

Estabilización de lodos biológicos provenientes de una planta de tratamiento de agua residual mediante pacas biodigestoras¹

Carlos Esteven Pulgarín Muñoz²; Beatriz Amparo Wills Betancur³

Resumen

Introducción. Como producto de la depuración de las aguas residuales mediante procesos biológicos surgen los lodos biológicos como uno de los residuos de mayor importancia en la PTAR, que en Colombia se calcula una producción promedio de 274 toneladas por día. **Objetivo.** Evaluar el proceso de estabilización de lodos proveniente de una planta de tratamiento de aguas residuales anaerobia, por medio de pacas biodigestoras. **Materiales y métodos.** Posterior a la construcción de cuatro pacas con diferentes concentraciones de lodos biológicos, se realizó seguimiento de temperatura y pH durante cuatro meses. Una vez finalizados fueron llevados al laboratorio del grupo GIEM para hacer los estudios fisicoquímicos y microbiológicos. **Resultados.** Se observó que en

ningún caso la temperatura supera los 50 °C, el pH estuvo 7,5 y 3,5 U de pH y las pacas se mantuvieron saturación de humedad. Se reportan valores apropiados para CIC, COT, Relación C/N. Valores aceptables para NOT y P y cumplimiento con las exigencias para metales pesados exceptuando la concentración de níquel. Hay presencia tanto de coliformes totales y fecales como de huevos de helmintos. **Conclusión.** De esta investigación finalmente se concluye que el proceso de estabilización alcanza mejores resultados a medida que aumenta la concentración de residuos de cocina y que si bien se logra un producto con características apropiadas para ser suministrado a los suelos, ya sea como abono orgánico o para la enmienda de suelos, se requiere un tiempo más prolongado para lograr la maduración total del biselado resultante y la inhibición de microorganismos indicadores como los huevos de helmintos.

1 Artículo original derivado de la investigación: Estabilización de lodos biológicos provenientes de una planta de tratamiento de agua residual mediante pacas biodigestoras, Realizado entre el 16 de mayo de 2017 al 20 de enero de 2018, financiado por la Universidad de Antioquia, Colombia

2 Ingeniero Sanitario, Universidad de Antioquia, Colombia. Investigador del Grupo de Investigación Aliados con el Planeta, Colombia, e-mail: esteven.pulgarin@udea.edu.co ORCID ID: 0000-0002-85648492

3 M. Sc en Ingeniería Ambiental de la Universidad de Antioquia, Colombia. Ingeniera Sanitaria de la Universidad de Antioquia, Colombia. Docente Titular, e-mail: beatriz.wills@udea.edu.co ORCID: 0000-0001-5804-2308

Autor para correspondencia: Carlos Esteven Pulgarín Muñoz, e-mail: esteven.pulgarin@udea.edu.co

Recibido: 15/02/2018

Aprobado: 24/07/2019

Stabilization of biological sludge from a wastewater treatment plant by means of Biodigester Bales

Abstract

Introduction. As a result of the purification of wastewater through biological processes, biological sludge emerges as one of the most important waste in the WWTP, for which in Colombia an average production of 274 tons per day is calculated. **Objective.** To evaluate the process of stabilization of sludge from an anaerobic wastewater treatment plant, by means of Biodigester Bales. **Materials and methods.** After the construction of 4 bales with different concentrations of biological sludge, monitoring of temperature and pH was carried out for four months. They were then taken to the laboratory of the GIEM group to carry out the physicochemical and microbiological studies. **Results** It was observed that in no case the temperature exceeds 50 °C, pH was 7.5 and U of pH was 3.5, and the bales remained saturated with moisture. Appropriate values for CEC, TOC, and C/N ratio are reported. Acceptable values are reported for TON and P as well as compliance with requirements for heavy metals except for the nickel concentration. There is presence of both total and fecal coliforms and helminth eggs. **Conclusion.** From this investigation it is finally concluded that the stabilization process achieves better results as the concentration of kitchen waste increases and that although a product with appropriate characteristics is achieved to be supplied to the soil either as organic fertilizer or for amendment of soils, a longer time is required to achieve total maturation of the

resulting bevel and the inhibition of indicator microorganisms such as helminth eggs.

Keywords: biological sludge, bio-digesting bales, organic matter, organic manure, anaerobic digestion.

