

Características físico-químicas de humus obtenido de biosólidos provenientes de procesos de tratamiento de aguas residuales

Humus physical-chemical features obtained from biosolids from wastewater treatment processes

Recibido: 22-09-2016 Aceptado: 15-11-2017

Álvaro Chávez Porras*¹
 Yessica Liceth Velásquez Castiblanco²
 Nicolás David Casallas Ortega³

¹ Colombiano. PhD. Universidad Militar Nueva Granada - UMNG. Bogotá, Colombia. *autor de correspondencia: alvaro.chavez@unimilitar.edu.co.

² Colombiana. Esp. Universidad Militar Nueva Granada – UMNG. Bogotá, Colombia. e-mail: tmp.yessica.velasquez@unimilitar.edu.co.

³ Colombiano. Esp. Universidad Militar Nueva Granada – UMNG. Bogotá, Colombia, e-mail: tmp.nicolas.casallas@unimilitar.edu.co.

Resumen

A nivel mundial las prácticas de manipulación, almacenamiento, transporte y disposición final de los residuos orgánicos constituyen uno de los retos de complejidad y relevancia; debido a que éstos son considerados como foco potencial de contaminación de recursos naturales disponibles. Uno de los factores, de mayor incidencia, se relaciona con el tratamiento de aguas residuales domésticas, el cual tiene como subproductos los biosólidos; éstos son definidos como elementos sólidos, semisólidos o líquidos que poseen elevado contenido de Materia Orgánica (MO) y macronutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K); y se considera la posibilidad de procesarlos y aprovecharlos, empleando diferentes alternativas orientadas al reúso. Una de ellas, la técnica de vermicompostaje, está basada en la estabilización de la MO por la acción de lombrices de diferentes especies, que son capaces de alimentarse de esos sustratos, generando humus que pueda ser usado como corrector de suelos o abono. Esta investigación muestra el caso donde se desarrolló un sistema de reactores, con lombrices de la especie roja californiana *Eisenia foetida*; usando como materia prima los biosólidos provenientes del tratamiento de aguas residuales del Campus Nueva Granada, UMNG, Cajicá, Cundinamarca. Se tuvo como objetivo el generar y medir un proceso biológico de estabilización que mejore las condiciones del biosólidos, donde el humus obtenido pueda ser usado como enmienda para la recuperación de suelos; estableciendo las características físico-químicas del producto final, bajo el marco de la NTC 5167. Pudiendo concluir se encuentra entre los límites establecidos por la norma, para ser utilizado como acondicionador de suelos, degradados o descompensados por procesos antrópicos o naturales.

Palabras clave: Humus; vermicompostaje; biosólidos; abono comercial.

Abstract

Global practices of handling, storage, transportation and disposal of organic waste constitute one of the challenges of complexity and relevance; Since these are considered as a potential focus of pollution of natural resources. One of the factors, increased incidence, relates to the treatment of domestic wastewater, which has as a by-product the biosolids; These defined as elements, solid, semi-solid or liquid possessing high content of organic matter (MO) and nutrients like nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K); and is considered the possibility of process and take advantage of them, using different alternatives to reuse. One of them, the technique of vermicomposting, is based on OM stabilize it by the action of worms of different species, which are able to feed on these substrates, generating humus, which can be used as soil or manure. This research shows the case where developed a system of reactors, with worms of the Californian red species, *Eisenia foetida*; using as raw material from biosolids from the treatment of wastewater of the New Granada Campus, UMNG, Cajicá, Cundinamarca. Is aimed at generating and measuring a biological process of stabilization that the conditions of the biosolids, where retrieved humus can be used as amendment to the recovery of soils; establishing the physicochemical characteristics of the final product, under the framework of the NTC 5167. And can conclude that it is within the limits established by the regulation, to be used as a soil conditioner, degraded or Decompensated by anthropogenic or natural processes.

Keywords: Humus; vermicomposting; biosolids; commercial fertilizer.

Introducción

La manipulación, almacenamiento, transporte y disposición final de los residuos orgánicos requiere pronta atención por su impacto al ambiente, ya que son considerados como fuente potencial de afectación de los recursos naturales aprovechables.

