



FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

“OPTIMIZACIÓN DE MECANISMOS DE AIREACIÓN PARA LA
PRODUCCIÓN DE COMPOST A PARTIR DE RESIDUOS ORGÁ-
NICOS MUNICIPALES”

Trabajo de investigación para optar el grado académico de:
Bachiller en Ingeniería Ambiental

Presentado por:

Arianne Marie Vargas Ayala (0000-0003-1187-0813)

Asesor:

Luis Abraham Gomero Osorio: (0000-0002-4739-2094)

Lima – Perú

2021

RESOLUCIÓN DIRECTORAL ACADÉMICA DE CARRERA N°043-2021-DACIA-DAFCA-CIENTIFICA

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES / CARRERA DE INGENIERIA AMBIENTAL

Lima 8 de febrero de 2021

VISTO:

La revisión realizada y la aprobación de Trabajo de Investigación titulado: **Optimización de mecanismos de aireación para la producción de compost a partir de residuos orgánicos municipales**, presentado por:

- **Arianne Marie Vargas Ayala**

CONSIDERANDO:

Que, de acuerdo al Reglamento General de la Universidad Científica del Sur y los reglamentos de pregrado para obtener el grado de Bachiller de **Ingeniería Ambiental** en la **Facultad de Ciencias Ambientales**, se debe desarrollar un trabajo de investigación.

Que, de acuerdo a la normativa vigente de la Universidad Científica del Sur, en uso de las atribuciones conferidas al Director Académico de Carrera.

SE RESUELVE:

Aprobar e inscribir el trabajo de investigación titulado: **Optimización de mecanismos de aireación para la producción de compost a partir de residuos orgánicos municipales** con N° de registro de la carrera: **070-FCA-IAM**.

Nombrar al docente/colaborador **Luis Abraham Gomero Osorio** como asesor de dicho trabajo de investigación.

Regístrese, comuníquese y archívese,



Mg. Gonzalo Francisco Flores Roca
Director Académico de Carrera
Ingeniería Ambiental

“OPTIMIZACIÓN DE MECANISMOS DE DIRECCIÓN Y DE ACTIVACIÓN MICROBIANA PARA LA PRODUCCIÓN DE COMPOST A PARTIR DE RESIDUOS ORGÁNICOS MUNICIPALES”

Arianne Marie Vargas Ayala ¹; Luis Abraham Gomero Osorio^{1,2}

¹*Facultad de Ciencias Ambientales*

²*Universidad Nacional Agraria la Molina*

lgomero@ucientifica.edu.pe

I. RESUMEN

En la actualidad el aprovechamiento de los residuos sólidos es deficiente ya que se mantienen prácticas que no son sostenibles como la deposición de estos en botaderos informales y la quema de residuos. Teniendo en cuenta que en Lima el mayor porcentaje corresponde a residuos orgánicos, es necesario buscar técnicas que permitan realizar una valorización de tal forma que se reduzca el impacto ambiental. Técnicas como el compostaje urbano, que simula la descomposición natural de la materia orgánica, ofrecen el beneficio de la generación de un producto orgánico que puede ser usado como fertilizante del suelo aportando un elevado contenido de nutrientes que permite el desarrollo de las plantas y que también puede ser aplicado a zonas altamente degradadas. En esta investigación se recopila información acerca de la técnica del compostaje y los distintos métodos que pueden ser aplicados para su optimización.

Palabras clave: residuos, sólidos, impacto, ambiental, compostaje, suelo, optimización y nutrientes.

ABSTRACT

Currently, the use of solid waste is deficient as practices that are not sustainable are maintained, such as the disposal of these in informal dumps and the burning of waste. Taking into account that in Lima the highest percentage corresponds to organic waste, it is necessary to look for techniques that allow a recovery in such a way that the environmental impact is reduced. Techniques such as urban composting, which simulates the natural decomposition of organic matter, offer the benefit of the generation of an organic product that can be used as soil fertilizer, providing a high nutrient content, high nutrient content that allows the development of plants and that it can also be applied to highly degraded areas. In this research information is collected about the composting technique and the different methods that can be applied for its optimization.

Keywords: waste, solids, impact, environmental, composting, soil, optimization and nutrients.

II. REVISIÓN TEÓRICA

Residuos sólidos orgánicos globales

Actualmente a nivel mundial, entre uno los problemas ambientales, destaca el gran problema relacionado con la generación y disposición final de los residuos sólidos, ya que mientras se incrementa la población y surge el crecimiento industrial, se generan diariamente millones de toneladas de residuos a las superficies terrestres y acuáticas, sin tener un tratamiento o manejo previo, lo que origina como consecuencia una grave situación de contaminación (Avendaño Acosta, 2015).

Hoornweg & Bhada-Tata (2012), indicaron que en el año 2025, la generación de residuos urbanos podría haberse duplicado puesto que la generación per cápita tendría un incremento de 1,2 a 1,42 Kg/hab/día. Además, la generación actual de 1,300 millones toneladas al año se incrementaría a 2,200 millones. Las razones del incremento pueden deberse principalmente al elevado crecimiento demográfico, actividades cotidianas de consumo en países industrializados y lo que están en vías de desarrollo.

Un informe detallado presentado por el Banco Mundial: What a Waste 2.0, mostró que las regiones de Asia oriental y el Pacífico generan la mayor cantidad absoluta con un aproximado de 468 millones de toneladas en el año 2016, mientras que para la región de Medio Oriente y África del Norte genera la menor cantidad, con 129 millones de toneladas. En la región Latinoamérica se genera alrededor de 52% de residuos de comida y verdes, siendo un 83% de residuos recolectados en el nivel urbano. Para su disposición final en general se estima que un 52% dispone sus residuos en rellenos sanitarios, 26,8% los deposita en vertederos abiertos, y solo 1% realiza compostaje residuos.