Estabilização de lodos biológicos provenientes de uma usina de tratamento de água residual mediante fardos biodigestores

Resumo

Introdução. Como produto da depuração das águas residuais mediante processos biológicos surgem os lodos biológicos como os resíduos de maior importância na PTAR, na Colômbia calcula-se uma produção em média de 274 toneladas por dia. **Objetivo.** Avaliar o processo de estabilização de lodos provenientes de uma usina de tratamento de águas residuais anaeróbia, por médio de fardos biodigestores. **Materiais e métodos.** Posterior à construção de quatro fardos com diferentes concentrações de lodos biológicos, realizou-se seguimento de temperatura e pH durante quatro meses. Uma vez finalizados, foram levados ao laboratório do grupo GIEM para fazer os estudos físico-químicos e microbiológicos. **Resultados.** Observou-se que em nenhum caso a temperatura supera os 50 °C, o pH esteve 7,5 e 3,5 U de pH e os fardos manterem a saturação de umidade. Reportam-se valores apropriados para CIC, COT, Relação C/N. Valores aceitáveis para NOT e P, e cumprindo com as exigências para metais pesados excetuando a concentração de níquel. Tem presença tanto de coliformes totais e fecais como de ovos de

helminthes. **Conclusão.** A partir desta pesquisa, conclui-se finalmente que o processo de estabilização obtém melhores resultados à medida que a concentração de desperdício de cozinha aumenta e que, embora um produto com características apropriadas seja conseguido para ser fornecido ao solo, seja como adubo orgânico ou para emenda de so-

los, é necessário um tempo mais prolongado para conseguir a maturação total do bisel resultante e a inibição de micro-organismos indicadores, como os ovos helmintes.

Palavras-chave. Lodos biológicos, fardos biodigestores, matéria orgânica, adubo orgânico, digestão anaeróbica.

Introducción

El tratamiento de las aguas residuales se ha convertido en una de las más destacadas opciones de mitigar los impactos causados por la captación y uso del recurso agua para suplir las necesidades cotidianas de una población humana en constante crecimiento, función que se viene desarrollando mediante el empleo de Plantas de Tratamiento de Agua Residual –PTAR– donde al igual que en otras actividades humanas, se generan importantes volúmenes de residuos, que de no ser tratados eficientemente pueden contribuir de forma importante a la contaminación ambiental (Oropeza, 2006).

Uno de los residuos de mayor importancia generados en las PTAR son los lodos biológicos, como resultado del crecimiento de biomasa en los reactores, por la depuración de las aguas residuales. Se estima que en Colombia hay una producción promedio de 274 toneladas por día, que además representan una importante carga orgánica, que de ser efectivamente tratadas y aprovechadas, podrían ser usadas bien sea como abono orgánico en la agricultura o para efectuar enmienda de suelos erosionados (Bedoya *et. al.*, 2013).

Como alternativa para el tratamiento y aprovechamiento de lodos biológicos se han im-

plementado sistemas como el compostaje, la digestión anaerobia y el lombricultivo, entre otros. Donde mediante procesos físicos, químicos y biológicos se logra una reducción significativa tanto del volumen como de los contaminantes, para posteriormente ser dispuestos en rellenos sanitarios o ser utilizado como llenado de andenes y carreteras, estabilidad de taludes, abono orgánico, entre otros (Bedoya *et. al.*, 2013).

Teniendo en cuenta lo anteriormente descrito se realizó este trabajo, donde se evalúa la posibilidad de estabilizar lodos biológicos, mediante pacas biodigestoras, una alternativa recientemente estudiada y que ha mostrado buenos resultados en procesos de mineralización de residuos orgánicos de cocina (Ossa, 2016; Posada 2015; Ateaga y Castaño 2015; Ardila *et al.* 2015). Durante la investigación se realizó el seguimiento a parámetros físicos, químicos y microbiológicos a cuatro pacas biodigestoras con diferentes concentraciones de lodos biológicos, con el fin de tener acercamientos al conocimiento de los fenómenos que tienen ocurrencia durante el proceso, posterior a los cuatro meses se realizó la caracterización física, química y microbiológica del producto finalmente obtenido.

Materiales y métodos

Construcción y seguimiento de parámetros físicos

El montaje experimental se ubicó en las instalaciones de la sede central de la Universidad de Antioquia, en Medellín. Las pacas biodigestoras se construyeron con residuos alimenticios de cafeterías y residuos de poda de la misma universidad y lodo biológico proveniente de la PTAR del municipio de Gómez Plata. Los estudios de laboratorio fueron realizados por el Grupo de Estudios Intermoleculares (GIEM) de la U. de A.

Las pacas biodigestoras son una biotecnología para la degradación de materia orgánica, la construcción de estas consistió en la adición de una primer cama de residuos de poda, la cual fue compactada mediante el apisonamiento humano, posteriormente fue dispuesta otra cama de residuos de poda, que fue ubicada en los bordes del molde, y en el centro se adicionaron las mezclas de residuos de alimentos y lodos biológicos, en proporciones de cosustratos de 100, 75, 50 y 0 % de lodos biológicos para las pacas 1, 2, 3 y 4 respectivamente esta relación se evidencia en el gráfico 1.