Entre ellos están los residuos generados en el tratamiento de aguas residuales domésticas, el cual tiene como subproductos los biosólidos.

Éstos están definidos como elementos sólidos, semisólidos o líquidos que poseen elevado contenido de Materia Orgánica (MO) y macronutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). Se considera la alternativa de procesarlos y aprovecharlos, empleando diferentes opciones orientadas al reúso.

Una de ellas es la práctica de vermicompostaje, la cual está basada en la estabilización de la MO, por la operación de lombrices de diferentes especies, que son capaces de nutrirse de esos sustratos residuales, produciendo humus, que pueda utilizarse como acondicionador de suelos o abono orgánico.

El caso de estudio planteado se desarrolló en el Campus Universitario de la Universidad Militar Nueva Granada, UMNG, ubicado en el municipio de Cajicá, departamento de Cundinamarca; donde se desarrolló un sistema de vermicompostaje, con la especie *Eisenia foetida*.

Se usó como materia prima los biosólidos provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales – (PTAR) de la UMNG; planta que opera un caudal máximo de 2,5 L/s de agua residual y genera en promedio 40 kg/semanales de biosólido (Aguacol, 2008).

Se tuvo como fin, establecer variaciones en el biosólido inicial y el humus resultante (en el proceso de vermicompostaje planteado), se evaluaron las mejoras en las condiciones del sustrato, en sus características físico-químicas de las concentraciones de MO, macro y micro elementos, según lo establecido por la norma NTC 5167 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación – ICONTEC, 2004).

Residuos orgánicos de plantas de tratamiento de aguas residuales

La gestión integral de residuos orgánicos, representa uno de los desafíos de mayor relevancia a nivel mundial, debido a que son considerados como foco potencial de contaminación de los recursos naturales aprovechables para el ser humano; lo cual ha llevado a plantear alternativas biotecnológicas que permitan su estabilización y aprovechamiento, en beneficio del planeta (Martínez, 2015).

Uno de los factores de mayor incidencia en procesos contaminantes se relaciona con el procesamiento de aguas servidas y efluentes industriales en las Plantas

de Tratamiento de Aguas Residuales – (PTAR). En los subproductos provenientes de estas metodologías se destacan los lodos residuales o biosólidos, los cuales son generados en altos niveles (Hernández-Rodríguez, Ojeda-Barrios, López-Díaz y Arras-Vota, 2010).

Entre las principales características físico-químicas, de este sustrato, encuentran:

- pH en valores cercanos al neutro; como lo reportado por Peñarete, Silva, Daza, Torres y Urrutia (2013), mostrando un valor de 7,6 para biosólidos de la PTAR Cañaveralejo de Cali (V).
- Densidad valorada en 1,24 g/cm³ en un ciclo de cultivo de cuatro meses (Peñarete Murcia *et al.*, 2013).
- Elevado contenido de Materia Orgánica (MO), entre el 60 y 70%; así como de valores elevados en contenido de macronutrientes tales como, nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), catalogados como esenciales para el desarrollo vegetal (Castro, Henríquez y Bertsch, 2008).

Sistemas de tratamiento para residuos orgánicos

Como alternativas de tratamiento de los sustratos orgánicos se plantea el compostaje y la producción de abonos. Y su opción, el vermicompostaje, como una técnica aplicada que presenta un proceso biotecnológico de degradación y estabilización de MO, por medio de la acción de lombrices, las cuales se alimentan de los residuos, acelerando su descomposición (Fernández, 2011; Hernández-Rodríguez, *et al.*, 2010).

A este nivel, el abono presenta una serie de propiedades y características que contribuyen a aumentar la fertilidad del suelo. Dentro de las propiedades físicas se destaca el mejoramiento en la estructura, textura y permeabilidad del suelo, aumentando el nivel de retención hídrica (Fondo para la protección del agua – FONAG, 2010).

Cabe anotar, también, que el uso e incorporación de fertilizantes químicos y abonos, se plantea como una práctica asociada a suplir las necesidades referentes al crecimiento de las distintas especies vegetales en un cultivo, así como la recuperación de los suelos, teniendo en cuenta que su aplicación permite incrementar los niveles de MO (Acosta y Peralta, 2015).

