



# Análisis de variables físicas y microbiológicas en el proceso de compostaje de biosólidos en pilas menores a un metro cúbico

*Analysis of physical and microbiological variables in the process of composting biosolids in piles smaller than one cubic meter*

Pedro Mauricio Acosta Castellanos<sup>1</sup>, Brigid Pacheco García<sup>2</sup>,  
Luz Ángela Cuéllar<sup>3</sup>, Mónica Díaz Pita<sup>4</sup>

Recibido: 30 de mayo de 2018 Aprobado: 21 febrero del 2019

**Resumen:** Los biosólidos son lodos producidos por el tratamiento de las aguas residuales en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), los cuales pueden ser utilizados en la agricultura después de someterse a procesos de estabilización. El compostaje es un proceso biológico exotérmico de conversión de la materia orgánica presente en los residuos hacia formas más estables como el humus. Este artículo presenta los resultados de una investigación en la cual se analiza el compostaje como alternativa para el manejo y disposición de los biosólidos en pilas de compostaje con tamaño menor a un metro cúbico (1 m<sup>3</sup>). A partir de esta técnica, se busca definir las características físicas y microbiológicas del lodo y mejorarlas mediante el proceso de compostaje, con el fin de que se

pueda clasificar como un compost de uso agrícola. Los biosólidos generados en PTAR presentan tendencia a la compactación y baja porosidad que ocasionan dificultades durante el proceso de compostaje por una inadecuada aireación, lo que se puede corregir adicionando materiales de soporte con características de residuo sólido urbano: caña, pasto o grama, cáscara de huevo y material de enmienda también con la característica de residuo sólido; aserrín y viruta. El análisis del comportamiento de las variables físicas estudiadas (pH, humedad y temperatura) define una relación directa entre estos parámetros, dado que el pH tiene resultados más favorables cuando la temperatura varía entre los 35-45 °C y el contenido de humedad está entre 45 y 60 %. En

1 M.Sc. en Ingeniería Sanitaria, decano de la Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Santo Tomás, seccional Tunja. Correo electrónico: dec.ambiental@ustatunja.edu.co

2 Ingeniero civil, docente de la Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Santo Tomás, seccional Tunja. Correo electrónico: brigid.pacheco@usantoto.edu.co.

3 PhD. Ciencias Biológicas, docente de la Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja. Correo electrónico: luz.cuellar@usantoto.edu.co

4 M.Sc. Biología, docente de la Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Santo Tomás, seccional Tunja. Correo electrónico: monica.diazp@usantoto.edu.co

cuanto a las variables microbiológicas, se analizan las condiciones iniciales y durante el proceso de compostaje en las pilas menores a 1 m<sup>3</sup> de salmonella, *E. coli* y coliformes, para evaluar su efecto sobre el mejoramiento del proceso y la calidad del producto final obtenido.

**Palabras clave:** biosólidos, compostaje, lodo, variables microbiológicas.

**Abstract:** Biosolids are sludge produced by the treatment of wastewater in Wastewater Treatment Plants - WWTP which can be used in agriculture after undergoing stabilization processes. Composting is an exothermic biological process of conversion of organic matter present in waste to more stable forms such as humus. This research presents the results of an investigation in which composting is analyzed as an alternative for the management and disposal of biosolids in composting piles with a size smaller than one cubic meter (1 m<sup>3</sup>). From this technique, we seek to define the physical and microbiological characteristics of the sludge and improve them through the composting process, so that it can be classified as a compost for agricultural use. The biosolids generated in WWTP present a tendency towards compaction and low porosity that cause difficulties during the composting process due to inadequate aeration, which can be corrected by adding support materials with characteristics of solid urban waste; cane, grass or grass, eggshell and amendment material also with the characteristic of solid residue; sawdust and chip. The analysis of the behavior of the physical variables studied (pH, humidity and temperature) defines a direct relationship between these parameters, given that the pH has more favorable results when the temperature varies between 35 and 45°C. Likewise, in the temperature, better results are observed when the moisture content is between 45 and 60%. Regarding the microbiological variables, the initial conditions and during the composting process in the piles smaller than 1 m<sup>3</sup> were analyzed; of salmonella, *E. Coli* and coliforms. to evaluate its effect on the improvement of the process and the quality of the final product obtained.