Es lamentable además que para Latinoamérica y El Caribe se haya mantenido la estructura de la gestión de los residuos basada solamente en la recolección y disposición final, sin tomar en consideración operaciones en la gestión de residuos sólidos tan importantes como el tratamiento, aprovechamiento y reciclaje de los residuos, además de la disposición final (Zulia et al., 2013).

Residuos sólidos orgánicos en el Perú

En dicho informe titulado What a Waste 2.0, se menciona que el Perú tiene una generación per cápita de residuos orgánicos de 0.75 kg/cápita/día (Silpa Kaza, Lisa Yao, Perinaz Bhada-Tata et al., 2018). Según OEFA (2016), en el departamento de Lima solo un 18% de municipios provinciales cuenta con rellenos sanitarios aptos para la disposición final de sus residuos sólidos. Asimismo, un 18% se cumple para el tratamiento y reaprovechamiento mediante el proceso de compostaje y segregación para el reciclaje.

En el marco del decreto legislativo N°1278: “Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos”, los municipios tienen como función principal implementar programas de segregación y recolección selectiva de los residuos sólidos, promoviendo la valorización y garantizando una adecuada disposición final (Congreso de la República, 2016). Dichos programas se presentan como parte de ciertos instrumentos de gestión tales como el Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PLANRES), Plan Provincial de Gestión de Residuos Sólidos Municipales (PIGARS) y Plan Distrital de Manejo de Residuos Sólidos.

Asimismo, de acuerdo con la fundación Ellen MacArthur que organización que ha desarrollado el concepto de economía circular, sostiene que es un sistema industrial regenerativo o restaurativo empezando desde la fase de diseño, por lo que pretende erradicar

el concepto de “final de vida útil” con la restauración, teniendo como prioridad la reutilización y transformación de los residuos en otros materiales, productos y sistemas (Clima de Cambios, 2019). Ese sentido la valorización de residuos implica encontrar métodos eficientes de aprovechamiento.

Proceso de descomposición

Aerobio

Los procesos biológicos en presencia de oxígeno son conocidos como aerobios. Una gran variedad de géneros bacterianos y fúngicos realizan la biodegradación de contaminantes orgánicos mediante catalizadores biológicos. En este proceso ocurren dos procesos: el crecimiento y el co-metabolismo.

En el crecimiento los contaminantes orgánicos son degradados completamente o mineralizados, ya fueron usados como la única fuente de carbono y energía (Fritsche & Hofrichter, 2008). En la biodegradación aeróbica, ocurren principalmente oxidaciones catalizadas mediante enzimas oxigenasas y peroxidasas. Las enzimas oxigenasas son consideradas oxidoreductoras por lo que usan O_2 para inyectar oxígeno al sustrato. Es importante garantizar la presencia de oxígeno en dos lugares metabólicos, el primero es el ataque inicial del sustrato y el segundo es al final de la cadena respiratoria (Fritsche & Hofrichter, 2008).

Anaerobio

La manera en que el metabolismo de las bacterias anaerobias funciona consiste en que estas producen su energía tomando como fuente a las sustancias no presentan oxígeno, mediante el proceso de la fermentación. Sin embargo, en el caso de las bacterias que

habitan a grandes profundidades en las grietas hidrotermales marinas, realizan el proceso mediante reacciones que emplean compuestos químicos inorgánicos (Corrales et al., 2017).

El metabolismo anaerobio se caracteriza por la presencia de cuatro fases distintas en el proceso de degradación del sustrato (el alimento de los microorganismos), donde participan diversas poblaciones de bacterias, estas fases son las siguientes: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Flotats & Campos, 2012).

Técnicas de tratamientos

Respecto a la transformación o tratamiento de los residuos sólidos orgánicos existen una variedad de tecnologías diferenciadas según la complejidad y viabilidad económica. A continuación, en el siguiente cuadro resumen para los métodos ampliamente usados:

Tabla 1. Métodos de aprovechamiento de residuos orgánicos en España.

Tecnología probada, registros	Métodos biológicos		Incineración	Métodos térmicos	
	Compostaje	Digestión anaerobia		Pirolisis	Gasificación
Principio básico	Degradación por microorganismos aerobios	Degradación por microorganismos anaerobios	Combustión	Conversión termoquímica anaerobia	Conversión termoquímica
Coste del tratamiento	Bajo-alto	Medio-alto	Medio-alto	Medio-alto	Alto-muy alto
Control de olores	Malo-bueno	Malo-bueno	Bueno	Medio-bueno	Bueno
Ciclo de carbono (%peso)	50% compost, 50%aire	75% líquido, 25%biogás	1% sólidos, 99%aire	20-30% sólidos, 70-80% Aire	2% ,98% Aire
Recuperación de nutrientes	2.5-10 kg N, 0.5-1kg P, 1-2 kg K	4.0-4.5 kg, 0.5-1kg P, 2.5-3kg K	No	No	No

Sin embargo, las principales aplicables en el Perú debido a su bajo costo y sostenibilidad son el compostaje, bokashi y sistemas de biodigestor.

Compostaje

Principios

Se considera que el compostaje es un procedimiento biológico, termófilo y aerobio (Saña & Soliva, 1987), que requiere de insumos tales como la materia orgánica, microorganismos y las condiciones óptimas con el fin que el proceso se realice con multiplicidad de reacciones correlacionadas, para lograrlo es vital la variedad y riqueza de microorganismos en el equilibrio de los siguientes aspectos: aire/agua, biopolímeros, nutrientes y en caso se dispongan gran cantidad de residuos orgánicos, necesita un control riguroso para asegurar que el proceso sea eficiente, reduciendo las emisiones de gases y pérdidas de nutrientes, obteniendo un producto final en óptimas condiciones de acuerdo a su uso (Bernal & Gondar, 2008).