Estudios realizados en investigaciones preliminares, muestran que los abonos orgánicos pueden ser

implementados en tierras en las cuales se realizan cultivos intensos; brindando como beneficio la mejora en la estructura del suelo, por medio del aumento de la capacidad de retención de agua (Fernández, 2011).

En el mercado es fácil encontrar abonos y fertilizantes químicos comerciales de carácter sólido descritos como simples, compuestos y de *blending*, así como líquidos y fertilizantes órgano-minerales; que se diferencian de los orgánicos debido a que generan efectos nocivos con un uso extendido en el tiempo (Motta y Pinzón, 2011).

Según la NTC 5167 (ICONTEC, 2004), la clasificación de abonos orgánicos minerales sólidos está definida como una mezcla o combinación de abonos minerales y orgánicos de origen animal, vegetal, pedogenético (geológico) o provenientes de lodos de tratamiento de aguas residuales (biosólidos), que contiene porcentajes mínimos de MO (expresada como carbono orgánico oxidable total); determinando su uso en procesos de recuperación de suelos (ICONTEC, 2004).

Metodología aplicada en los reactores biológicos

Este trabajo se realizó en las instalaciones del Campus Universitario, UMNG, Cajicá, Cundinamarca, ubicado a una longitud de 74°00.552' O, latitud de 4°56.543' N y altura de 2580 msnm; con una temperatura media de 13°C y con humedad relativa promedio de 82 % (como características físicas del terreno).

Se tomaron muestras de biosólidos, provenientes de la PTAR UMNG (Figura 1A y 1B), debidamente preservadas, etiquetadas y empacadas en neveras con temperatura aproximada a 4°C. Registradas para el análisis, siguiendo las metodologías del “Standart Methods for the Examination of Water and Wastewater”.





Figura 1. Instalaciones de la PTAR UMNG, Cajicá, Cundinamarca
Fuente: Los autores

El proyecto se llevó a cabo con la implementación de un reactor biológico (sistema de vermicompostaje); permitiendo evaluar el comportamiento de individuos de la especie *Eisenia foetida* (Figura 2A), obtenidos de un cultivo previo del proveedor - "Lombricultura de Tenjo", adaptado al consumo de biosólido.

El sustrato utilizado como materia prima para la alimentación de las lombrices fue el biosólido, el cual se muestra en la Figura 2B.



Figura 2. Especie de cultivo *Eisenia foetida* en Biosólido PTAR-UMNG
Fuente: Los autores

El diseño del reactor, en camas modulares (Figura 3) permitió el control de las condiciones necesarias para el desarrollo del proceso, utilizando para ello un contenedor de 2,00 m de largo, 1,00 m de ancho y 0,30 m de altura, recubierto de plástico en su interior, con divisores, según la figura mostrada.

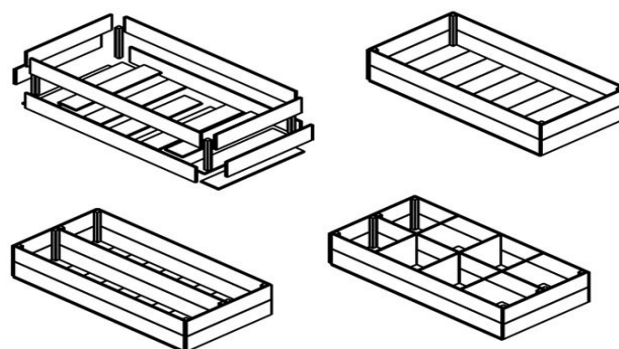


Figura 3. Camas modulares de vermicompostaje.
Fuente: Los autores

El interior del reactor se adecuó con una capa de grava de 0,15 m de altura; seguida de una capa de sustrato (biosólido) de 0,05 m de espesor, correspondiente a aproximadamente 60 kg; adicionando los individuos (lombrices) en la parte superior, acorde con un estudio poblacional y de consumo, previamente realizado. Recubierto con polisombra, con el fin de mitigar los efectos ambientales de pérdida de humedad, variaciones climáticas, proliferación de vectores y por la condición de fotofobia de las lombrices; todo dentro de un invernadero.

