

Deshidratación de los lodos en lecho de secado y su influencia sobre la actividad biológica de los microorganismos

Dehydration of Sludges in Drying Bed and Influence on the Biological Activity of Microorganisms

José Castellanos-Rozo^{a, e}, Nuri Andrea Merchán^b,
Jaqueline Galvis^c, Elsa Helena Manjarres^{d,*}

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de la deshidratación de los lodos en lecho de secado sobre las características fisicoquímicas de estos subproductos y la actividad biológica de los microorganismos. Se determinó que después de cinco meses de secado disminuyó la concentración de carbono orgánico, los metales pesados se mantuvieron por debajo del límite permisible y el nitrógeno y fósforo total se mantuvieron constantes. Se evidenció disminución de los aerobios mesófilos, hongos y amilolíticos de siete, seis y una unidad logarítmica de UFC/g respectivamente. La presencia de microorganismos funcionales celulolíticos y solubilizadores de fosfato fue <10 UFC/g. Por otro lado, el 3 % ($n=8040$) de las cepas evaluadas, fueron productoras de PHA en por lo menos una de las fuentes de carbono evaluadas (sacarosa o glucosa). Los resultados demuestran que el tratamiento de deshidratación en lecho de secado permitió conservar las características fisicoquímicas de los lodos, no obstante, disminuyó la actividad biológica de los microorganismos aerobios mesófilos, amilolíticos y hongos, celulolíticos, solubilizadores de fosfato.

PALABRAS CLAVE: lodos estabilizados; carbono orgánico; nitrógeno; solubilizadores de fosfatos; celulolíticos; polihidroxialcanoatos.

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the effect of sludge dehydration on the physicochemical characteristics of these by-products and the biological activity of microorganisms. It was determined that after five months of drying, the organic carbon concentration decreased, metals remained below the permissible limit and nitrogen and total phosphorus remained constant. The decrease in mesophilic, fungal and amylolytic aerobes of seven, six and one logistic units of CFU/g was evidenced, respectively. The presence of cellulolytic microorganisms and phosphate solubilizers was <10 CFU/g. On the other hand, 3% ($n=8040$) of the evaluated strains were producers of PHA in at least one of the assessed carbon sources (sucrose or glucose). Results show that the dehydration process in drying bed allowed maintaining the sludge's physicochemical characteristics; however, the biological activity of aerobic mesophilic, amylolytic and fungal microorganisms, cellulolytic, phosphate solubilizers and producers of PHAs diminished.

KEYWORDS: stabilized sludge; organic carbon; nitrogen; phosphate solubilizers; cellulolytic; polyhydroxyalkanoates.

a Universidad de Boyacá, Departamento de Biología y Microbiología. Tunja, Colombia. ORCID Castellanos-Rozo, J.: 0000-0001-7497-5917

b Universidad de Boyacá, Programa de Bacteriología y Laboratorio Clínico. Tunja, Colombia. ORCID: 0000-0001-5885-850X

c Universidad de Boyacá, Departamento de Química y Bioquímica. Tunja, Colombia. ORCID: 0000-0003-4318-3188

d Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Escuela de Ciencias Biológicas. Tunja, Colombia. Manjarres, E.H.: 0000-0001-6221-8636

e Autor de correspondencia: joscastellanos@uniboyaca.edu.co

* Las contribuciones en el artículo se realizaron en el año 2017 cuando se tenía un vínculo laboral con la Universidad de Boyacá.

Recepción: 31 de septiembre de 2018. Aceptación: 15 de diciembre de 2018

Introducción

Los lodos son residuos orgánicos semisólidos resultado del tratamiento de aguas residuales. En Colombia, se reporta una producción de 274 toneladas de lodos por día provenientes de las principales plantas de tratamiento de aguas residuales de país, sin contar con los producidos por las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (Bedoya-Urrego et al., 2013). Los lodos sin estabilizar, generan riesgos potenciales para la salud pública y el medio ambiente, debido a la concentración de metales pesados, microorganismos patógenos e insectos que transmiten enfermedades (EPA, 2003). Hasta el momento, la estabilización de los lodos constituye los mayores costos del tratamiento de aguas residuales (Anjum et al., 2016; Keffala et al. 2013). A nivel mundial, se han implementado algunos métodos de estabilización, entre lo que se encuentran deshidratación por centrifugación, (Bedoya-Urrego et al., 2013), compostaje (Awasthi et al., 2018), alcalinización (Husillos et al., 2012; Torres et al., 2009), secado térmico (Silva-Leal et al., 2013) y deshidratación en lechos de secado (Pompeo et al., 2016; Santos et al., 2017; Shanahan et al., 2010; Cota-Espericueta y Ponce-Corral, 2008). La estabilización por deshidratación en lecho de secado es un proceso natural donde el lodo se coloca en compartimientos rectangulares de poca profundidad con fondos porosos, lo cual permite junto con la incidencia de la luz solar y el viento, la deshidratación y desinfección del lodo. Las ventajas de este método con respecto a los demás, es el bajo nivel de inversión, simplicidad operacional, limitado consumo de energía y la no adición de productos químicos (Pompeo et al., 2016). Los lodos al estabilizarse, pueden convertirse en la solución a los problemas de fertilización y restauración de suelos erosionados o degradados, ya que sus propiedades fisicoquímicas y microbiológicas podrían mejorar su calidad (Arévalo y Castellano, 2009). Hasta el momento, a nivel mundial se han hecho grandes esfuerzos por determinar como la deshidratación en lecho de secado afecta a los microorganismos patógenos (Onofre et al., 2017; Santos et al., 2017; Pompeo et al., 2016). Sin embargo, no se han reportado estudios donde se evalúe el efecto que tiene la deshidratación en lecho de secado sobre los microorganismos que presentan actividad