Gráfico 1. Composición de las cuatro pacas biodigestoras construidas.

Nº de paca	Unidad	Hojarasca	Lodos	Residuos de alimentos	Total
1	kg	36,4	39,0	-	75,4
2		45,0	26,0	8,0	79,0
3		38,0	14,2	16,2	68,4
4		36,9	-	35,1	72,0

Fuente: elaborado por los autores.

Entre el 16 de mayo y el 13 de octubre de 2017, dos veces a la semana se realizó el monitoreo del pH y la temperatura, dichos datos fueron tomados a 20 cm de profundidad sobre la cara superior, tanto la temperatura como el pH fueron medidos utilizando un termómetro digital Reoteum modelo DC24PF-C con capacidad para medir temperaturas desde los -50°C hasta 200 °C.

Finalmente, después de haber transcurrido 5 meses, y de haber observado que tanto la temperatura como el pH se habían estabilizado, se procedió a desarmar los cuatros pacas, de cada una de estas se tomó una muestra de 1 Kg, las cuales fueron llevadas al laboratorio del grupo de Investigación de Estudios Mo-

leculares GIEM de la Universidad de Antioquia, quienes realizaron la caracterización de acuerdo con las metodologías establecidas en la Norma Técnica Colombiana 5167.

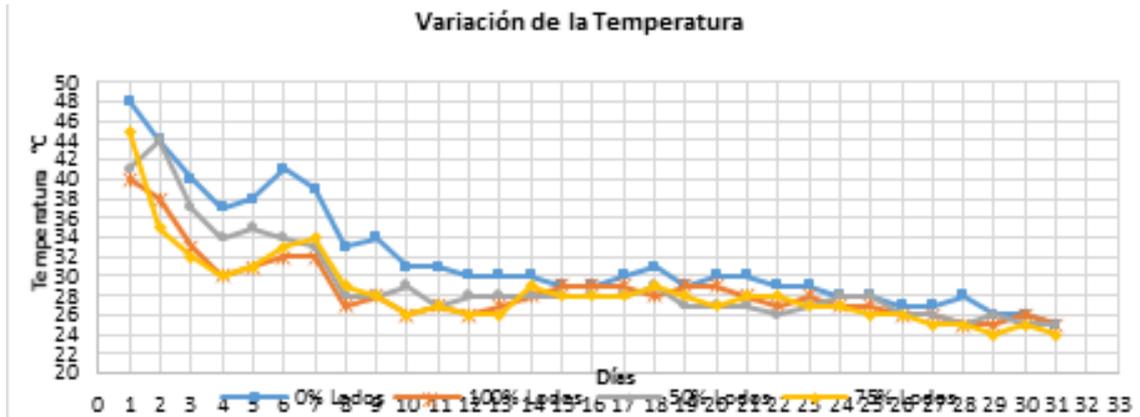
Resultados

Temperatura

Tal como se evidencia en el gráfico 2, durante las dos primeras semanas, las cuatro pacas biodigestoras registraron valores de temperatura cercanos a las 40 °C. En la primera medición se registró un valor máximo de 48 °C correspondiente a la paca con 0 % de lodos biológicos y una temperatura mínima

de 40 °C para la paca con 100 %. Finalmente se aprecian valores por debajo de 30 °C hasta llegar a valores cercanos a los 20 °C registrados en la última medición realizada.

Gráfico 2. Variación en la temperatura durante el proceso de estabilización.



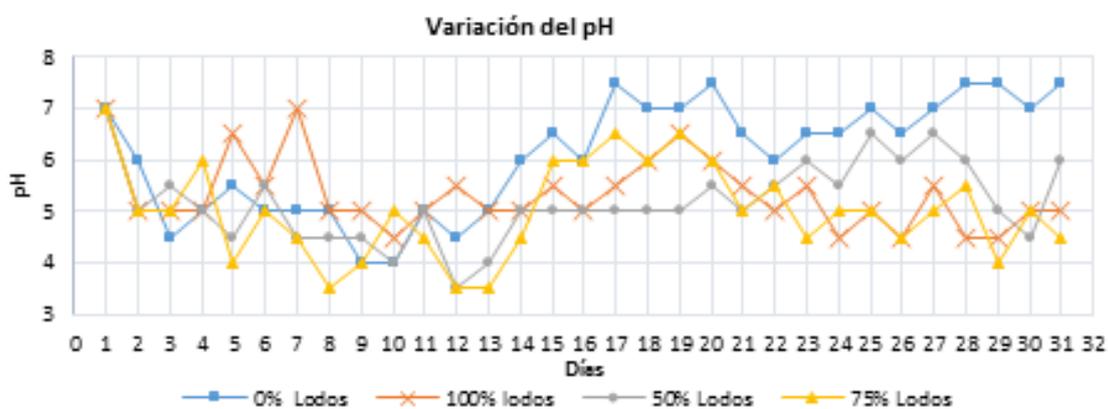
Fuente: elaborado por los autores

pH

En cuanto al pH se evidencia que en todos los casos el proceso inicial es en valores cercanos a 7 U de pH y posteriormente desciende hasta valores cercanos a 3,5 U de pH, registrado para la paca con 75 % de lodos, posterior a

