objetivo principal que es el de transformar los residuos sólidos orgánicos para la producción de compost. La variedad de técnicas posibilita la aplicación del compostaje adecuando las condiciones del lugar de trabajo, sin dejar de lado el tema económico y social (OPS, 1999).

Compostaje en Hilera

Se puede construir un sistema de compostaje en hileras mediante la disposición del material orgánico en hileras con una sección transversal triangular o trapezoidal sobre superficies duras (Kiely, Tchobanoglus y

otros, citado por Agámez, 2006). La altura de la pila va desde 1 a 2 m. y el ancho de la base es de unos 3 a 4 m. Antes de formar las hileras se debe procesar el material orgánico mediante trituración y cribado. Es necesario remover continuamente la pila para oxigenar todo el material. En la figura 1 se muestra el dimensionamiento de las hileras de compostaje.

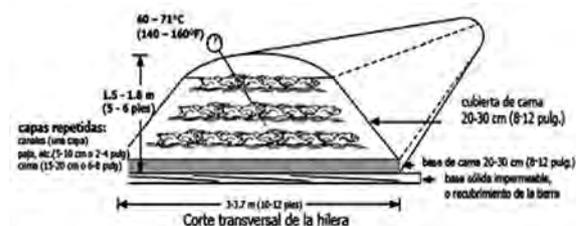


Figura 1 – Esquema de la Hilera de Compostaje (Casey, 2010)

Compostaje en pila estática aireada

Este sistema consiste en una red de tuberías de escape o aireación sobre el cual se coloca la fracción orgánica procesada de los residuos sólidos (Tchobanoglus y otros, citado por Agámez, 2006). Los residuos sólidos se agrupan en pilas de 1 a 2 m. de altura, de 3 a 4 m. de ancho y de 20 m. de longitud y se ponen sobre suelos con sistemas de ventilación por tubos (Kiely, citado por Agámez, 2006).

Compostaje en pilas estáticas aireadas en forma pasiva

Se coloca el material a compostar en pilas y se airea en forma pasiva, a través de una red de tuberías perforadas que se colocan en la parte inferior de la pila. Se coloca una cubierta porosa con el fin de permitir el flujo adecuado de aire que entra a través de las cañerías (Avendaño, citado por Agámez, 2006). Esta cubierta permite retener los olores y controlar la humedad. En la figura 2 se muestra el diseño de una pila estática aireada en forma pasiva.

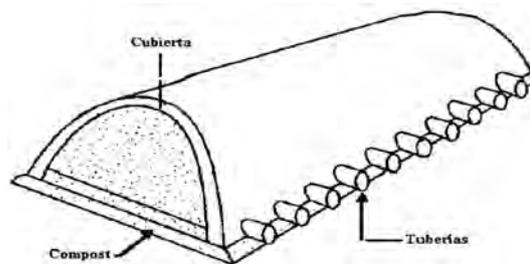


Figura 2 – Pila Estática Aireada en forma Pasiva (Avendaño, 2003)

Compostaje en pilas aireadas forzadamente

En este sistema se utiliza un compresor que succiona aire hacia el exterior o lo inyecta al interior. El compresor además de controlar la aireación de la pila también permite enfriarla (Avendaño, citado por Agámez, 2006) (Figura 3).

El mezclado periódico no solo reintroduce aire fresco en la cama, sino que también mezcla los materiales del compostaje (Hao, citado por Agámez, 2006).

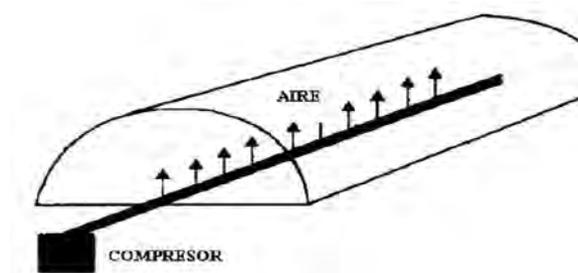


Figura 3 – Pila Aireada Forzadamente (Avendaño 2003)

Compostaje en Reactores

La OPS (1999, p. 21) menciona que los reactores son estructuras por lo general metálicas: cilíndricas o rectangulares, donde se mantienen controlados determinados parámetros (humedad, aireación), procurando que los mismos permanezcan en forma relativamente constante. Los reactores móviles además, posibilitan la mezcla continua de los desechos mediante dispositivos mecánicos, con lo que se logra un proceso homogéneo de toda la masa en compostaje (OPS, 1999).