biológica, los cuales juegan un papel importante en el flujo de energía, la transformación y el ciclaje de nutrientes en el ambiente. Sus actividades ayudan a la formación del humus, la conservación de la estructura del suelo, la biorremediación de contaminantes, y la disponibilidad de nutrientes entre otras funciones (Andrade, 2008). Lo que demuestra que una gran abundancia, actividad y/o diversidad de estos microorganismos, influyen directamente sobre la fertilidad y productividad de los suelos (Hoffman et al., 2003). Uno de los enfoques usados para estudiar la calidad de los suelos y/o lodos, es medir funciones microbianas tales como las transformaciones específicas de carbono, nitrógeno y fósforo, puesto que afectan directamente la disponibilidad de nutrientes y por ende su calidad (Pedraza et al., 2010). Dentro de los microorganismos que presentan actividad biológica se encuentran bacterias y hongos celulolíticos, amilolíticos, proteolíticos, solubilizadores de fosfato, fijadores de nitrógeno (Beltrán et al., 2017). También ayudan al ciclaje de nutrientes, las bacterias productoras de polihidroxialcanoatos. Los polihidroxialcanoatos (PHAs) son polímeros con características similares a los plásticos sintéticos que tienen un amplio rango de aplicaciones en la industria, la agricultura y la medicina, son biodegradables, insolubles en agua, no tóxicos y exhiben propiedades termoplásticas (Blunt et al., 2018). En Colombia se han desarrollado algunos trabajos que implican la búsqueda de microorganismos productores de PHAs en diferentes ambientes (Otero y Fernández, 2013; Sánchez et al., 2012). Sin embargo, trabajos relacionados con el aislamiento de microorganismos productores de PHAs a partir de lodos han sido muy pocos (Arroyave et al., 2013). Este trabajo busca proporcionar información sobre el efecto de la deshidratación de los lodos en lecho de secado sobre las características fisicoquímicas de estos subproductos y la actividad biológica de los microorganismos.

Materiales y métodos

Área de estudio y muestreo

La zona de estudio se encuentra situada en la región centro oriente de Colombia, en el departamento

de Boyacá, municipio de Sotaquirá, en la planta de tratamiento de aguas residuales, localizada en las coordenadas 5°45'54"N, 73°14'53"W a 2.860 m. El primer muestreo se tomó inmediatamente después de que la válvula fue abierta para evacuar los lodos provenientes del tanque IM-HOFF sobre el lecho de secado. El lecho de secado consistió en una estructura compuesta por un compartimiento rectangular que tiene un área de 5,5 m². El lodo se aplicó sobre el lecho en una capa de 20 cm; sin volver a abrir la válvula durante los cinco meses de estudio. Los lodos descargados en el lecho de secado estuvieron expuestos a los rayos solares y protegidos de la lluvia con tejas transparentes durante todo el periodo de muestreo. Los siguientes cinco muestreos se realizaron mensualmente tomando muestras integradas de 1 kg del lecho de secado mediante el método de zigzag (USDA, 1999). Las muestras fueron recolectadas en bolsas herméticas con cierres deslizables y almacenadas a 4°C por 48 h antes de su procesamiento.

Condiciones meteorológicas de la zona de estudio

Se tomaron los datos meteorológicos de temperatura, humedad relativa, brillo solar y evaporación, de tres estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio (Duitama, Paipa y Tunja) desde el mes uno hasta el mes cinco. Posteriormente se realizó una interpolación de datos por medio del software ArcGIS 10.1. (Esri, 2013).

Análisis fisicoquímico

A las muestras de lodo recolectadas durante los cinco meses, se les practicaron los siguientes análisis: arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg), níquel (Ni) y plomo (Pb) (APHA et al., 2012), materia orgánica según la Norma Técnica Colombiana 5403 (ICONTEC, 2013), fósforo total extraíble (Bray y Kurtz, 1945), nitrógeno orgánico por el método Kjeldahl (TC WI, 2003), pH por el método electrométrico 2:5 a 25°C (EPA, 2004), humedad por el método gravimétrico y conductividad por el método electrométrico 1:5 a 25°C (APHA et al., 2012).