Métodos a gran escala para compostaje industrializado

Pilas de compostaje pasivas

Este método se fundamenta en la formación de una pila a partir de la mezcla de materia prima. Ésta puede girarse periódicamente para restablecer la porosidad. A través del movimiento pasivo del aire a través de la pila se provee de oxígeno a los microorganismos que participan en el proceso de degradación. Se requiere que la pila sea lo suficientemente pequeña como para permitir este movimiento de aire pasivo. Por el contrario, si la pila es muy grande se forman zonas anaeróbicas (Graves & Hattemer, 2010a).

Hileras

La configuración de las hileras es alargada y se giran regularmente. La materia prima se mezcla previamente a la formación de la pila o se mezcla como parte de la pila.

Generalmente las hileras tienen una altura que oscila de 6 – 10 pies, un ancho de 15 - 20 pies y de longitud variable. En zonas donde el clima es húmedo, es necesario que el diseño de la hilera permita la escorrentía de la humedad.

En climas más secos se necesita una cubierta cóncava en para recolectar agua y mantener la humedad de la pila. Las hileras de menor tamaño tienden a perder más calor, mientras que las hileras de mayor tamaño corren el riesgo de presentar zonas anaeróbicas generando olores desagradables. La materia para el compostaje como el estiércol se coloca en forma de pila a una altura que sea menor que el material poroso como las hojas secas (Graves & Hattemer, 2010b).

Hileras aireadas pasivamente

La hilera aireada pasivamente no se gira, ésta es realizada únicamente a través del movimiento pasivo de aire por medio de tuberías perforadas introducidas en la capa base de la pila, se caracterizan por el uso de una capa base y una capa superior en la construcción de hileras. La capa base está compuesta típicamente de turba, paja o compost terminado, esta capa debe ser porosa para que el aire que fluye a través de las tuberías se distribuya de manera uniforme, de esa manera se logra también la absorción de la humedad (Graves & Hattemer, 2010b).

Pila estática aireada o de aireación forzada

El método de pila estática ventilada se suele usar para materiales homogéneos como por ejemplo los fangos, restos de poda y cosecha, etc., los cuales al ser combinados con un sustrato lo suficientemente poroso y seco como las astillas de madera o aserrín y agua, forman una membrana líquida delgada en la que se origina la descomposición (Orozco, 2015).

El método de succión del aire ayuda a llevar un mejor control del olor que la inyección de aire positiva, sobre todo si se usa un filtro de olores. Los sopladores utilizados para la aireación sirven no solo para proporcionar oxígeno, sino también para proporcionar enfriamiento, estos se pueden ejecutar de continuamente o en intervalos

La succión del aire proporciona un control de olor mejor que en el caso de la inyección positiva del aire, sobre todo si se cuenta con un filtro de olores en el diseño. Los sopladores empleados para la inyección positiva del aire o aireación forzada proporcionan oxígeno y enfriamiento, estos equipos pueden funcionar de manera continua o en intervalos (Graves & Hattemer, 2010b).

La velocidad de aireación puede incrementarse o encenderse y apagarse intermitentemente según lo requiera el proceso del compostaje (Puyuelo et al., 2010). Sin embargo, un inadecuado control conduce a un secado excesivo y genera zonas de enfriamiento permanente en el área donde ingresa el aire (Citterio et al., 1987). Generalmente se controla en función de la temperatura dentro de los materiales de compostaje.

Se han realizado distintos experimentos en donde se ponen a prueba diversas condiciones de aireación en un reactor de tipo adiabático como se observa en la figura 5.

No.	Aeration method	Aeration rate [L/min kgDM]	on [min]	off [min]	Length of 1 cycle [hr]	Total Length of aeration [hr]	Total volume [L/kgDM]
1	Continuous	0.50	-	-	-	48	1440
2		1.50				48	4320
3		3.00				48	8640
4	Intermittent	0.50	80	40	2	32	960
5			60	60		24	720
6			40	80		16	480
7			20	100		8	240
8		1.50	80	40		32	2880
9			60	60		24	2160
10			40	80		16	1440
11			20	100		8	720
12		3.00	80	40		32	5760
13			60	60		24	4320
14			40	80		16	2880
15			20	100		8	1440

Fuente: (Shimizu, 2017)

Figura 5. Configuración de diseño experimental para sistema adiabático.

Camas agitadas

Las camas agitadas consisten en largos canales colocados de forma paralela y cubiertas por un techo. En este método se requiere de una máquina que voltee el compost, conocida como tornero, este se basa en rieles que se mantienen empalmados a los dos costados de la cama en toda su longitud, mientras el compost es girado. Las camas tienen la posibilidad de ser básicas almohadillas de concreto, sin embargo, comúnmente permanecen construidas sobre un material poroso como la grava para permitir un más grande flujo de aire abajo del compost. Varias camas permanecen construidas para permitir la aireación forzada. La época de duración del proceso de compostaje está definida

según la longitud de la pila y la frecuencia de volteos. Bajo este método se obtiene el producto final del compostaje en dos a cuatro semanas.

Métodos a menor escala

Contenedores

Los contenedores para el compostaje se construyen comúnmente de madera u hormigón. Ciertos contenedores presentan sistemas de aireación semejantes al que tienen las pilas estáticas de aireación forzada. El material dispuesto en contenedores no aireados debe girarse con frecuencia para mantener el compostaje aeróbico, el periodo promedio para obtener el compost frecuente ser en meses en lugar de semanas.