La OPS indica que este tipo de sistemas, permite acelerar las etapas iniciales del proceso. Finalizadas estas etapas activas biológicamente, el material es retirado del reactor y acopiado para que se cumpla la maduración. Los sistemas de compostaje en reactores son siempre sistemas industriales. Se aplican en aquellas situaciones donde diariamente se reciben volúmenes importantes de desechos, y para los cuales sería necesario disponer de superficies muy extensas.

El tiempo de compostaje varía según la técnica de compostaje empleada. En la tabla 2 se indica los tiempos de retención de compostaje según la técnica empleada.

Tabla 2
Técnicas de compostaje contra tiempos de retención

Tipo de Proceso	Pila (Aireación por volteo, mas reposición de agua)	Pila Estática Aireada (Control automático de temperatura, mas reposición de agua)	Pila Aireada (Control automático de temperatura, reposición de agua y volteo)	Contenedor o Reactor (Control automático de temperatura, mas reposición de agua)
Etapas del Proceso	Duración			
Activa	16 a 40 días	16 a 30 días	14 a 21 días	4 a 15 días
Estabilización (disminución de temperatura)	30 a 60 días	30 a 60 días	21 a 60 días	21 a 45 días
Curado o Maduración	➤ 8 meses (volteo)	1 a 3 meses	1 a 2 meses (volteo, agua añadida)	1 a 2 meses (volteo, aireado, agua añadida)
Tiempo Total	2 a 12 meses	2 a 6 meses	1.5 a 6 meses	1 a 4 meses

Fuente: Bidlingmaier et al. (1998)

Aspectos ambientales del compostaje

Kiely (citado por Agámez M 2006, p. 25) establece que algunos de los parámetros ambientales asociados al proceso de compostaje cuando se esta formando el compost son los siguientes:

- Producción de olores
- Presencia de patógenos
- Presencia de metales pesados

Conclusiones

La actividad microbiana interviene en el proceso de compostaje, acelerando el proceso de descomposición del material orgánico. El grado de descomposición es un parámetro que se evalúa en la calidad del compost.

La dinámica poblacional bacteriana depende de la interacción compleja de factores tanto físicos y químicos y de operaciones en el proceso de degradación de residuos orgánicos. Principalmente de los factores de temperatura, relación C/N, aireación, humedad y pH. La aplicación de activadores orgánicos (microorganismo), permiten reducir el tiempo de retención en el proceso de compostaje, disminuyendo los costos de operación y mantenimiento.

La presencia de microorganismos en el producto final del compostaje, que se encuentran en estado latente,

ayuda en el crecimiento de los microorganismos del suelo facilitando la fijación de nutrientes además de acondicionar el suelo por efecto del compost.

Recomendaciones

La optimización del proceso aerobio de compostaje de residuos sólidos orgánicos se puede realizar con la adición de activadores, inóculos o microorganismos para acelerar el proceso de compostaje, reduciendo el tiempo de compostaje. El proceso reducirá los costos de operación y mantenimiento del proceso de compostaje.