Análisis microbiológico

Se pesaron 10 g de lodo y se agregaron en 90 mL de NaCl al 0,85% estéril, a partir de esta solución, se realizaron diluciones seriadas y recuento en placa de células viables. Las bacterias aerobias mesófilas fueron determinados en agar Standard Plate Count (SPC), los hongos en PDA suplementado con 30 mg L⁻¹ de cloranfenicol (Beltrán y Castellanos-Rozo, 2016), los microorganismos amilolíticos en agar almidón (Rodríguez et al., 2006), los microorganismos celulolíticos en agar carboximetilcelulosa (CMC) según la metodología descrita por Samira et al. (2011) y los solubilizadores de fosfato en agar NBRIP (Nautiyal, 1999). Todos los análisis se realizaron por triplicado. El aislamiento de los microorganismos productores de PHA se llevó a cabo a partir de los aerobios mesófilos. Las colonias crecidas fueron repicadas en medio mínimo de sales minerales (MM) cuya composición fue la siguiente (g L⁻¹): 1 (NH₄)₂SO₄, 3,5 Na₂HPO₄, 1,5 KH₂PO₄, 0,2 MgSO₄·7H₂O, 0,01 CaCl₂·2H₂O, 0,06 C₆H₁₁FeNO₇. Solución de elementos trazas: 0,3 H₃BO₃, 0,2 CoCl₂·6H₂O, 0,1 ZnSO₄·7H₂O, 0,03 MnCl₂·4H₂O, 0,03 NaMoO₄·2H₂O, 0,02 NiCl₂·6H₂O, 0,01 CuSO₄·5H₂O, glucosa y sacarosa como fuentes de carbono. El crecimiento de las colonias se realizó en medio mínimo con 1 g L⁻¹ de glucosa (MMG) y medio mínimo con 1 g L⁻¹ de sacarosa (MMS), incubadas a 35°C por 24 h. Posteriormente, para promover el acúmulo de PHA las colonias fueron repicadas en medio mínimo con 15 g L⁻¹ de glucosa (MMG15) y medio mínimo con 15 g L⁻¹ de sacarosa (MMS15), se incubaron a 35°C por 5 d, transcurrido el tiempo de incubación las colonias fueron inspeccionadas visualmente y teñidas con Sudan Black B (0,02%) en etanol. Se identificaron como positivas las colonias que presentaron coloración azul oscuro (Merchán, 2010).

Resultados

Condiciones meteorológicas de la zona de estudio

Se observó que la temperatura promedio en Sotaquirá durante el estudio fue de 13,5°C, la cual varió

entre 7 y 20°C. De otro lado, se determinó que la humedad relativa varió en el orden de 66 y 85%. Con respecto a la evaporación, el valor mínimo mensual fue de 125 mm y el valor máximo fue de 140 mm. De otro lado, los rangos de brillo solar variaron entre 120 y 210 h (Figura 1).