Técnicas de evaluación

El reactor funcionó durante 90 días; donde mensualmente se aplicó, adicionalmente, una capa de 0,075 m de biosólidos, correspondiente a un total de 95 kg, finalizando el mes 1 y finalizando el mes 2. Pasados los tres meses, se realizó el análisis final (caracterización) del humus resultante.

Se hicieron análisis al biosólido sin ningún tipo de tratamiento (sustrato inicial), al humus resultante (vermicompostaje) y a una muestra de control.

Las técnicas utilizadas para la determinación de los parámetros evaluados fueron: nitrógeno según Kjeldahl; fósforo por colorimetría; plomo, cromo, cadmio y potasio por absorción atómica (metales pesados por digestión ácida); contenido de carbono orgánico por calcinación; pH en extracto de saturación; y densidad por método de picnómetro.

Resultados obtenidos

En la Tabla 1 se presenta la caracterización físico-química obtenida del biosólido, humus y sustrato control,

en los parámetros anteriormente descritos; con su respectivo valor límite máximo de la NTC 5167 (ICONTEC, 2004).

Tabla 1. Caracterización del biosólido inicial, humus final, experimento control y su respectivo valor en la NTC 5167 (ICONTEC, 2004).

Parámetro	Biosólido inicial	Humus final	Control	NTC 5167
pH	6,30	6,80	6,30	Reportar
Contenido de humedad (%)	75,27	69,30	56,40	Max 15%
Densidad (g/cm ³)	0,89	1,20	1,10	Reportar
Relación carbono: nitrógeno (C/N%)	13,26	18,40	9,11	Reportar
Contenido de cenizas (%)	48,20	68,85	62,43	Reportar
Contenido de carbono orgánico Oxidable (%)	23,87	14,35	17,31	5-15%
Nitrógeno total (%)	4,50	4,90	8,30	Min 2 %
Fosforo total (%)	1,10	2,70	2,00	Min 2%
Potasio total (%)	0,30	1,40	1,10	Min 2%
Cadmio (mg/kg)	0,90	0,60	0,9	Max 39
Cromo (mg /kg)	20,50	11,80	20,50	Max 1200
Plomo (mg/kg)	19,00	7,70	19,00	Max 300

Fuente: Los autores.

Discusión y análisis

De los resultados obtenidos, en las propiedades físicas, el pH no tuvo una variación significativa (C.V=0,04), aunque se observa un aumento en el humus final.

Esto puede originarse en el proceso de mineralización de los compuestos nitrogenados en nitratos, compuestos NO_x y otros compuestos ácidos orgánicos. Considerando que en valores de pH cercanos a 7 se espera un crecimiento favorable de las lombrices en el lodo (Ndegwa y Thompson, 2000).

Por su parte, la humedad, que es un factor de gran importancia en el proceso de compostaje, por ser el medio por el cual se transportan las sustancias y nutrientes, permite la asimilación para la gran variedad de organismos presentes. Ésta debe de ir disminuyendo a medida que pasa el tiempo de compostaje, ya que valores inferiores a 35% muestran un sistema de compostaje inestable (Román, Martínez y Pantoja, 2013).

Aunque el valor final obtenido del proceso propuesto no cumplió con los requerimientos de la norma colombiana, se evidencia que la muestra analizada fue tomada después del trapeo; y generalmente, el humus conseguido es extraído, molido y secado con procesos unitarios que pueden modificar la humedad del producto final.

En la transformación del material grueso en material fino, característico del humus, se explica el aumento de la densidad en el sistema; teniendo en cuenta que densidades por encima de 1,4 g/cm³ se consideran altas para suelos de texturas finas (Peñarete *et al.*, 2013).

El contenido de carbono orgánico, es un indicador de la concentración de MO y un índice de la calidad del humus; según la NTC 5167 (ICONTEC, 2004) este porcentaje debe de estar entre 5 - 15%. En la Figura 4 se presenta la variación de este parámetro en el sistema de vermicompostaje propuesto.