la séptima semana de monitoreo se presenta un aumento en el pH hasta alcanzar 4,5; 5, 6 y 7,5 U de pH para las pacas con 75, 100, 50 y 0 % de lodos, respectivamente.

Gráfico 3. Variaciones en el pH durante el proceso de estabilización



Fuente: elaborado por los autores.

Características organolépticas

Las características físicas y organolépticas se reportan en el gráfico 4, en este se aprecia que el producto final de las tres pacas biodigestoras se caracterizan por presentar una

coloración café, la textura es heterogénea y el tamaño de partícula para un porcentaje en base seca superior al 95 %, se encuentra por encima de 2 mm

Gráfico 4. Características físicas y organolépticas del producto final

	Color	Textura	Tamaño de partícula	% de masa seca
50 % lodos	Café	Gruesa heterogénea	>2 mm	95,5
75 % lodos	Café	Gruesa heterogénea	>2mm	97,0
100 % lodos	Café	Gruesa heterogénea	>2mm	95,9

Fuente: elaborado por los autores

Características fisicoquímicas

En los gráficos 5a, 5b, y 5c se muestran los valores de los parámetros fisicoquímicos evaluados a las muestras de las tres pacas con contenido de lodo biológico

En el gráfico 5a se observa que el contenido de cenizas varía en las tres pacas, con valores de 75,8, 73,4 y 63 % para las pacas con un 75 % de lodos, seguida por las pacas con 100 y 50% de lodo respectivamente. Mientras que, para la capacidad de intercambio catiónico los valores reportados son de 46,7, 33,9 y 39,8 para las muestras correspondientes en las pacas con 50, 75 y 100 % de lodos biológicos, respectivamente. Para el carbono orgánico total el menor valor hallado corresponde a 10,4 % correspondiente a la paca con mayor contenido de lodos biológicos. Además, se observan valores que van desde 10,4 a 17 % para el COT, y, la humedad reportada corresponde a 29,9, 57,3 y 62,3.

En cuanto al pH se reportan valores de 6,92 para la paca con 50 % de lodos, 5,6 para la paca con 75 % y de 7,58 para la paca con 100 % de lodos, para la relación carbono-ni-

trógeno, se muestra que para la paca con un 50 % de lodo biológico se obtuvo un valor de 10,2 mientras que para la paca con 75 % de lodo el valor registrado fue de 10,7 y para la paca con 100 % de lodo, fue de 4,7 % (gráfico 5b).

Los valores obtenidos para el nitrógeno total son reportados en el gráfico 5c, correspondientes a 1,65, 1,09 y 2,2 para las pacas de menor a mayor contenido de lodos biológicos. Los valores hallados para la conductividad eléctrica se ubican de forma ascendente, en la medida que aumenta la concentración de lodos biológicos empezando por 0,21 seguido por 0,38 y terminando con 0,62 dS/m., mientras que para la densidad los datos corresponden a 0,55 0,79 y 0,74 para las pacas con 50, 75 y 100 % de lodos respectivamente. En la misma figura se muestran los valores obtenidos para el fósforo asimilable en cada una de las muestras estudiadas, se aprecia que el mayor valor corresponde a la paca con 75 % de lodo biológico con una concentración de 1,14 %, seguido por las pacas con 50 % y 100 % de contenido de lodo, con 0,97 %, y 0,8 %.