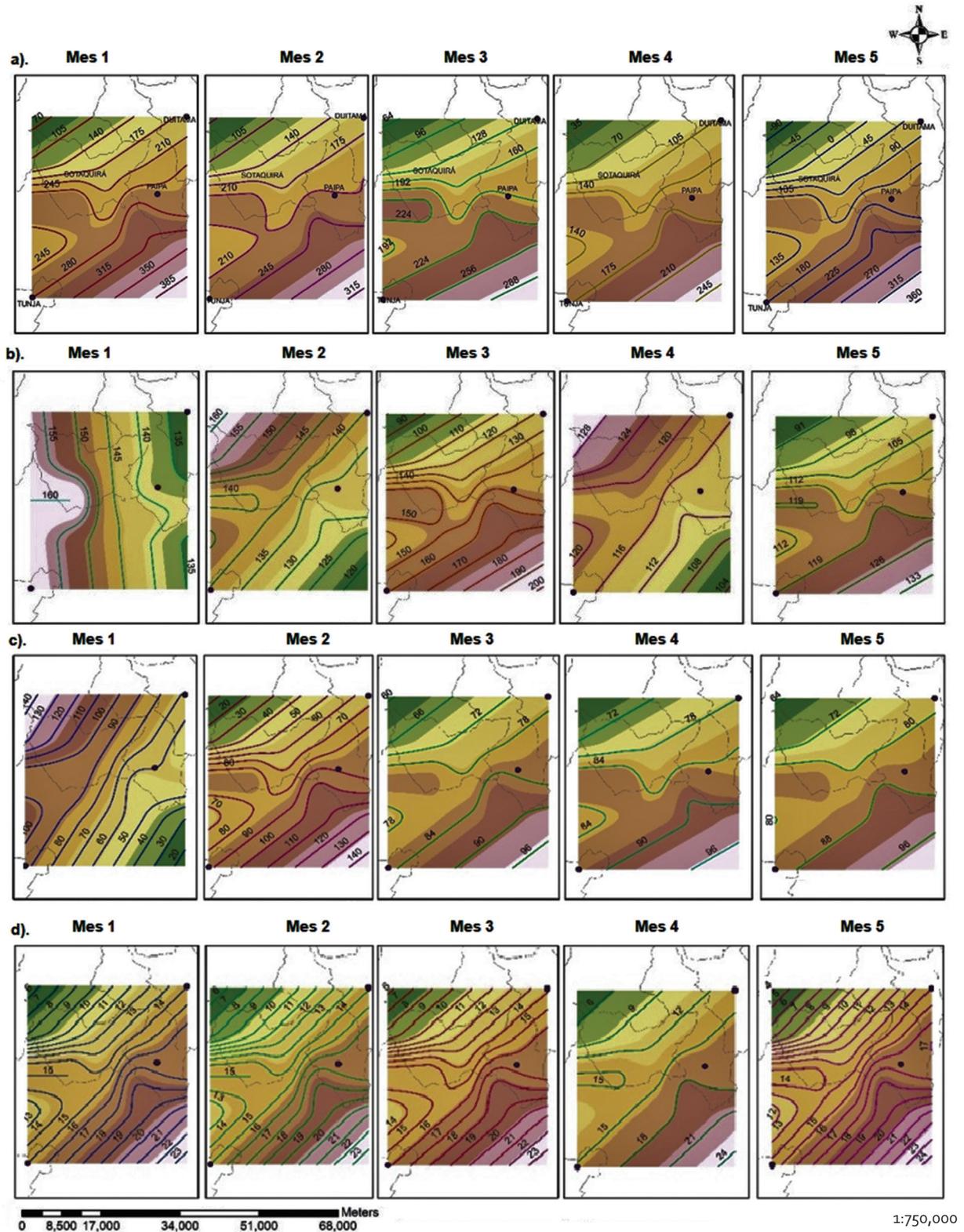


Figura 1. Condiciones meteorológicas en el Municipio de Sotaquirá. a). Valores máximos de brillo solar (horas). b). Valores máximos de evaporación. c). Valores máximos de humedad relativa. d). Valores máximos de temperatura

Análisis fisicoquímico de los lodos

El tratamiento de deshidratación natural en lecho de secado durante cinco meses, disminuyó la concentración de materia orgánica de 440,64 a 373 g kg⁻¹, pero se mantuvo las concentraciones de fósforo y nitrógeno total (Tabla 1).

Por otra parte, la concentración de metales pesados durante el tratamiento de secado fueron (mg kg⁻¹ en base seca): arsénico (As) <15,0, cadmio (Cd) <0,7, cromo (Cr) <70,0, mercurio (Hg) <1,0, níquel (Ni) <25,0 y plomo (Pb) <140. Los lodos presentaron una capacidad de intercambio catiónico superior a 30 cmol₍₊₎ kg⁻¹ y conductividad eléctrica menor a 1000 μs cm⁻¹.

Análisis microbiológico de los lodos

Los lodos presentaron recuentos iniciales de 13.59 log UFC/g para aerobios mesófilos y 12.34 log UFC/g para hongos. Durante el tratamiento de secado se evidenciaron cambios significativos

en estas poblaciones, las cuales disminuyeron seis unidades logarítmicas en aerobios mesófilos y siete en hongos. En cuanto a las poblaciones de microorganismos en los lodos, los resultados indicaron un recuento inicial de microorganismos amilolíticos de 4.0 log UFC/g, los cuales disminuyeron una unidad logarítmica durante el tratamiento de secado. No obstante, los recuentos de microorganismos celulolíticos y solubilizadores de fosfato fueron de 1 log UFC/g durante todo el tratamiento (Figura 2).

De otro lado, se realizaron 8040 aislamientos de microorganismos aerobios mesófilos, de los cuales el 3% fueron productores de PHAs en MMG y el 1% fueron productores de PHAs en MMS (Figura 3).

Discusión

La degradación de la materia orgánica depende de las características fisicoquímicas y microbiológicas presentes en el agua no tratada y del tipo de

Tabla 1. Contenido nutricional de los lodos deshidratados en lecho de secado

Mes	C orgánico*	P total *	N total*	pH	Conductividad (μs cm ⁻¹)	Humedad (%)
0	440,64	51,0	27,44	5,5	889,4	97
1	408,87	50,0	26,46	7,01	744,0	36
2	447,66	47,0	24,64	6,87	877,6	10
3	389,78	48,0	23,80	6,69	987,7	12
4	396,56	49,0	29,40	6,88	958,7	12
5	373,73	51,0	20,30	6,5	631,3	6

*Los resultados son el promedio de tres réplicas y están expresados en g kg⁻¹

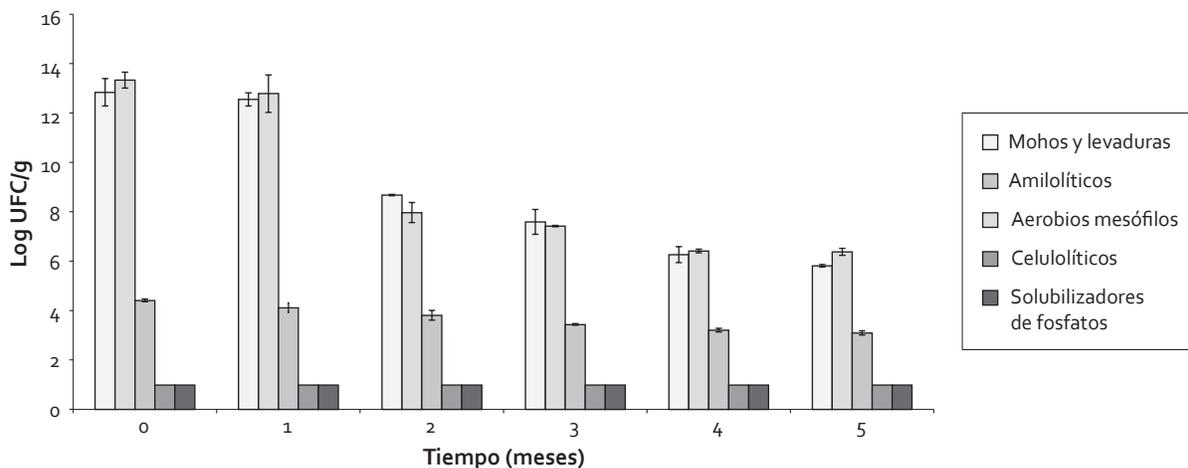


Figura 2. Recuentos de grupos de microorganismos funcionales en los lodos deshidratados en lecho de secado. Los resultados son el promedio de tres réplicas. Las barras indican la desviación estándar