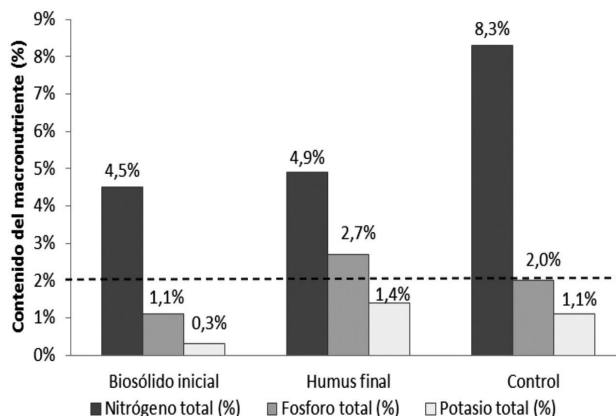


Figura 4. Comportamiento de los macronutrientes en el tratamiento.

Fuente: Los autores

Se observa una disminución del porcentaje (C.V=0,25), debido a que durante los 90 días de tratamiento, la MO fue el alimento de los organismos presentes en el sistema (Figura 5). Lo que influye favorablemente en la reducción de la relación C/N, ya que existirá una mayor biodisponibilidad del nitrógeno para las plantas cuando es usado como abono (Sinha, Herat, Bharambe, y Brahambhatt, 2010).

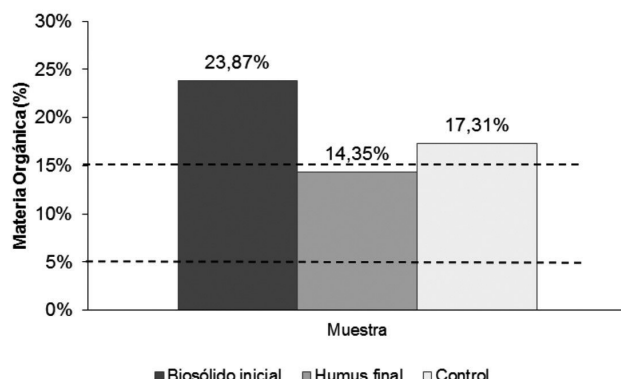


Figura 5. Contenido de materia orgánica de las muestras inicial y final del sistema de vermicompostaje.

Fuente: Los autores

El contenido de MO y de nutrientes como N y K son de importancia para el aprovechamiento agrícola; sin embargo se debe tener precaución cuando éstos se presentan en sustratos de pH altos, pues crean restricciones para el uso en suelos básicos (Peñarete *et al.*, 2013).

Además, la digestión directa y el consumo de lodos por las lombrices, también podrían ser útiles para la estabilización de la MO (Jian, Baoyi, Jie, & Meiyang, 2014). El humus final contiene un porcentaje de 14,4% en MO, el cual se encuentra en los límites establecidos por la norma.

A continuación se presenta el comportamiento de los macronutrientes N-P-K, entre el biosólido y el humus final (Figura 4), donde se evidencia un aumento de los componentes, favoreciendo el producto final.

El contenido de N total es directamente proporcional a los materiales iniciales, del proceso de vermicompostaje y de las condiciones de maduración (Acosta y Peralta, 2015).

Con respecto a los analitos N y P, los porcentajes de contenido aumentaron significativamente (C.V: N=0,04, P=0,42), cumpliendo con lo establecido por la NTC 5167 (ICONTEC, 2004). El N, en la utilización de residuos orgánicos aporta ventajas en cuanto a proporcionar un suministro regulado y su potencial en la reducción de la contaminación nitrogenada (Román *et al.*, 2013).

El aumento en el porcentaje se puede explicar, como se había mencionado anteriormente, en la mineralización de los compuestos nitrogenados en nitratos, NO_x y compuestos ácidos orgánicos, que permiten incrementar el contenido del N, tanto en el lodo sin tratar (control) como en el producto final o humus (Ndegwa y Thompson, 2000).

Consecuentemente, la relación C/N es un indicador de madurez y estabilidad de la MO en el compost; y con valores cercanos a 25,00, considera un vermicompostaje óptimo para la estabilización de los lodos y la reducción de sólidos volátiles.