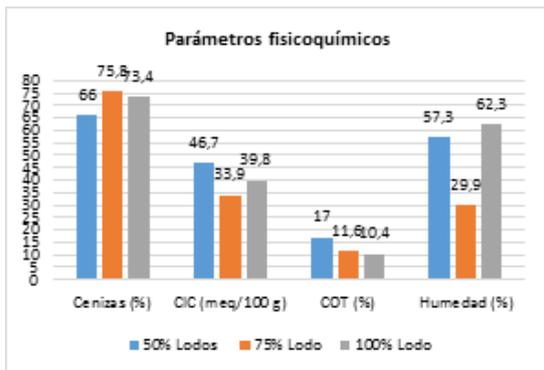


Gráfico 5a. Parámetros fisicoquímicos –cenizas, CIC, COT, humedad–

Fuente: elaborado por los autores

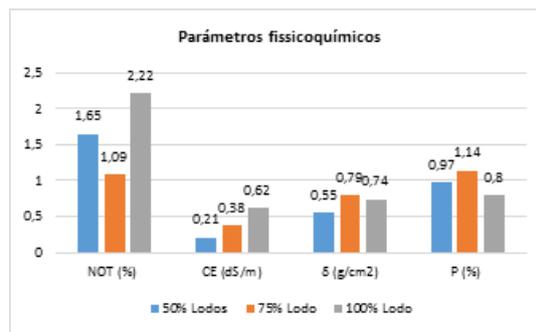


Gráfico 5c. Parámetros fisicoquímicos –NOT, CE, Densidad, y Fosforo total–

Fuente: elaborado por los autores

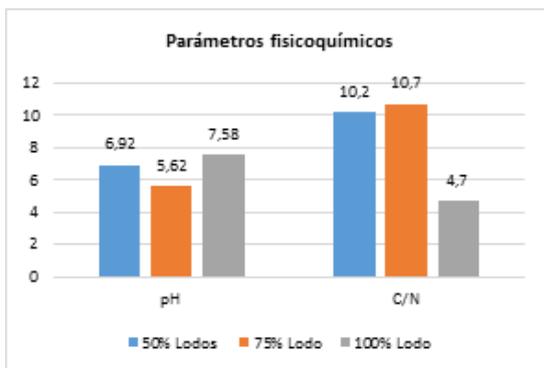


Gráfico 5b. Parámetros fisicoquímicos –pH y relación C/N–

Fuente: elaborado por los autores

Metales pesados

Se encontró que únicamente la concentración de níquel presente en las muestras, supera el límite establecido por el Decreto 1287, llegando hasta 106,3 ppm para la muestra proveniente de la paca con 75 % de lodos biológicos. Mientras que la concentraciones de los demás metales estudiados se encuentra muy por debajo de los valores permitidos tal y como se puede apreciar en el gráfico 6.

Gráfico 6. Concentración de metales pesado en el producto final

Concentración de lodos	Cromo	Níquel	Plomo	Cobre	Mercurio	Arsénico
Decreto 1287	1000	80	300	1000	10	20
50 %	18,8	96,2	0,01	0,000659	0,1878	1,343
75 %	35,4	106,3	0,01	0,000499	0,544	2,6
100 %	12,2	80,2	0,01	0,01	0,289	1,107

Fuente: elaborado por los autores

Taxonomía microbiana

En las tres muestras analizadas se evidencia gran presencia de microorganismos mesófilos y termófilos mohos y levaduras, gráfico 7,

se aprecia una significativa concentración de microorganismos indicadores, como entero bacterias, Salmonella, coliformes totales, coliformes fecales y huevos de helminto viables, mostrado en el gráfico 8, superando incluso los parámetros establecidos en el Decreto 1287

Gráfico 7. Taxonomía y conteo microbiológico de: -mesófilos, termófilos mohos y levaduras- de las muestras extraídas de las pacas experimentales

Composición porcentual de lodo en cada paca	Mesófilos u.f.c/g	Termófilos u.f.c/g	Mohos u.f.c/g	Levaduras u.f.c/g
50 % Lodos	5,50E+07	1,00E+08	5,30E+04	0,00E+00
75 % Lodos	5,40E+08	2,00E+07	3,50E+03	7,00E+03
100 % Lodos	4,70E+07	5,40E+07	1,80E+04	1,00E+03

Fuente: elaborado por los autores

Gráfico 8. Taxonomía y conteo microbiológico de: -enterobacterias, salmonella, coliformes totales, coliformes fecales y huevos de helminto viables- de las muestras extraídas de las pacas experimentales

Composición porcentual de lodo en la paca	Entero bacterias	Salmonella	Coliformes Totales u.f.c/g	Coliformes Fecales u.f.c/g	Huevos de Helmintos
50 % Lodos	4,00E+02	Ausente	>2400	>2400	2
75 % Lodos	1,00E+02	Ausente	>2400	>2400	3
100 % Lodos	8,00E+02	Ausente	>2400	>2400	7

Fuente: elaborado por los autores

Discusión

Parámetros de seguimiento, temperatura y pH

De acuerdo con las mediciones de temperatura, tal como se evidencia en el gráfico 2. en las primeras semanas de medición se pudo identificar una fase mesófila, lo que según Fernández y Pereira Da Silva (1999), desfavorece la inhibición de los microorganismos patógenos, que además coincide con las apreciaciones de la EPA (2003), quienes dicen que las primeras temperaturas deben estar por encima de los 52 °C.