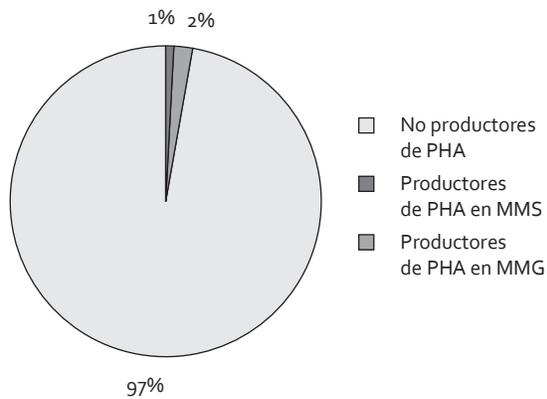


Figura 3. Porcentaje de bacterias productoras de PHA en medio MMS y MMG

unidades operacionales empleadas en la planta de tratamiento (Ruffino et al., 2015). Con relación a estas características, el lodo presentó inicialmente una gran cantidad de carbono orgánico (440 g kg^{-1}), pero a medida que el tiempo de secado fue transcurriendo, la concentración de carbono orgánico disminuyó 15,2%, aunque las concentraciones de fósforo y nitrógeno total no disminuyeron significativamente. Este comportamiento también fue observado por Santos et al. (2017), quienes, al someter el lodo a un proceso de deshidratación en lecho de secado durante 90 d, obtuvieron una disminución de carbono orgánico de 57%, sin embargo, el tratamiento no disminuyó la concentración de fósforo y nitrógeno total. Estudios han mostrado que el clima afecta el contenido total de nitrógeno en los suelos, en el área de estudio se presentaron cambios abruptos de temperatura; frío intenso durante la noche y un aumento de temperatura de hasta 10°C durante el día, las temperaturas bajas por su parte disminuye la actividad de los microorganismos y por lo tanto la velocidad de la descomposición de los restos y la materia orgánica también baja, haciendo que las concentraciones de este elemento se mantengan constantes.

A pesar de la disminución en el contenido de carbono orgánico, la concentración de este elemento continuó elevada, además los lodos presentaron una capacidad de intercambio catiónico superior a $30 \text{ cmol}_{(+) } \text{ kg}^{-1}$, conductividad eléctrica menor a $1000 \mu\text{s cm}^{-1}$ y metales pesados por debajo de los límites máximos permisibles según decreto 2017 del 2014. Estas características lo clasifican como

biosólido categoría B (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2014) y podría ser utilizado como enmienda orgánica no húmica para la restauración de suelos degradados según la Norma Técnica Colombiana 2167 (ICONTEC, 2011). Según Julca-Otiniano et al. (2006), la aplicación de lodos deshidratados con altas concentraciones de materia orgánica, fósforo y nitrógeno, aumenta el intercambio catiónico y favorece la asimilación de nutrientes por parte de las plantas y de la mesofauna. La aplicación de los lodos estabilizados podría mejorar la estructura y textura de los suelos, porque el contenido de materia orgánica afecta las propiedades edáficas dando porosidad a los suelos arcillosos y disgregando los suelos arenosos (Arévalo y Castellano, 2009).

Por otra parte, se observó un recuento elevado de las poblaciones microbianas al inicio del estudio, las cuales se vieron afectadas por el tratamiento de deshidratación natural en lecho de secado. Los recuentos de aerobios mesófilos mostraron un descenso al final del tratamiento de siete unidades logarítmicas, comportamiento similar al presentado por mohos y levaduras (Figura 2). La reducción en los recuentos de las poblaciones microbianas, podría ser resultante de la pérdida de humedad a lo largo del tratamiento, la cual disminuyó de 97% al 6% (Tabla 1). Esta variable es relevante en la sobrevivencia de los microorganismos, según Julca-Otiniano et al. (2006), el contenido de humedad influye en la actividad de la población microbiana de los lodos, a medida que se va secando, disminuye la disponibilidad del agua y como consecuencia la actividad enzimática y las relaciones osmóticas de las células. Esta disminución microbiana fue corroborada por Cota-Espericueta y Ponce-Corral (2008) en México, quienes determinaron la eficiencia de un dispositivo solar para la eliminación de microorganismos patógenos. En estos estudios variables como temperatura, pH y humedad, fueron determinantes para la eliminación de patógenos, siendo la humedad el principal factor. Sumado a lo anterior, la radiación ultravioleta también afecta la sobrevivencia de los microorganismos, debido a que impide que se replique su ADN (Falguera et al., 2011).

A pesar de la disminución en las poblaciones de aerobios mesófilos y de hongos, fue evidente la sobrevivencia de un número elevado al final del estudio. Esto debido a que los hongos y las bacterias disponen de diversos métodos para sobrevivir en condiciones ambientales adversas, como la composición de sus paredes celulares, la formación de esporas y esclerocios en el caso de los hongos y de endosporas y cápsulas en el caso de las bacterias (Madigan et al., 2015; Anjum et al., 2016). La presencia de poblaciones altas de hongos en el lodo es muy importante, porque ayudan a la descomposición de la materia orgánica y a la fertilidad de los suelos (Stone et al., 2016).