Tambor rotatorio

El tambor rotatorio es una opción que debería considerarse una vez que se crean desperdicios para el compostaje en intervalos regulares de corto plazo. Un tambor rotativo almacena la mezcla de residuos orgánicos en su interior y se realiza rodamientos o giros mediante un engranaje de toro. La degradación de los materiales ocurre rápidamente (Graves & Hattemer, 2010b).

Factores

La biodiversidad microscópica se desarrolla frente a los diferentes niveles de temperatura, humedad, oxígeno y pH dentro del material que se emplea en el compostaje. En una pila de compost se distinguen tres clases de microorganismos: bacterias, hongos y actinobacterias. Estos según su requerimiento de oxígeno pueden ser anaerobios, aerobios o anaerobios facultativos (Graves & Hattemer, 2010).

Según Moreno Casco & Moral Herrero (2008) en el compostaje los microorganismos quimio heterótrofos usan los sustratos orgánicos como fuente primordial de carbono y

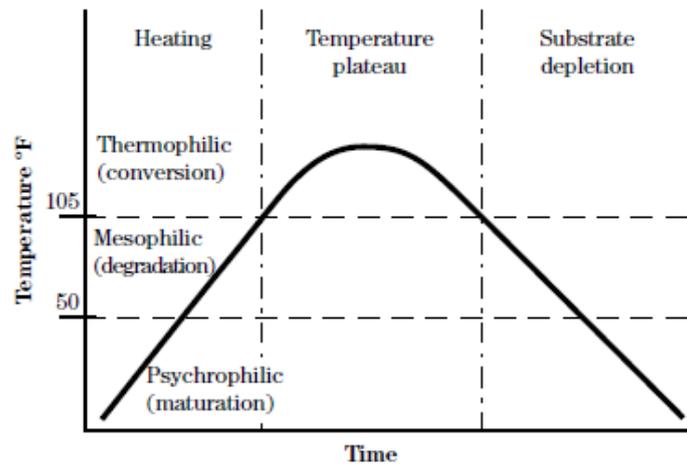
energía en condiciones aerobias, mediante diversas rutas metabólicas que convergen al ciclo de Krebs, en donde se obtiene grandes cantidades de energía en forma de ATP.

Una parte de la energía que se genera se disipa como calor, esto no sucede cuando los microorganismos crecen en sustratos líquidos, ya que la concentración de nutrientes es menor que en los sólidos y la energía generada es liberada con mayor facilidad.

Parámetros de seguimiento en el proceso de compostaje

Temperatura

La temperatura es el indicio más notorio al momento de realizar compost, ya que el incremento de su valor en los materiales que se están compostando, indican la presencia de la actividad microbiana, es por ello que se le considera una variable esencial para el monitoreo del compostaje (Liang et al., 2003). El comportamiento de la temperatura es clave, debido ha sido demostrado que mínimos cambios de temperatura perjudican mayormente a la actividad de los microorganismos en comparación a los mínimos cambios en la humedad, pH o C/N. La eficiencia puede ser determinada de acuerdo a la temperatura y por el nivel de estabilización que se ha alcanzado, puesto que existe un vínculo directo de la temperatura y la proporción de la degradación de la materia orgánica, así como ésta última tiene es directamente proporcional al tiempo en que la temperatura tuviera valores máximos. Las altas temperaturas inhiben el crecimiento de la diversidad microscópica o conocido como el suicidio *microbiano*. Durante el compostaje se desarrollan tres fases puntuales propias de la descomposición aeróbica: mesófila inicial (donde, Temperatura < 45°C) en donde se originan los ácidos orgánicos; termófila (Temperatura > 45°C) y finalmente la mesófila, en la cual se da por culminado el compostaje cuando se iguala a la temperatura ambiental.



Fuente: (Graves & Hattemer, 2010b)

Figura 3. Rangos de temperatura de compost.

Potencial de Hidrógeno (pH)

El potencial de hidrógeno (pH), interviene directamente en el compostaje. En diversas investigaciones se toma en cuenta esta variable con el fin de estudiar el desarrollo del compostaje. Sin embargo, las mediciones suelen realizarse en laboratorio mediante el extracto acuoso de las pilas y pues solo indican un valor aproximando del nivel de pH *in situ* (Ermolaev et al., 2014). El rango óptimo para el compostaje se encuentra entre 6 y 7,5 (Graves & Hattemer, 2010b).

La evolución de pH presenta tres fases definidas: mesófila inicial, termófila y mesófila final, definidas anteriormente. En la fase mesófila inicial, principalmente ocurre un descenso del nivel de pH a causa del efecto que tienen los microorganismos en la materia orgánica más ligera, expulsando los ácidos orgánicos. Las proteínas son disgregadas en la fase termófila, generando la emisión de amoníaco y la disminución de ácidos orgánicos por lo que el medio se mantiene alcalino (Sánchez-Monedero et al., 2001). Finalmente, en la fase mesófila final se neutraliza en pH gracias a la creación de compuestos

húmicos con propiedades tampón. Si en el proceso se proporciona una aireación adecuada conlleva a generar un compost final con un pH entre 7- 8, valores menores de ello advierten condiciones anaeróbicas y que el compost aún no se encuentra maduro (Suler & Finstein, 1977).