A partir de la tercera medición correspondiente a la segunda semana de monitoreo, se registra un descenso en la temperatura de las cuatro pacas hasta aproximadamente la séptima semana de mediciones, a partir de

la cual se identifica la etapa de maduración o enfriamiento y las variaciones en la temperatura son menos marcadas. En los tres modelos experimentales con lodo biológico la temperatura es menor en comparación con el modelo experimental sin contenido de lodos biológicos, comportamientos similares son evidenciados por Torres, Escobar, Pérez, Imery, Nates, Sánchez, Sánchez y Bermúdez (2005) quienes evaluaron la influencia del material de enmienda en el proceso de compostaje de lodos de la PTAR Cañaveral de la ciudad de Cali.

Durante las mediciones de pH se identificó que en la etapa de arranque el proceso inicia en la neutralidad con valores cercanos a 7 U de pH, pero rápidamente desciende hasta valores que ubican el sistema dentro del rango de acidofílico, entre la segunda y la séptima semana, debido principalmente

a la generación de productos parcialmente estabilizados como ácidos orgánicos, alcoholes, ácido sulfhídrico y dióxido de carbono, producto de la acción de bacterias formadoras de ácidos, presentes en la primera etapa de los procesos anaerobios (von Sperling & Chernicharo, 2005; Gómez, Lazcano & Domínguez 2007).

Posterior a la séptima semana, se registra un leve ascenso en el pH que coincide con la etapa de estabilización de la temperatura –registrada en el Gráfico 2. Adicionalmente, se observó que de las cuatro pacas únicamente la paca compuesta por residuos de cocina y hojarasca alcanzó valores cercanos a 7 unidades de pH. Mientras que las pacas restantes presentaron valores en el rango acidofílico, condición desfavorable, primero porque en la mayoría de mediciones se registraron valores lejanos a la neutralidad, lo que incumple con las exigencias de la NTC 5167. Y segundo, porque este rango favorece la proliferación de *Escherichia coli* (Atlas y Bartha, 2002).

Características finales

Físicas.

Las características físicas y organolépticas reportadas en el Gráfico 4, permiten apreciar que el producto final de las tres pacas biodigestoras analizadas en el laboratorio, se caracterizan por presentar una coloración café, lo que de acuerdo con Fernandes y Pereira Da Silva (1999) y Román *et al.* (2013) es propio de un lodo digerido en condiciones anaerobias

Los valores hallados para la concentración de cenizas, reportados en el Gráfico 5^a, indican que el material final en las tres pacas tiene un alto grado de mineralización; además que,

teniendo en consideración los aportes realizados por Dimambro, Lillywhite & Rahn (2007), se puede esperar que el abono final tenga bajos niveles de nitrógeno y potasio. Mientras que la capacidad de intercambio catiónico reportado para las tres muestras estudiadas presentan valores mayores a 30 meq/100 g, que es el mínimo exigido por la NTC 5167 valores que, siguiendo a Ossa (2016), indican que el abono presenta un buen contenido de sustancias húmicas y buena capacidad para liberar elementos como potasio, calcio y magnesio.

También se aprecia que el valor del carbono orgánico total –COT– disminuye en la medida es que aumenta la concentración de lodos biológicos debido a que una parte importante del carbono total es suministrado por los residuos de cocina, pues estos son más ricos en este elemento que otros residuos como el estiércol y los lodos biológicos (Lu *et al.*, 2009; Dimambro *et al.*, 2007; Zmora-Nahum *et al.*, 2005, citados por Saldarriaga, 2009). En el gráfico 5a también se observa que los valores de la humedad, contrario a lo esperado, no siguen un patrón ascendente, pues retomando a Golueke, Savage & Díaz (2002), por el alto porcentaje de humedad de los lodos se espera que la humedad final sea proporcional a la concentración de lodos, el comportamiento registrado puede deberse a factores ambientales como la radiación directa o de construcción como el porcentaje de humedad de la hojarasca y chamizas empleadas.

En cuanto a la relación carbono-nitrógeno, en el gráfico 5b se muestra que los valores hallados se encuentran cercanos a las exigencias de la NTC 5167. Esto, debido a que, si bien la carga de nitrógeno de las aguas residuales y por consiguiente de los lodos biológicos es significativamente más alta que la carga de

carbono, cuando hay exceso de nitrógeno se produce amoníaco generando una regulación en la relación C/N. (Jhorar *et al.*, 1991, citado en Bueno *et al.*, 2008).