En este estudio se determinaron las poblaciones de microorganismos con actividad biológica en los lodos. Los resultados indicaron recuentos de microorganismos amilolíticos que fueron disminuyendo durante el tratamiento de secado (Figura 2). No obstante, los recuentos de microorganismos celulolíticos y solubilizadores de fosfato fueron de 1 log UFC/g durante todo el tratamiento. Las bajas poblaciones de grupos funcionales de microorganismos puede estar relacionada con la formación de subproductos tóxicos (compuestos heterocíclicos complejos) o no deseables como ácidos grasos volátiles como butírico, propiónico y valérico, además de otros metabolitos como ácido acético, amonio, sulfitos y sulfatos (Yuan y Zhu 2016; Semblante et al., 2015).

A nivel mundial, se han desarrollado varios trabajos que implican la búsqueda de microorganismos productores de PHAs en diferentes ambientes (Flores et al., 2018). Sin embargo, trabajos relacionados con el aislamiento de microorganismos productores de PHAs a partir de lodos, han sido realizados muy pocos. En el presente estudio se realizaron 8040 aislamientos, de los cuales el 2% (160) fueron productores de PHAs en MMG y el 1% (80) fueron productores de PHAs en MMS (Figura 3). Bacterias aisladas en estos ambientes han sido reportadas por Liu et al. (2000), quienes identificaron dos cepas productoras de PHA (LphaS y Lpha7) a partir de lodos provenientes de un sistema anaerobio alimentado con acetato. Estudios realizados por Arroyave et al. (2013), identificaron 5 cepas (LM-3D,

LAR-4D, LAR-5B, LAR-5E LM-3F) potencialmente productoras de PHA a partir de lodos de la PTAR de San Fernando.

A si mismo Inoue et al. (2016), aislaron un total de 114 cepas bacterianas de cuatro muestras de lodos activados de dos plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. El 68% del total de los aislamientos eran capaces de producir PHA, a partir de al menos uno de los seis sustratos utilizados (acetato, propionato, lactato, butirato, glucosa y glicerol). Los resultados indicaron que los ácidos grasos de cadena corta serían los sustratos preferidos para la producción de PHA por estas bacterias. La mayoría de las cepas no fueron capaces de producir PHA a partir de glucosa.

Un menor número de bacterias productoras de PHA fue reportado por Vishnuvardhan et al. (2008), en donde se obtuvieron 105 aislamientos productores de PHA en medio mineral con glucosa al 2% como fuente de carbono bajo condiciones limitadas de nitrógeno.

De acuerdo a lo anterior, se recomienda seguir con este estudio, evaluar y caracterizar la producción de PHA cuantitativamente de los polímeros producidos, realizar la caracterización molecular de los aislamientos con el fin de saber cuáles de estas cepas son patógenas o son nuevas especies reportadas productoras de PHAs.

Conclusión

El tratamiento de deshidratación en lecho de secado durante los cinco meses permitió conservar las características fisicoquímicas de los lodos, no obstante, disminuyó los recuentos de microorganismos que presentan actividad biológica como los aerobios mesófilos, amilolíticos y hongos. De otro lado, no se encontraron altos recuentos de microorganismos celulolíticos y solubilizadores de fosfato durante el tiempo de secado. Los lodos sometidos a procesos de deshidratación en lecho de secado constituyen una alternativa para realizar bioprospección de microorganismos con actividades biológicas deseables de interés industrial, ambiental y agrícola como la producción de PHAs, que hasta la fecha ha sido poco explorada.

Agradecimientos. Esta investigación fue financiada por la Universidad de Boyacá a través del proyecto "Estudio de los biosólidos producidos por la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Soaquirá, Boyacá", Resolución 189A/2015.

Conflicto de intereses. El manuscrito fue preparado y revisado por los autores, quienes declaran no tener algún conflicto de interés que ponga en riesgo la validez de los resultados aquí presentados.

Contribuciones de autoría. Los muestreos fueron realizados por todos los autores. Los análisis físico-químicos de los lodos durante el tiempo de secado fueron realizados por Galvis, J. y Manjarres, E.H. Los análisis microbiológicos de los lodos durante el tiempo de secado fueron realizados por Merchán, N.A. y Castellanos-Rozo, J. Todos los autores contribuyeron en el análisis de los resultados y a la construcción del manuscrito.