Valores bajos indican inestabilidad en el material (Gaird, 2014), con un contenido alto de N; recomendando mezclarlo con materiales ricos en C, tales como pajas y hojas en descomposición (Sinha *et al.*, 2010).

Lo que se evidencia en la relación del biosólido inicial 13,26 en comparación con un humus estabilizado con valor C/N igual a 18,40.

En cuanto al P, en los residuos orgánicos se encuentra fundamentalmente en ácidos nucleicos, fosfolípidos y fitina. El aumento significativo (C.V=0,42) en el humus final, favoreció las propiedades del abono orgánico sólido final, ya que no solo aumentó los niveles en el suelo directamente, sino que también, logró mejorar la capacidad de absorción y disponibilidad en suelo. (Román *et al.*, 2013).

Por otro lado, K es un elemento móvil en el suelo, por lo que es fácilmente lixiviado (percolación) y su porcentaje disponible es muy reducido; como se observó en el humus final, el cual no logró llegar al valor exigido por la norma, aunque fue el elemento que mayor coeficiente de variación; tuvo: un CV=0,65.

Generalmente, en sistemas de compostaje diferentes se menciona que los contenidos de K encontrados son bajos (1-1,5%), teniendo en cuenta que este elemento puede disminuir en la etapa final del proceso cuando no se tiene abundante MO (Muñoz, 2005); concluyendo, que para un compost estabilizado completamente, el valor debe estar cercano a 1,5%; logrando un humus final del estudio con valores cercanos a 1,4%.

Cabe anotar que, en la muestra control, la concentración de los macronutrientes aumentó, simplemente, por procesos de descomposición. Exponiendo la importancia del papel de la lombriz, estabilizando dichos componentes y proporcionando las características deseadas para el humus final.

En cuanto al comportamiento de los metales pesados, determinados mediante espectrofotometría de absorción atómica, sus variaciones se presentan en la Figura 6; considerando que en la figura no se muestra el límite máximo denotado por la NTC 5167 (ICONTEC, 2004), ya que ningún analito se acerca a los valores exigidos.

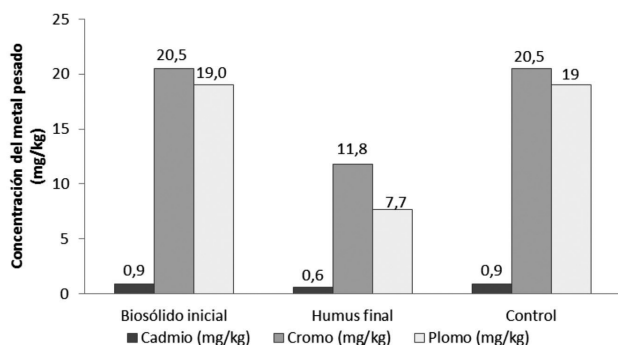


Figura 6. Concentración de metales pesados en el biosólido inicial y humus final.

Fuente: Los autores

Los resultados confirman que las lombrices reducen el nivel de estos metales en el lodo vermicompostado; donde la concentración disminuyó significativamente (C.V Cd=0,20, Cr= 0,27, Pb= 0,42) respecto al biosólido inicial y humus final.

La toxicidad de estos parámetros es un factor limitante en el uso agrícola del abono, por sus efectos nocivos a largo plazo y la bioacumulación en los organismos. Aunque, por la degradación microbiana natural, los lodos logran estabilizarse lentamente, los metales pesados siempre permanecerán en el sistema y con el transcurrir del tiempo podrán caer al suelo o unirse a moléculas orgánicas del suelo.

La actividad de las lombrices tiene un papel importante en la reducción de la concentración de estos contaminantes, si se proporcionara materiales para mejorar la actividad de los organismos vivos y su reproducción; obteniendo una mayor eliminación de los metales pesados (Sinha *et al.*, 2010).

Para terminar se realizó la comparación del humus final del caso experimental, frente a un abono orgánico de carácter comercial (Tabla 2). Se seleccionó el abono producido por la empresa colombiana “Lombricultura de Tenjo”, Cundinamarca, teniendo en cuenta que dicho producto proviene de un proceso de vermicompostaje.