Aireación

Para un óptimo desarrollo del compostaje es primordial proporcionar oxígeno, puesto que los microorganismos presentes en el proceso son aerobios. El porcentaje de oxígeno es variable en las pilas de compostaje en sus espacios libres: la zona externa contiene entre 18-20% de oxígeno; al interior de la pila la concentración de oxígeno es menor, a medida que el de dióxido de carbono se incrementa, hasta que a profundidades mayores que 60 cm se encuentra entre 0,5% y 2% de oxígeno (Ekinci y et al., 2004).

Humedad

Los microorganismos requieren del agua para cubrir sus necesidades fisiológicas ya que es el medio por el cual asimilan sustancias solubles las cuales son fuente de energía y por la cual generan productos de deshecho de las reacciones que se desarrollan. Shulze (1962), investigó la variación del contenido de oxígeno de una masa compostada en un reactor cerrado a temperatura constante, pero humedad variable, donde determinó que las mínimas variaciones de humedad generaron grandes cambios de temperatura. Se considera apropiado la humedad debe ser tal que el agua no ocupe por completo los poros de la masa de compost (Miyatake, 2006) con el fin de que haya un desplazamiento de oxígeno y otros gases.

Un adecuado porcentaje se encuentra en el rango de 50-70%, puesto que la actividad microbiana disminuye si la humedad presenta valores inferiores al 30%. Sin embargo,

valores mayores al 70%, ocasionan que el agua reemplace al aire dentro de los espacios libres en la masa de compost, produciéndose anaerobiosis lo que provoca los malos olores y retrasa la velocidad del proceso. Sin embargo, una pila de composta con valores muy bajos de humedad, forma polvo que resulta nocivo para la actividad microbiana y transmite malos olores debido a patógenos como el *Aspergillus fumigatus*. Es por ello, que es importante conservar el nivel de humedad entre 40% y 60% ya que aminora dichos inconvenientes (Graves & Hattemer, 2010b).

Durante el compostaje es necesario alcanzar el equilibrio entre los orificios de las partículas de diámetro variable, ya que pueden bloquearse por aire o agua. Según Haug (1993), la humedad óptima varía de acuerdo al tipo de residuo; por ejemplo, en el caso de los cereales (75% - 85%), astillas de madera (75% -90%) y residuos sólidos urbanos (50% - 55%).

Parámetros de acuerdo a la naturaleza del sustrato

Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica del compost se rige debidos a dos factores: por la composición del material y la naturaleza del material inicial. Durante el proceso ocurre la formación de iones amonio o nitrato, otorgando las condiciones de salinidad (Sánchez-Monedero et al., 2001).

Cuand la materia orgánica se mineraliza, a conductividad eléctrica tiende a elevarse al igual que la concentración de nutrientes. El descenso de los valores de este parámetro puede deberse a la lixiviación, provocado por una excesiva humectación de la masa (Bueno Márquez et al., 2008)

Tamaño De Partícula

Con el fin de mejorar el compostaje es necesario considerar el tamaño preliminar de las partículas en la pila de compost, ya que cuanto mayor sea la superficie expuesta a la actividad microbiana por unidad de masa, la descomposición será más veloz y completa.

Es por ello que la trituración del material facilita la descomposición por parte de los microorganismos e incrementa la velocidad de degradación. Se ha demostrado que, en el compostaje con residuos agroindustriales, la velocidad de descomposición era el doble al moler el material. Sin embargo, las partículas muy pequeñas propician una gran superficie de contacto para la descomposición microbiana y ocasiona una reducción del espacio entre partículas aumentando la fricción (Haug, 1993); lo que afecta el ingreso de oxígeno hacia adentro de la pila y del dióxido de carbono hacia afuera, lo cual inhibe la reproducción de los microorganismos y ocasiona un colapso al volverse imposible la aireación mediante la convección natural. Por otro lado, las partículas muy finas no son aconsejables ya que pueden compactarse.

Se consideran dimensiones adecuadas distintas según diversos especialistas, si la partícula varían de 1 - 5 cm (Haug, 1993), 2 - 5 cm (Kiehl, 1985) o de 2,5 - 2,7 cm (Tchobanoglous, 1994).

Nutrientes

El potencial agrícola de los residuos depende de los elementos disponibles que posean (Kiehl, 1985). Es fundamental proporcionar macronutrientes como el nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), magnesio (Mg), azufre (S) y micro elementos. Probablemente uno de los recursos más relevantes que requieren los microorganismos, además del carbono, es el nitrógeno pues es imprescindible para la síntesis de proteínas, aminoácidos y ADN.

El contenido de nitrógeno es medido como Kjeldahl N total, mientras que el contenido de C se puede estimar a partir del contenido de cenizas (van der Wurff et al., 2016):

$$\%C = \left(\frac{100 - \%Ceniza}{1.8} \right)$$

El elemento esencial que interviene en síntesis celular en el proceso de formación de lípidos, grasas, carbohidratos y protoplasma es el carbono, el cual se oxida para producir anhídrido carbónico y energía. Tanto el 50% de las células microbianas como el 25% del anhídrido carbónico desprendido de la respiración de los microorganismos, están constituidas por el carbono. Para la generación de compuestos celulares con abundante energía, es esencial la presencia del fósforo. El aumento de las concentraciones de diversos nutrientes, ocurren entre el inicio y final de la incubación donde hay pérdidas de materia orgánica (Díaz et al., 2004).

Relación de Carbono y Nitrógeno (C/N)

Los macronutrientes como el carbono (C), nitrógeno (N), fósforo (P), y potasio (K) son necesarios para el desarrollo de los microorganismos. La principal fuente de alimento y energía es el carbono, en el proceso de asimilación en presencia de oxígeno, parte del carbono se emite como dióxido de carbono y el resto se combina con el nitrógeno promoviendo el crecimiento de los microorganismos. Luego de la maduración, el compost contendrá entre 30 a 50% de carbono que en condiciones iniciales. El nitrógeno participa en la formación de aminoácidos, proteínas y células, siendo reciclado continuamente (Bueno Márquez et al., 2008).