En cuanto a los valores para el nitrógeno total según la Norma Técnica Colombiana, deben ser mínimo del 2 %. En la presente investigación dicho valor solo fue superado por la muestra de la paca con 100 % de lodos biológicos, en las demás muestras no se evidenció dicha característica; sin embargo, se consideran aceptables debido a la cercanía al límite establecido, lo que permite suponer que el abono está cercano a alcanzar la madurez y que el producto final tendrá una buena calidad, debido a la cantidad de compuestos nitrogenados que pueden ser aprovechados por la microbiota y plantas (Ossa 2016). Los valores hallados para la conductividad eléctrica se ubican de forma ascendente, en la medida que aumenta la concentración de lodos biológicos. Esto debido a que la conductividad eléctrica está estrechamente relacionada con la formación de iones amonio y nitratos formados durante el proceso.

Las concentraciones de los metales pesados evaluados con excepción del níquel se encuentran muy por debajo de los valores permitidos, lo que da lugar a considerar la utilización del producto final como abono orgánico, pues uno de los riesgos establecidos por Sánchez *et al.* (2001) es que, al incorporar metales pesados al suelo, con el tiempo se puede llegar a valores perjudiciales para las plantaciones y la salud humana.

Taxonomía microbiana

La presencia de microorganismos mesófilos y termófilos en las tres muestras analizadas,

indica que no se ha alcanzado la estabilización y por ende aún no está listo para ser utilizado como abono. Por otro lado, la similitud en las concentraciones de estos mismos microorganismos indica el inicio del proceso de enfriamiento de abono orgánico, pues la aparición de los organismos mesófilos corresponde a una sucesión, es decir, cuando la presencia de los termófilos está en su máxima concentración, la concentración de mesófilos es mínima (Amir *et al.*, 2008; Saldarriaga 2009). Lo anterior es corroborado por la presencia de mohos y levaduras, microorganismos encargados de la degradación de la materia orgánica compleja debido a su habilidad para colonizar y descomponer el material vegetal (Román *et al.*, 2013).

Por otro lado, encontramos una significativa presencia de enterobacterias, indicador de que el sistema se mantuvo bajo condiciones anaerobias y corroborando que el proceso de mineralización de la materia orgánica se encuentra inconcluso, según la NTC 5164, el contenido total de estas debe estar por debajo de 1000 u.f.c/g parámetro que junto a la exigencia para *Salmonella sp* es cumplido por las tres muestras analizadas.

Conclusiones

Durante el proceso de monitoreo se realizó seguimiento de los parámetros físicos – temperatura, pH y humedad– que han sido propuestos por diversos autores como indicadores del proceso de descomposición en estado sólido. En el proceso de estabilización de lodos biológicos mediante pacas biodigestoras, estos parámetros siguieron patrones diferentes a los registrados en procesos de estabilización de residuos de alimentos usando este mismo método. Pero guardó similitudes

con los parámetros registrados en procesos de estabilización de lodos biológicos usando otros métodos como el compostaje o el vermicultivo.

Por otro lado, se encontró reafirmado lo expuesto por Julio (2016), que la capacidad de digestión de lodos biológicos que aumentó proporcionalmente a la cantidad de residuos de alimentos adicionados al sistema, debido al incremento de la relación C/N. Lo que, en consecuencia, genera un incremento en la temperatura del sistema, parámetro indicador de la actividad microbiológica, permitiendo así concluir que el incremento en la cantidad de residuos de alimentos aumentará las temperaturas registradas hasta llegar a valores cercanos a 55 °C, de esta forma se garantizaría la inhibición de organismos patógenos.

En cuanto a las características físicoquímicas y microbiológicas del producto final obtenido mediante el proceso de estabilización de lodos biológicos en pacas, se cumplió con algunos de los parámetros establecidos en la Norma Técnica Colombiana 5167, como la capacidad de intercambio catiónico, el carbono orgánico total, y las relaciones C/N, mientras que parámetros como el fósforo y el nitrógeno orgánico total solo alcanzaron valores aceptables, debido a la cercanía al valor límite.

Mientras que de las exigencias del Decreto 1287 de 2014, se cumplió únicamente con las concentraciones pedidas para entero bacterias y salmonella sp, lo que permitió clasificar el producto final como biosólidos tipo B y por lo tanto, su empleo se ve reducido a los usos permitidos en el artículo 8 del mismo decreto.

Finalmente, con ayuda de la bibliografía consultada, los resultados obtenidos, los

análisis realizados y las conclusiones a las que permitió llegar este trabajo, se encontró que el proceso de estabilización de lodos biológicos en pacas biodigestoras representan una alternativa, ecológica y técnicamente viable, aunque el presente estudio también permite concluir que cuatro meses no son suficientes para lograr la digestión total del material presente.