Referencias bibliográficas

- American Public Health Association (APHA); American Water Works Association (AWWA); Water Environment Federation (WEF), 2012. Standard methods for the examination of water and wastewater. 22th ed. APHA, AWWA, WEF, Washington DC.
- Andrade, G., 2008. Role of functional groups of microorganisms on the rhizosphere microcosm dynamics. En: Varma, A., Abbott, L., Werner, D., Hampp, R. (Eds.), Plant surface microbiology. Springer, Berlin. DOI: 10.1007/978-3-540-74051-3_4
- Anjum, M., Al-Makishaha, N., Barakat, M., 2016. Wastewater sludge stabilization using pre-treatment methods. *Process Saf. Environ. Protect.* 102, 615-632. DOI: 10.1016/j.psep.2016.05.022
- Arévalo de Guggel, G., Castellano, M., 2009. Manual fertilizantes y enmiendas. El Escuela agrícola Panamericana; Zamorano, Tegucigalpa.
- Arroyave, A., Cardona, M., Agudelo, L., 2013. Identificación de cepas nativas con potencial para obtención de polihidroxialcanoatos (PHAS) en lodos activados. *Rev. Bio. Agro.* 11, 69-76.
- Awasthi, M.K., Wang, Q., Chen, H., Awasthi, S.K., Wang, M., Ren, X., Zhao, J., Zhang, Z., 2018. Beneficial effect of mixture of additives amendment on enzymatic activities, organic matter degradation and humification during biosolids co-composting. *Biores. Technol.* 247, 138-146. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.09.061
- Bedoya-Urrego, K., Acevedo-Ruiz, J., Peláez-Jaramillo, C., Agudelo-López, S., 2013. Caracterización de biosólidos generados en la planta de tratamiento de agua residual San Fernando, Itagüí (Antioquia, Colombia). *Rev. Salud Pública* 15, 778-790.
- Beltrán, M., Castellanos-Rozo, J., 2016. Manual de microbiología ambiental. Ediciones Universidad de Boyacá, Tunja, Colombia.
- Beltrán, M., Rocha, Z., Bernal, A., Pita, L., 2017. Microorganismos funcionales en suelos con y sin revegetalización en el municipio de Villa de Leyva, Boyacá. *Colomb. For.* 20, 158-170. DOI: 10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2017.2.a05
- Blunt, W., Sparling, R., Gapes, D., Levin, D., Cicek, N., 2018. The role of dissolved oxygen content as a modulator of microbial polyhydroxyalkanoate synthesis, *World J. Microbiol. Biotechnol.* 34, 106. DOI: 10.1007/s11274-018-2488-6
- Bray, R., Kurtz, L., 1945. Determination of total organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59, 39-45. DOI: 10.1097/00010694-194501000-00006
- Cota-Espericueta, A., Ponce-Corral, C. 2008. Eliminación de bacterias patógenas en lodos residuales durante el secado solar. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 24, 161-170.
- Environmental Protection Agency United States (EPA), 2003. Environmental Regulations and Technology. Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge. Washington, DC.
- Environmental Protection Agency United States (EPA), 2004. Method 9045 D, soil and waste pH. Washington, DC.
- Esri, 2013. Ayuda de ArcGIS 10.1 Disponible en: <http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/index.html#//00q90000001r000000>; consultado: ctubre de 2018.
- Falguera, V., Pagán, J., Garza, S., Garvín, A., Ibarz, A., 2011. Ultraviolet processing of liquid food: A review. Part 2: Effects on microorganisms and on food components and properties. *Food Res. Int.* 44, 1580-1588. DOI: 10.1016/j.foodres.2011.03.025
- Flores, A., Idrogo, E., Carreño C., 2018. Rendimiento de polihidroxialcanoatos (PHA) en microorganismos halófilos aislados de salinas. *Rev. Per. Biol.* 25, 153-160. DOI: 10.15381/rpb.v25i2.14249
- Hoffman, J., Bezchlebová, L., Dusek, L., Dolezal, I., Holoubek, P., Ansorgová, A., Maly, S., 2003. Novel approach to monitoring of the soil biological quality. *Environ. Int.* 28, 771-778. DOI: 10.1016/S0160-4120(02)00068-5
- Husillos, N., Granados, R., Blanco-Varela, M., Cortina, J., Martínez-Ramírez, S., Marsal, M., Guillem, M., Puig, J., Fos, C., Larrotcha, E., Flores, J., 2012. Evaluation of a lime-mediated sewage sludge stabilisation process. Product characterisation and technological validation for its use in the cement industry. *Waste Manage.* 32, 550-560. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.10.021