Para el óptimo aprovechamiento de carbono y nitrógeno la relación entre estos componentes debe estar balanceada, los microorganismos emplean 30 partes de carbono por cada una de nitrógeno, esa es la razón por la que el intervalo teórico apropiado para el

compostaje oscila entre 25-35. En caso la relación de carbono-nitrógeno (C/N), exceda al valor de 40, conlleva a un decrecimiento de la actividad biológica lo cual fuerza a los microorganismos a oxidar el exceso de carbono como anhídrido carbónico, ralentizando el proceso de compostaje.

Si los productos que se compostan presentan un nivel bajo de la relación carbono-nitrógeno (menos a 18-19), el proceso de formación del compost se desarrolla rápidamente (Golueke & Díaz, 1987) y el nitrógeno remanente se emite al ambiente como amoníaco realizando el equilibrio de la relación carbono-nitrógeno (Jhorar et al., 1991). Al final, es fundamental recordar que generalmente los materiales que tienen dentro azúcares básicas, como los residuos de fruta, se descomponen velozmente, mientras que el material leñoso unificado a ligninas resistentes a la descomposición es más complejo de descomponer (Graves & Hattemer, 2010b).

Relación de Carbono y Fósforo (C/P)

El fósforo es el nutriente con mayor relevancia, tras el carbono y el nitrógeno, por lo cual también se requiere que esté presente en mínimas cantidades un correcto proceso. Una adecuada relación entre los principales nutrientes promueve una óptima proliferación microbiana (Bueno Márquez et al., 2008).

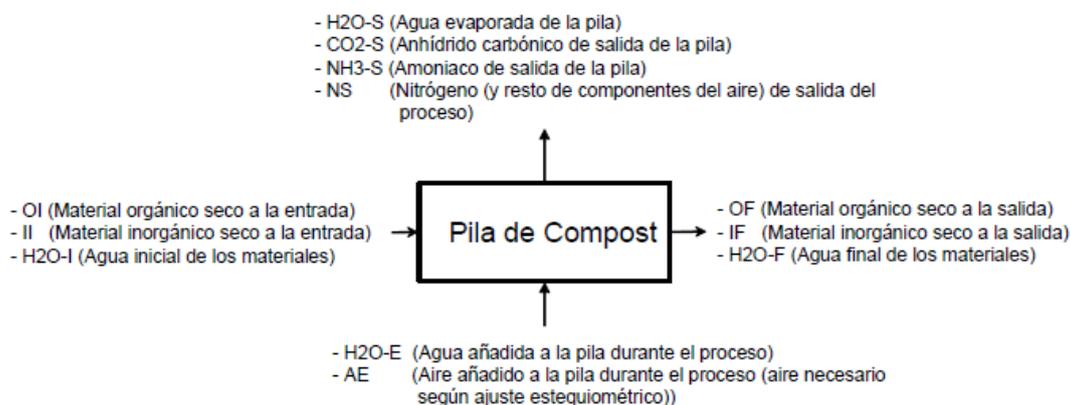
Singh y Amberger (1990) demostraron que la descomposición de la paja aumentada a medida que se añadía fósforo en forma de roca fosfática. Se considera una relación óptima de carbono – fósforo (C/P) cuando los valores se encuentran entre 75 - 150, mientras que la relación nitrógeno – fósforo (N/P) oscila entre 5 - 20.

Materia Orgánica

El contenido de materia de origen orgánico es vital en el compostaje para determinar su aplicación en la agronomía (Kiehl, 1985). La cantidad de materia orgánica desciende a medida que se mineraliza y pierde carbono a manera de anhídrido carbónico, estas pérdidas alcanzan hasta casi el 20% el peso del compost (Zucconi et al., 1981). Esta reducción ocurre en dos momentos: en el primero se incrementan los carbohidratos rápidamente y se generan compuestos húmicos (Bueno Márquez et al., 2008). En el segundo momento, la materia más sólida como las ligninas son degradadas pausadamente o se transforman en compuestos húmicos (Tomati et al., 2000).

La materia orgánica se transforma a una velocidad que está determinada por la naturaleza de los microorganismos y por las condiciones físico-químicas como la aireación, humedad, pH y temperatura (Michel et al., 2004).

En el proceso de compostaje se originan pérdidas de peso ya que la materia orgánica y otros nutrientes se mineralizan, esto puede ser evaluado según el balance de materia como se observa en la figura 4.



Fuente: (Bueno Márquez et al., 2008)

Figura 4. Balance de materia en el proceso de compostaje.

La biodegradabilidad es un indicador de la materia orgánica que tiende a descomponerse o que ya se ha descompuesto a partir de una mezcla o producto determinado (Tchobanoglous, 1994). Según dicho autor entre 23% y 54% de la celulosa se degrada en un periodo de 200 días dependiendo de la composición de la mezcla; los compuestos degradables son las celulosas y hemicelulosas, en cambio la degradabilidad de los compuestos lipídicos es limitada mientras que las ligninas no logran la degradación completa.

BOCASHI

El bocashi es un tipo de abono orgánico, con alto contenido de nutrientes necesarios para el desarrollo de los cultivos. Es el resultado de la fermentación de materiales secos como afrecho y guano madura convenientemente mezclados con levadura, miel o melaza y yogurt. Los nutrientes producidos a partir de la fermentación de la materia orgánica contienen elementos que proporcionan un abono completo y superior a las fórmulas de fertilizantes químicos (FAO, 2011).