Tabla 2. Comparación humus final y Lombritenjo, producto comercial.

Parámetro	Humus final	Abono orgánico comercial (Lombritenjo)
Contenido de humedad (%)	69,3	25
pH	6,8	7,37
Contenido de carbono orgánico oxidable (%)	14,35	19,5
Nitrógeno Total (%)	4,9	1,19
Fósforo (%)	2,7	1,21
Potasio (%)	1,4	1,01
Calcio (%)	6	1,62
Magnesio (%)	1,1	0,67

Fuente: Los autores

En cuanto a los parámetros físicos de los dos materiales, debe tenerse en cuenta que la muestra tomada en este estudio fue sin el tratamiento de secado y molienda; por lo tanto esta puede ser controlada lográndose una disminución del contenido de humedad. En cuanto al pH ambos productos poseen valores cercanos a 7, lo que favorece al suelo productivo.

En el contenido de carbono orgánico oxidable, se ve aventajado el humus final debido a que su porcentaje es menor a 15%, lo que satisface las especificaciones de la norma (5-15%); por el contrario el producto comercial Lombritenjo no cumple con estos requerimientos.

Al igual que en su contenido de macro (N-P-K) y micro (Ca, Mg) nutrientes, los cuales se requieren en un porcentaje superior al 2%.

Las observaciones anteriores manifiestan la calidad del humus final obtenido; el cual podría ser empleado sin complicaciones normativas; sin embargo, se debe tener en cuenta la concentración de metales pesados, ya que por su toxicidad y bioacumulación en los organismos podrían afectar el suelo y los procesos que ocurren en él.

Conclusiones

Las prácticas de manipulación, almacenamiento, transporte y disposición final de los residuos orgánicos son foco potencial de contaminación de los recursos naturales disponibles, principalmente en lo relacionado con el tratamiento de aguas residuales, sean domésticas

o industriales. Estas aguas generan un subproducto, los biosólidos, los cuales son elementos que poseen elevado contenido de Materia Orgánica – MO y macronutrientes como N, P y K; teniendo la posibilidad de ser procesados y aprovechados, en su reutilización.

En el proceso propuesto, la mineralización y estabilización de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales, PTAR UMNG, a través de la técnica de vermicompostaje logró una disminución de los valores de carbono orgánico total de un 40%; lo que pudo ser debido a factores como la biodegradabilidad del residuo, su naturaleza y el tamaño de las partículas que lo componen. También, se pudo establecer, comparando los resultados antes y después del tratamiento, que se presentó un aumento de la concentración de nutrientes, esto como consecuencia de la mineralización de la MO.

De los resultados obtenidos, el pH no tuvo una variación significativa, considerando que en valores cercanos a 7 se espera un crecimiento favorable de especies animales o vegetales. Respecto a la humedad, como medio de transporte de sustancias y nutrientes, se disminuyó a medida que pasó el tiempo de compostaje, considerando la obtenida como modificable en los procesos unitarios realizados. La relación C/N indicó madurez y estabilidad de la MO en el compost resultante, revelando la calidad de la lombriz en estos procesos, estabilizando dichos componentes y proporcionando las características deseadas por el humus final.

Comparado el humus resultante con uno comercial se evidenció su calidad, el cual podría ser empleado sin complicaciones normativas; pero, debe tenerse en cuenta la concentración de metales pesados, ya que por su toxicidad y bio-acumulación en los organismos podría afectar el suelo.

Para futuros estudios se recomienda analizar los efectos fisiológicos que tiene el biosólido sobre las lombrices *Eisenia foetida*, específicamente respecto a los metales pesados, en el ciclo de vida de estos individuos, con el fin de dar un aprovechamiento.

Agradecimientos

La investigación avanzada es un producto derivado en el desarrollo del proyecto de Investigación de alto Impacto IMP ING 2289 “Procesos de lodos activados con aireación extendida para sedimentos de lixiviados del relleno sanitario Doña Juana – Bogotá; complementado con técnica

de vermicompostaje” Financiado por la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada Vigencia 2017-2018.