Referencias

- Ardila, J.; Cano, J.; Silva, G. y López, Y. (2015). Descomposición de residuos orgánicos en pacas: aspectos físicos, biológicos, ambientales y sanitarios. *Producción + Limpia*, 10 (2), 38-52.
- Amir, S., Merlina, G., Pinelli, E., Winterton, P., Revel, J.-C., & Hafidi, M. (2008). Microbial community dynamics during composting of sewage sludge and straw studied through phospholipid and neutral lipid analysis. *Journal of Hazardous Materials*, (159), 593–601.
- Ateaga, C. y Castaño, S. (2015). *Tratamiento sano de hojarasca y residuos orgánicos, para restaurar las zonas verdes en la ciudadela central, Universidad de Antioquia*. (Tesis de pregrado) Universidad de Antioquia, Colombia.
- Atlas, R. M. & Bartha, R. (2002). *Ecología microbiana y microbiología ambiental*. Madrid, España: Pearson-Addison Wesley.
- Bedoya, K.; Acevedo, J., Peláez, C. y Agudelo, S. (2013). Caracterización de biosólidos generados en planta de tratamiento de agua residual San Fernando, Itagüí

- (Antioquia, Colombia). *Revista de Salud Pública*, 15 (5), 178-190.
- Bueno, P., Díaz, M. y Cabrera, F. (2008). Factores que afectan el proceso de compostaje. En Agreda, R. y Deza, M. *Compostaje* (pp. 93-109). Huelva, España:
- Decreto 1287 (2014). *Por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (1 ed.)*. Bogotá, Colombia.
- Dimambro, E.; Lillywhite, D., & Rahn, C. R. (2007). The Physical, Chemical and Microbial Characteristics of Biodegradable Municipal Waste Derived Composts. *Compost Science & Utilization*, 15 (4), 243-252.
- Fernandes, F., y Pereira Da Silva, S. (1999). *Manual práctico para a compostagem de biosólidos*. Londrina: Universidad Estadual de Londrina.
- Golueke, L., Savage, G. & Díaz, L. (2002). Composting of manipulation solid wastes. *Handbook of solid waste management*, (2), 423-492.
- Gómez, M., Lazcano, C. & Domínguez, J. (2007). The evaluation of stability and maturity during the composting of cattle manure. *Chemosphere* (70), 436-444.
- Julio, I., (2016). Evaluación del potencial de biometanización de la codigestión de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales municipales mezclados con residuos de alimentos. (Tesis de maestría) Universidad de Antioquia, Colombia.
- Lu, Y., Wua, X., & Guo, J. (2009). Characteristics of municipal solid waste and sewage sludge co-composting. *Waste Management* (29), 1152–1157.
- Norma Técnica Colombiana –NTC 5167– (2011). *Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abono o fertilizantes y enmienda o acondicionadores de suelo (2 ed.)*. Bogotá, Colombia.: Editorial del Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).
- Oropeza, G. N. (2006). Lodos residuales: estabilización y manejo. *Caos Conciencia*, (1), 51-58.
- Ossa, C. (2016). *Aplicación de la tecnología de las Pacas Biodigestoras para el tratamiento ecológico de los residuos orgánicos de la Universidad de Antioquia*. (Tesis de pregrado). Universidad de Antioquia, Colombia.
- Fernandes, F., y Pereira Da Silva, S. (1999). *Manual práctico para a compostagem de biosólidos*. Londrina: Universidad Estadual de Londrina.
- Posada, A. (2015). *Evaluación de dos sistemas de degradación biológica en zona rural del corregimiento de San Antonio de Prado*. (Tesis de pregrado) Universidad de Antioquia, Colombia.
- Román, P., Martínez, M. y Pantoja, A. (2013). *Manual del compostaje del agricultor; experiencias en América Latina*. Santiago de Chile, Chile: FAO publications.
- Saldarriaga, J., (2009). *Compuestos orgánicos volátiles (VOCs) en el proceso de*

compostaje de los residuos sólidos urbanos con separación en la fuente y su efecto en la salud humana (tesis de maestría). Universidad de Medellín, Colombia.

Sánchez, M., Roig, A., Paredes, C. & Bernal, M. (2001). Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC, and maturity of the composting mixture. *Bioresource Technology* (78), 301-308.

Torres, P., Escobar, J., Pérez, A., Imery, R., Nates, P., Sánchez, G., Sánchez, M. y Bermúdez, A. (2005). Influencia del material de enmienda en el compostaje de los lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales- PTAR. *Revista de Ingeniería e Investigación*, (58) 25, 53-61.

Von Sperling, M. & de Lemos Chernicharo, (2005). *Biological wastewater treatment in warm climate regions*. Garais, Brazil: IWA publishing.