BIODIGESTOR

Un biodigestor es un sistema cerrado mediante el cual se dan las condiciones para que se desarrolle la descomposición anaeróbica de la materia orgánica. A este proceso se le conoce como “digestión anaeróbica”. Si se comparara el mecanismo de un biodigestor, se podría decir que es similar al estómago de un animal, ya que en el interior del biodigestor se encuentran bacterias cuya función es descomponer el estiércol y otros residuos orgánicos, que luego son convertidos en biofertilizantes y biogás (Cotrina & Villanueva, 2013).

Uso de la producción de compost

El compost puede aplicarse al suelo en estado semimaduro, es decir si se encuentra aún en la fase mesófila o se encuentra maduro. Este compost se caracteriza por una alta actividad biológica y porque los nutrientes son asimilados por las plantas en mayor proporción comparado con un compost maduro. Sin embargo, si presenta un pH que tiende a la acidez, no se debe aplicar para la germinación de semillas y tampoco sobre plantas delicadas. En la horticultura para cultivos de coliflor, papa y apio normalmente se aplica en una proporción de 4 - 5 kg/m² luego de haber labrado el terreno. Para cultivos extensivos, su aplicación es en proporción de 7 - 10 T/ha de compost. En el campo municipal el compost maduro se aplica primordialmente para plántulas, jardineras, macetas y se frecuenta mezclar en una cantidad de 20%-50% junto con tierra y cascarilla de arroz turba como sustrato (Román et al., 2013).

Investigaciones en optimización del compostaje

Comparación de aireación para compostaje de residuos sólidos municipales

En esta investigación se inspeccionó la efectividad de tres procedimientos de aireación normales para compostar la fracción orgánica de residuos sólidos municipales (FORSM); torneado de pila (PT), pila estática de ventilación natural (NVS), pila estática de aireación forzada (FAS) y una mezcla de pila estática de torneado y ventilación natural (CPN) en las condiciones prácticas del lugar de compostaje de Teherán. De acuerdo a los resultados y análisis de los indicadores de rendimiento, se determinó que pese a que el sistema de ventilación natural (NVS), consumiera la energía específica más baja, no se recomienda para un compostaje en donde se tengan materiales muy variados para un periodo de cuatro meses.

Debido a lo cual, se concluyó que para compostar los residuos orgánicos el procedimiento PT se puede suplir de forma eficiente por el procedimiento CPN para poder hacer superiores resultados en el consumo final de energía por unidad de área de las fincas, así como además reduciendo las pérdidas de nitrógeno. Con respecto a los costos de inversión y operacionales, CPN también es preferible en comparación con el PT debido a su capacidad para omitir las actividades de torneado durante los últimos dos meses de compostaje (Rasapoor et al., 2016).

Aplicación de microorganismos eficientes

En un estudio sobre compostaje paja de arroz con microorganismos eficaces (EM), se obtuvo que la aplicación de EM (mezcla de melaza y agua no clorada o agua de enjuague de arroz, que proporciona los minerales para la multiplicación de los microorganismos), aumentó el contenido de macro y micronutrientes. El tratamiento que contenía EM presentaba mayor concentración de hierro (Fe), nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) a diferencia del tratamiento con aplicación de EM. No obstante, no se determinó una diferencia significativa para el zinc (Zn) y cobre (Cu) (Che Jusoh et al., 2013).

III. CONCLUSIONES

El compostaje es una técnica agronómica que permite un adecuado aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos, no solo para el sector agropecuario, sino que también puede ser implementado para los residuos urbanos, empleando activadores como microorganismos eficientes o implementando un sistema de aireación continua se pueden obtener buenos resultados sí que quiere implementar este proceso a gran escala. Cabe mencionar que el método de compostaje se debe ajustar a las características propias del

lugar donde se realice ya que las variables climáticas como principalmente la temperatura juega un rol importante para el eficiente proceso de obtención de compost.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Avendaño Acosta, E. F. (2015). *Panorama actual de la situación mundial, nacional y distrital de los residuos sólidos. Análisis del caso Bogotá D.C. programa basura cero* (Vol. 3, Issue 2).

Bernal, P., & Gondar, D. (2008). Producción y gestión de los residuos sólidos orgánicos: situación actual a nivel municipal, comunitario y estatal. In J. Moreno & R. Moral (Eds.), *Compostaje* (pp. 9–41). Mundi-Prensa.

Bueno Márquez, P., Díaz Blanco, M. J., & Cabrera Capitán, F. (2008). Factores que afectan al proceso de compostaje. In *Compostaje*. Mundi-Prensa.

Che Jusoh, M. L., Abd Manaf, L., & Abdul Latiff, P. (2013). Composting of rice straw with effective microorganisms (EM) and its influence on compost quality. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 10(17), 1.
<https://doi.org/10.1186/1735-2746-10-17>

Citterio, B., Civilini, M., Rutili, A., & de Bertoldi, M. (1987). Control of a composting process in bioreactor by monitoring chemical and microbial parameters. In *Compost: Production, Quality and Use* (pp. 633–642).

Clima de Cambios. (2019). *¿Qué es la economía circular y cuál es su importancia?*
<https://www.pucp.edu.pe/climadecambios/noticias/que-es-la-economia-circular-y-cual-es-su-importancia/>

Congreso de la República. (2016). Decreto Legislativo N° 1278. Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos. *Diario Oficial El Peruano*, 23 de diciembre, 56–67.
<http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Decreto-Legislativo-N°->

1278.pdf

Corrales, L. C., Antolinez Romero, D. M., Bohórquez Macías, J. A., & Corredor Vargas, A.