Referencias

- Agámez M. 2006. Determinación de los Parámetros Físico-químicos, Microbiológicos y de los Compuestos Orgánicos Volátiles presentes en un Proceso de Computación. [Documento en línea]. [Consultado el 27 de mayo de 2012]. Formato PDF. Disponibilidad libre: <<http://cdigital.udem.edu.co/TESIS/CD-ROM19362006/02.Texto%20completo.pdf>>
- Altamirano M, Cabrera C. 2006. Estudio comparativo para la elaboración de compost por técnica manual. [Documento en línea]. Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG. Vol. 9, N° 17. [Consultado el 08 de junio de 2012]. Formato PDF. Disponibilidad libre: <<http://www.scielo.org.pe/pdf/iigeo/v9n17/a10v9n17.pdf>>. ISSN 1628-8097
- Álvarez J. 2008. Manual de compostaje para agricultura ecológica. [Documento en línea]. [Consultado el 09 de junio de 2012]. Formato PDF. Disponibilidad libre: <http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/portal/comun/galerias/galeriaDescargas/cap/produccion-ecologica/produccion/boletines/boletin_compostajeCompleto.pdf>
- Azurduy S, Ortuño C, Azero A. 2009. Evaluación de Activadores Orgánicos para Acelerar el Proceso de Compostaje de Residuos Orgánicos en el Municipio de Quillacollo. [Documento en línea]. [Consultado el 16 de abril de 2012]. Formato PDF. Disponibilidad libre: <<http://www.proinpa.org/phocadownload/articulos/Bioinsumos/evaluacion%20de%20activadores%20organicos%20para%20acelerar%20el%20proceso%20de%20compostaje%20de%20residuos%20organicos%20en%20el%20municipio%20de%20quillacollo.pdf>>
- Barradas A. 2009. Gestión Integral de Residuos Sólidos Municipales – Estado de Arte. [Documento en línea]. [Consultado el 23 de mayo de 2012]. Formato PDF. Disponibilidad libre: <http://oa.upm.es/1922/1/Barradas_MONO_2009_01.pdf>
- Berent M, Vedoya D. 2005. Tratamiento de residuos sólidos urbanos en ciudades intermedias del NEA, orígenes, tipos y composición de residuos. [Documento en línea]. Argentina: Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad Nacional del Nordeste. [Consultado el 08 de junio de 2012]. Formato PDF. Disponibilidad libre: <<http://www.unne.edu.ar/Web/cyt/com2005/7-Tecnologia/T-029.pdf>>
- Bustos F. 2009. La Problemática de los Residuos Sólidos. [Documento en línea]. [Consultado el 08 de junio de 2012]. Formato PDF. Disponibilidad libre: <http://iies.faces.ula.ve/Revista/Articulos/Revista_27/Pdf/Rev-27Bustos.pdf>
- Córdoba C. 2006. Estudio de factibilidad técnico-económica para instalar una planta de compostaje, utilizando desechos vegetales urbanos. [Documento en línea]. Chile: Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Chile. [Consultado el 09 de junio de 2012]. Formato PDF. Disponibilidad libre: <http://www.cybertesis.cl/tesis/uchile/2006/cordova_c/sources/cordova_c.pdf>
- Cuadros S. 2008. Compostaje y Biometanización. [Documento en línea]. [Consultado el 08 de junio de 2012]. Formato PDF. Disponibilidad libre: <http://www.eoi.es/savia/pubman/item/eoi:45609:2/component/eoi:45607/D_Compost>
- Huerta O, Martínez X, Gallart M, Soliva M, López M. 2010. El uso de compost de residuos sólidos municipales como enmienda orgánica: aportaciones de diferentes componentes según origen. [Documento en línea]. España: Departamento de Ingeniería Agroalimentaria y Biotecnología. Universidad Politécnica de Cataluña. [Consultado el 08 de junio de 2012]. Formato PDF. Disponibilidad libre: <<http://upcommons.upc.edu/eprints/bitstream/2117/11638/1/Huerta%20et%20al%20El%20uso.pdf>>
- Julca A, Meneses L, Blas R, Bello S. 2006. La Materia Orgánica, Importancia y Experiencias de su Uso en la Agricultura. [Documento en línea]. [Consultado el 22 de mayo de 2012]. Formato PDF. Disponibilidad libre: <<http://www.scielo.cl/pdf/idesia/v24n1/art09.pdf>>