- ICONTEC, 2011. NTC 5167, productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo. Bogotá.
- ICONTEC, 2013. NTC 5403, calidad de suelo. Determinación del carbono orgánico. Bogotá.
- Inoue, D., Suzuki, Y., Uchida, T., Morohoshi, J., Sei, K., 2016. Polyhydroxyalkanoate production potential of heterotrophic bacteria in activated sludge. *J. Biosci. Bioeng.* 121, 47-51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2015.04.022>
- Julca-Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Blas-Sevillano, R., Bello-Amez, S., 2006. La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *Idesia*, 24, 49-61. DOI: 10.4067/S0718-34292006000100009
- Keffala, C., Harerimana, C, Vasel, J., 2013. A review of the sustainable value and disposal techniques, wastewater stabilisation ponds sludge characteristics and accumulation. *Environ. Monit. Assess.* 185, 45-58. DOI: 10.1007/s10661-012-2532-1
- Liu, W., Mino, T., Matsuo, T., Nakamura, K., 2000. Isolation, characterization and identification of polyhydroxyalkanoate-accumulating bacteria from activated sludge. *J. Biosci. Bioeng.* 90, 494-500. DOI: 10.1016/S1389-1723(01)80029-3
- Madigan, M., Martinko, J., Bender, K., Buckley, D., Stahl, D., 2015. Brock biology of microorganisms. 14a ed. Pearson Education, Boston, MA. DOI: 10.1007/s13398-014-0173-7.2
- Merchán, N., 2010. Avaliação do sistema de mobilização de poli-3-hidroxibutirato em *Burkholderia sacchari*. Tesis de doctorado. Interunidades em Biotecnologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2014. Decreto 1287, criterios para el uso de biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Diario Oficial 49208. Bogotá.
- Nautiyal, C., 1999. An efficient microbiological growth medium for screening phosphate-solubilizing microorganisms. *FEMS Microbiol. Lett.* 170, 265-270. DOI: 10.1111/j.1574-6968.1999.tb13383.x
- Onofre, S., Bertoldo, I., Abatti, D., Refosco, D., Agustini, D., 2017. Physico-chemical and microbiological properties of the sewage sludge produced by the sewage treatment plant (STP) of Toledo - Paraná - Brazil. *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.* 6, 2420-2429. DOI: 10.20546/ijcmas.2017.603.276
- Otero, I., Fernández, P., 2013. Bioprospección de bacterias productoras de Polihidroxialcanoatos (PHA's) en el Departamento de Nariño. *Rev. Bio. Agro.* 11, 12-20.
- Pedraza, R., Teixeira, K., Scavino, A., De Salamone, I., Baca, B., Azcón, R., Baldani, V., Bonilla, R., 2010. Microorganismos que mejoran el crecimiento de las plantas y la calidad de los suelos. *Corpoica Cienc. Tecnol. Agropecu.* 11, 155-164. 10.21930/rcta.vol11_num2_art:206
- Pompeo, R., Andreoli, C., de Castro, E., Aisse M., 2016. Influence of long-term storage operating conditions on the reduction of viable ascaris eggs in sewage sludge for agricultural reuse. *Water Air Soil Pollut.* 227, 144. DOI: 10.1007/s11270-016-2816-0
- Rodríguez, Z., Boucourt, R., Rodríguez, J., Albelo, N., Nuñez, O., Herrera, F., 2006. Aislamiento y selección de microorganismos con capacidad de degradar el almidón. *Rev. Cuba. Cienc. Agríc.* 40, 349-354.
- Ruffino, B., Campo, G., Genon, G., Lorenzi, E., Novarino, D., Scibilia, G., Zanetti, M., 2015. Improvement of anaerobic digestion of sewage sludge in a wastewater treatment plant by means of mechanical and thermal pre-treatments: Performance, energy and economical assessment. *Biores. Technol.* 175, 298-308. 10.1016/j.biortech.2014.10.071
- Samira, M., Mohammad, R., Gholamreza, G., 2011. Carboxymethyl-cellulase and filter-paperase activity of new strains isolated from Persian Gulf. *Microbiol. J.* 1, 8-16. DOI: 10.3923/mj.2011.8.16
- Sánchez, S., Marín, M., Mora, A., Yepes, M., 2012. Identificación de bacterias productoras de polihidroxialcanoatos (PHAs) en suelos contaminados con desechos de fique. *Rev. Colomb. Biotecnol.* 14, 89-100.
- Santos, D., Teshima, E., Furiam D., Araújo, R., Rodrigues da Silva, C., 2017. Efeito da secagem em leito nas características físico-químicas e microbiológicas de lodo de reator anaeróbico de fluxo ascendente usado no tratamento de esgoto sanitário. *Eng. Sanit. Ambient.* 22, 341-349. DOI: 10.1590/S1413-41522016100531
- Semblante, G., Hai, F., Huang, X., Ball, A., Price, W., Nghiem, L., 2015. Trace organic contaminants in biosolids: Impact of conventional wastewater and sludge processing technologies and emerging alternatives. *J. Hazard. Mater.* 300, 1-17. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.06.037
- Shanahan, E., Roiko, A., Tindale, N., Thomas, M., Walpole, R., Kurtböke, I., 2010. Evaluation of pathogen removal in a solar sludge drying facility using microbial indicators. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 7, 565-582.
- Silva-Leal, J., Bedoya-Ríos, D., Torres-Lozada, P., 2013. Efecto del secado térmico y el tratamiento alcalino en las características microbiológicas y químicas de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas. *Quím. Nova* 36, 207-214. DOI: 10.1590/S0100-40422013000200002
- Stone, D., Ritz, K., Griffiths, B., Orgiazzi, A., Creamer, R., 2016. Selection of biological indicators appropriate for European soil monitoring. *Appl. Soil Ecol.* 97, 12-22. DOI: 10.1016/j.apsoil.2015.08.005
- TC WI, 2003. Determination of Kjeldahl Nitrogen in soil, biowaste and sewage sludge. Disponible en: https://www.ecn.nl/docs/society/horizontal/STD6161_Kj-N.pdf; consultado: mayo de 2018.

- Torres, P., Madera P., Silva J., 2009. Eliminación de patógenos en biosólidos por estabilización alcalina. *Acta Agron.* 58, 197-205.
- United States Department of Agriculture (USDA), 1999. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. Washington DC.
- Vishnuvardhan Reddy, S., Thirumala, M., Kishore Reddy, T., Mahmood, S., 2008. Isolation of bacteria producing polyhydroxyalkanoates (PHA) from municipal sewage sludge. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 24, 2949-2955. DOI: 10.1007/s11274-008-9839-7
- Yuan, H., Zhu, N., 2016. Progress in inhibition mechanisms and process control of intermediates and by-products in sewage sludge anaerobic digestion. *Renew. Sust. Energ.Rev.* 58, 429-438. DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.261