M. (2017). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *Nova*, 13(24), 55.

<https://doi.org/10.22490/24629448.1717>

Cotrina, R., & Villanueva, G. (2013). *Biodigestores tubulares unifamiliares*.

Díaz, M., Cabrera, F., & De Bertoldi, M. (2004). Using a second order polynomials model to determine the optimum vinasse/grape marc ratio for in vessel composting. *Compost Sci. Util.*, 12(3), 273–279.

Ermolaev, E., Sundberg, C., Pell, M., & Jönsson, H. (2014). Bioresource Technology Greenhouse gas emissions from home composting in practice. *Bioresource Technology*, 151, 174–182. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.10.049>

FAO. (2011). Elaboracion Y Uso Del Bokashi. *Ministerio De Agricultura Y Ganadería*.

Flotats, X., & Campos, E. (2012). Procesos biológicos. La digestión anaerobia y el compostaje. *Tratamiento y Valorizacion Energética de Residuos.*, January 2004, 618–684.

Fritsche, W., & Hofrichter, M. (2008). Aerobic Degradation by Microorganisms.

Biotechnology: Second, Completely Revised Edition, 11–12, 144–167.

<https://doi.org/10.1002/9783527620999.ch6m>

Golueke, C. ., & Díaz, L. . (1987). Composting and the Limiting Factors Principle.

Biocycle, 4, 22–25.

- Graves, R. E., & Hattemer, G. M. (2010a). Chapter 2 Composting. *Environmental Engineering National Engineering Handbook*, November, 1–65.
- Graves, R. E., & Hattemer, G. M. (2010b). Chapter 2 Composting. In *Environmental Engineering National Engineering Handbook* (Issue November).
- Haug, R. T. (1993). *The practical handbook of compost engineering*. Lewis Publishers.
- Hoorweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012). *What a waste: A global Review of Solid Waste Managment*. <https://doi.org/10.1201/9781315593173-4>
- Jhorar, B. ., Phogat, V., & Malik, E. (1991). Kinetics of composting rice straw with glue waste at different carbon:nitrogen ratios in a semiarid environment. *Arid Soil Rest*, 5, 297–306.
- Kiehl. (1985). *Fertilizantes orgánicos*.
- Liang, C., Das, K. C., & McClendon, R. W. (2003). The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend. *Bioresource Technology*, 86(2), 131–137.
[https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00153-0](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00153-0)
- Michel, F. C., Pecchia, J. A., & Rigot, J. (2004). Mass and nutrient losses during the composting of dairy manure amended with sawdust or straw. *Compost Sci. Util.*, 12(4), 323–334.
- Moreno Casco, J., & Moral Herrero, R. (2008). *Compostaje*. Mundi-Prensa.
- OEFA. (2016). *Indice de cumplimiento de los municipios provinciales a nivel nacional*.
- Orozco, V. H. V. (2015). *Diseño y automatización de un sistema de aireación forzada*

para el co-compostaje de residuos hortícolas en la comunidad de gatazo cantón colta.

- Puyuelo, B., Gea, T., & Sánchez, A. (2010). A new control strategy for the composting process based on the oxygen uptake rate. *Chemical Engineering Journal*, 165(1), 161–169. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.09.011>
- Rasapoor, M., Adl, M., & Pourazizi, B. (2016). Comparative evaluation of aeration methods for municipal solid waste composting from the perspective of resource management: A practical case study in Tehran, Iran. *Journal of Environmental Management*, 184, 528–534. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.029>
- Román, P., Martínez, M. M., & Pantoja, A. (2013). Manual de compostaje, Experiencias en América Latina. In *Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe*. <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>
- Saña, J., & Soliva, M. (1987). *El compostaje: Proceso, sistemas y aplicaciones*.
- Sánchez-Monedero, Roig, Paredes, & Bernal. (2001). Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. *Biores. Technol*, 301–308.
- Shimizu, N. (2017). Process optimization of composting systems. *Robotics and Mechatronics for Agriculture*, November, 1–22. <https://doi.org/10.1201/9781315203638>
- Silpa Kaza, Lisa Yao, Perinaz Bhada-Tata, A., Woerden, F. Van, With Kremena Ionkova, J. M., Renan Alberto Poveda, Maria Sarraf, F. M., A.S. Harinath, Farouk Banna, G. A., & Haruka Imoto, and D. L. (2018). *What a waste 2.0*.

<https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>

Suler, D. J., & Finstein, S. (1977). Effect of Temperature, Aeration, and Moisture on CO₂

Formation in Bench-Scale, continuously Thermophilic Composting of Solid Waste.

Appl. Environ. Microbiol., 32(2), 345–350.

Tchobanoglous, G. (1994). *Gestión Integral de Residuos Sólidos*. McGraw-Hill.

Tomati, U., Madejon, E., & Galli, E. (2000). Evolution of humic acid molecular weight as

an index of compost stability. *Compost Sci. Util.*, 8(2), 108–115.

<https://doi.org/10.1080/1065657X.2000.10701756>

van der Wurff, A. W. G., Fuchs, J. G., Raviv, M., & Termorshuizen, A. (2016). *Handbook*

for composting and compost use in organic horticulture.

<https://doi.org/10.18174/375218>

Zucconi, F., Pera, A., Forte, M., & De Bertoli, M. (1981). Evaluating toxicity in immature

compost. *Biocycle*, 22, 54–57.

Zulia, U., Urdaneta, G., Joheni, A., & Zulia, U. (2013). Manejo de Residuos Sólidos en

América Latina y el Caribe. *Choice Reviews Online*, 44(03), 44-1347-44–1347.

<https://doi.org/10.5860/choice.44-1347>