- Navarro R. 2002. Manual para hacer Composta Aeróbica. [Documento en línea]. [Consultado el 27 de mayo de 2012]. Formato PDF. Disponibilidad libre: <<http://noalaincineracion.org/uploadfiles/informes/composta.pdf>>
- Organización Panamericana de la Salud. 1999. Manual para la Elaboración de Compost - Bases Conceptuales y Procedimientos. [Documento en línea]. [Consultado el 23 de mayo de 2012]. Formato PDF. Disponibilidad libre: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsars/fulltext/compost.pdf>>
- Pacheco F. 2009. Evaluación de la Eficacia de la Aplicación de Inóculos Microbiales y de Eissenia fétida en el Proceso de Compostaje Domestico de Desechos Urbanos. [Documento en línea]. [Consultado el 23 de mayo de 2012]. Formato PDF. Disponibilidad libre: <http://www.rapaluruaguay.org/organicos/articulos/PRACTICUM_FABIAN_PACHECO.pdf>
- Pérez A. 2008. Manual de Compostaje. [Documento en línea]. [Consultado el 09 de junio de 2012]. Formato PDF. Disponibilidad libre: <http://www.tierra.org/spip/IMG/pdf/MANUAL_COMPOST_ADT_2008_nologos_baja.pdf>
- Puerta S. 2004. Los residuos sólidos municipales como acondicionadores de suelo. [Documento en línea]. Revista Lasallista de Investigación. vol. 1, n°. 001: pp. 56- 65 [Consultado el 25 de mayo de 2012]. Formato PDF. Disponibilidad libre: <<http://www.lasallista.edu.co/fxcul/media/pdf/Revista/Vol1n1/056-65%20Los%20residuos%20s%20C3%B3lidos%20municipales%20acondicionadores%20del%20suelo.pdf>>
- Quintero R, Ferrera R, Etchevers J, Gracia N, Rodríguez R, Alcántar G, Aguilar A. 2003. Enzimas que Participan en el Proceso de Vermicompostaje. [Documento en línea]. [Consultado el 23 de mayo de 2012]. Formato PDF. Disponibilidad libre: <<http://redalyc.uaemex.mx/pdf/573/57321109.pdf>>
- Rodríguez D, Ruiz A, Salgado M, Matiz A. 2007. Uso de un Inoculante Termofílico en la Transformación de Residuos Sólidos. [Documento en línea]. [Consultado el 16 de abril de 2012]. Formato PDF. Disponibilidad libre: <<http://redalyc.uaemex.mx/pdf/499/49910969004.pdf>>
- Rodríguez D. 2011. Estación depuradora de aguas residuales y planta de compostaje de ASPE. [Documento en línea]. España: Instituto Universitario del Agua y de las Ciencias Ambientales. [Consultado el 09 de junio de 2012]. Formato PDF. Disponibilidad libre: <<http://iuaca.ua.es/es/master-agua/documentos/-gestadm/trabajos-fin-de-master/david-rodriguez.pdf>>
- SAGARPA. 2007. Elaboración de Composta. [Documento en línea]. [Consultado el 22 de mayo de 2012]. Formato PDF. Disponibilidad libre: <<http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasaapt/Elaboraci%C3%B3n%20de%20Composta.pdf>>
- Sánchez T. 2009. Caracterización microbiológica del proceso de compostaje a partir de residuos azucareros. [Documento en línea]. Venezuela: Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. [Consultado el 09 de junio de 2012]. Formato PDF. Disponibilidad libre: <<http://www.scielo.org.ve/pdf/at/v59n3/art07.pdf>>
- Solans X, Alonso R, Gadea E. 2008. NTP: Plantas de compostaje para el tratamiento de residuos: riesgos higiénicos. [Documento en línea]. [Consultado el 08 de junio de 2012]. Formato PDF. Disponibilidad libre: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/501a600/ntp_597.pdf>
- Tortarolo M, Pereda M, Palma M, Arrigo N. 2007. Influencia de la inoculación de microorganismos sobre la temperatura en el proceso de compostaje. [Documento en línea]. Argentina: Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. [Consultado el 09 de junio de 2012]. Formato PDF. Disponibilidad libre: <<http://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v26n1/v26n1a05.pdf>>
- Vázquez M, Prada P, Mondragón M. 2010. Optimización del proceso de compostaje de productos post-cosecha (cereza) del café con la aplicación de microorganismos nativos. [Documento en línea]. Colombia: Universidad de Santander. 124 pp. [Consultado el 08 de junio de 2012]. Formato PDF. Disponibilidad libre: <http://www.unicolmayor.edu.co/invest_nova/NOVA/NOVA14_ARTORIG8.pdf>
- Vento M. 2000. Estudio sobre la Preparación del Compost Estático y su Calidad. [Documento en línea]. [Consultado el 23 de mayo de 2012]. Formato PDF. Disponibilidad libre: <<http://www.bibliociencias.cs/gsd/collect/tesis/archives/HASH0144.dir/doc.pdf>>
- Vicente J, Carrasco J, Negro M. 1996. El Compostaje como Tecnología para el Tratamiento de Residuos: Compostaje de Bagazo de Sorgo dulce con Diferente Fuentes Nitrogenadas. [Documento en línea]. [Consultado el 25 de mayo de 2012]. Formato HTML. Disponibilidad libre: <https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:2NfcRdqRq2MJ:www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/inventario-girs/doc_download/1352-compostaje+tesis+activadores+biologicos+para+el+compostaje&hl=es&gl=pe&pid=bl&srcid=ADGEESHj94646PrZ7d-Hv6q4u3J-VUF_ZThaAjo2NiNWLdB_SNdA9r120FPC1ro6c-1dxvTt44I-FHOMSVyVMUDvj9P5_4jQX4_o4Qyd-2F3lmC2P8U51MTv-jiEBEC7KSxQW9zI6Yy8Rr&sig=AHIEtbQfAoDaHR_xh8hSWa-Aer3JZQjHrA>
- Zurcan V. 2010. Estudio experimental en planta piloto del proceso de co-compostaje de residuos agroalimentarios. [Documento en línea]. Uruguay: Facultad de Ingeniería. Universidad de Montevideo. [Consultado el 08 de junio de 2012]. Formato PDF. Disponibilidad libre: <http://www.um.edu.uy/_upload/_descarga/web_descarga_206_Compostajefinal.-Nmero4.pdf>