Referencias

- Acosta Carrión, W., y Peralta Franco M. I. (2015). *Elaboración de abonos orgánicos a partir del compostaje de residuos agrícolas en el municipio de Fusagasugá* (Tesis doctoral). Universidad de Cundinamarca, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Fusagasugá, Colombia.
- Aguacol. (2008). *Diseño definitivo de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales domesticas para la Universidad Militar Nueva Granada - Sede Cajicá*. Bogotá.
- Castro, A., Henríquez Henríquez, C., y Bertsch Hernández, F. (2008). Capacidad de suministro de N, P y K de cuatro abonos orgánicos. *Agronomía Costarricense*, 33(1).
- Fernández Gómez, M. J. (2011). *Aplicación de la tecnología del vermicompostaje para la valorización agronómica de residuos y destríos de cultivos de invernadero*. (Tesis doctoral). Universidad de Granada - Instituto de Biotecnología, Granada, España.
- Fondo para la Protección del Agua-FONAG. (2010). *Abonos orgánicos Protegen el suelo y garantizan alimentación sana Manual para elaborar y aplicar abonos y plaguicidas orgánicos*. Recuperado de http://www.fonag.org.ec/doc_pdf/abonos_organicos.pdf
- Gaind, S. (2014). Effect of fungal consortium and animal manure amendments on phosphorus fractions of paddy-straw compost. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 94, 90-97. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.06.023>
- Hernández-Rodríguez, O. A., Ojeda-Barrios, D. L., López-Díaz, J. C., y Arras-Vota, A. M. (2010). Abonos orgánicos y su efecto en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. *Tecnocienc. Chihuahua*, 4, 1-6.

- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC. (2004). NTC 5167: *Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo* (pág. 43).
- Jian, Y., Baoyi, L., Jie, Z., & Meiyang, X. (2014). Insight into the roles of earthworm in vermicomposting of sewage sludge by determining the water-extracts through chemical and spectroscopic methods. *Bioresource Technology*, 94-100.
- Martínez, N. M. J. (2015). La gestión integral de residuos sólidos urbanos en México: entre la intención y la realidad. *Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, (17), 29-56. doi: <https://doi.org/10.17141/letrasverdes.17.2015.1419>
- Motta, L. A., y Pinzón, A. P. (2011). *Evaluación de la viabilidad financiera del aprovechamiento de los residuos orgánicos producidos en Centroabastos S.A. para la generación de energía y compostaje para la empresa Incom Ltda* (Tesis especialización). Universidad de la Sabana, Bucaramanga, Colombia.
- Muñoz, J. (2005). *Compostaje en Pescador, Cauca: tecnología apropiada para el manejo de residuos orgánicos y su contribución a la solución de problemas medioambientales* (Trabajo de grado para título de Ingeniero Ambiental). Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia.
- Ndegwa, P. M., y Thompson, S. (2000). Effects of C-to-N ratio on vermicomposting of biosolids. *Bioresource Technology*, 75(1), 7-12. doi: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00038-9](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00038-9)
- Peñarete Murcia, W., Silva Leal, J., Daza Torres, M., Torres Lozada, P., y Urrutia Cobo, N. (2013). Efecto de aplicación de biosólidos sobre las propiedades físicas de un suelo cultivado con caña de azúcar. *Acta Agronómica*, 62(3), 251-260. Recuperado de https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/33237
- Román, P., Martínez, M., y Pantoja, A. (2013). *Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Oficina Regional para América Latina y el Caribe.
- Sinha, R. K., Herat, S., Bharambe, G., y Brahambhatt, A. (2010). Vermistabilization of sewage sludge (biosolids) by earthworms: converting a potential biohazard destined for landfill disposal into a pathogen-free, nutritive and safe biofertilizer for farms. *Waste Management & Research*, 28(10), 872-881. doi: <https://doi.org/10.1177/0734242X09342147>
- Yang, J., Lv, B., Zhang, J., y Xing, M. (2014). Insight into the roles of earthworm in vermicomposting of sewage sludge by determining the water-extracts through chemical and spectroscopic methods. *Bioresource technology*, 154, 94-100. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.023>