**Keywords:** biosolids, composting, sludge, microbiological variables.

## Introducción

El lodo producido luego del tratamiento de las aguas residuales es un residuo sólido que presenta altas concentraciones de patógenos, generalmente se relaciona con la generación y transmisión de enfermedades que afectan la calidad de vida de los seres humanos (Betancurt, 2015). Actualmente, la producción de lodo está en crecimiento por el aumento de la población y la aparición de nuevas ciudades, así como por el acceso al saneamiento básico de los países en desarrollo y el incremento de tratamientos de aguas residuales. Sin embargo, hay carencia de investigaciones acerca del aprovechamiento del lodo, porque generalmente este subproducto del tratamiento de las aguas residuales es llevado a rellenos sanitarios, incluso en algunos casos se hace más visible la inadecuada disposición final, ya que es dispuesto de manera incorrecta en terrenos y cerca de fuentes hídricas, lo que, sin duda, genera procesos de contaminación ambiental (Ramírez et al., 2007; Acosta, 2015).

Este residuo sólido es una materia biofísica con gran contenido de humedad, que dependiendo de las características del agua residual o del tipo de tratamiento que se le haga a las aguas residuales, pueden llegar a tener grandes contenidos de metales pesados y microorganismos patógenos (Quinchía y Carmona, 2004). La PTAR Salitre ubicada en Bogotá, Colombia, tiene un tratamiento primario de 4 metros cúbicos de agua por segundo, provenientes de cerca de 3 millones de habitantes de Bogotá. Hasta el año 2011, se realizaba la disposición final como cobertura de la celda diaria en el relleno sanitario Doña Juana, pero al colapsar éste se empezó a disponer en un predio aledaño propiedad del Acueducto de Bogotá, a cuyo cargo está la PTAR (Acueducto de Bogotá, 2000, pp. 10-11).

Por lo anterior, el presente artículo registra la evolución del tratamiento de biosólidos mediante compostaje en pilas, con condiciones diferentes a las probadas y validadas, específicamente en relación con su volumen. Teóricamente, se considera que para lograr una efectividad alta en la reducción de patógenos es necesario tener

una masa de biosólidos superior al metro cúbico ( $1 \text{ m}^3$ ), idealmente superior a tres metros cúbicos ( $3 \text{ m}^3$ ). Esto porque a mayor masa de biosólidos, los microorganismos tienen mejores condiciones y por ende aumenta la temperatura y se produce un proceso de inactivación de los patógenos (Monsalve, Delgado y Giraldo, 2004). Por tanto, en este artículo se plantea el seguimiento y registro de un proceso de compostaje aplicado a biosólidos o lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales, con pilas menores a un metro cúbico, con el fin de identificar mediante la evaluación de los parámetros físicos y microbiológicos la posibilidad de implementar estas pilas en plantas de tratamiento para pequeñas ciudades donde la producción de este residuo sea poca.

El compostaje de biosólidos por pilas de volteo es una técnica que ha mostrado múltiples avances a nivel internacional y nacional. Algunos ejemplos de ello se presentan en países como: Argentina, España, México, EE. UU. y algunos países de Europa. A nivel nacional, ciudades como Medellín, Bogotá y Cali.

Argentina es pionera en este sentido, al ser el primer país que inició una planta de compostaje de biosólidos en la ciudad de Bariloche, donde produce y comercializa al año cerca de  $3000 \text{ m}^3$  (Mazzarino, 2000). El material producto del compostaje se comercializa usualmente como abono orgánico para cultivos (Mazzarino, 2012). En Colombia, se tienen avances en la regulación para la aplicación o disposición final de este residuo, mediante el Decreto 1287 de 2014 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, ente responsable de la formulación de las políticas de agua y saneamiento básico en este país (Minvivienda, 2014).

Para esta investigación se utilizó el lodo que proviene del tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Bogotá, de la planta denominada El Salitre, con predominancia de agua doméstica, lo que favorece el proceso puesto que el lodo producido tiene altos contenidos nutritivos y bajo contenido de metales pesados.

El compostaje es una de las alternativas más utilizadas en investigaciones académicas para la

estabilización del lodo, cuya principal función es eliminar microorganismos patógenos por medio del aumento de la temperatura producto del ambiente natural. Para acelerar el proceso y para hacerlo más productivo se emplean soportes que aumentan la cantidad de nutrientes y colaboran con la aireación, se hacen volteos periódicos para que la temperatura aumente uniformemente en toda la pila, ya que actúa en función inversa a la humedad. Estos factores se deben conservar constantes para asegurar un proceso óptimo (Mazzarino, 2000).

La investigación que da origen a este artículo se enfoca en el análisis del proceso de compostaje de biosólidos por pilas de volteo, donde se estudian tres pilas en la etapa inicial, a las que se les incorporó materiales de enmienda (cáscara de huevo, caña, pasto) y de soporte (aserrín, viruta) los cuales se implementaron para acelerar el proceso. Durante el proceso se determinan las propiedades físicas (temperatura, pH y humedad), las cuales se verifican diariamente para determinar la estabilidad del material, y posteriormente se llevan a cabo análisis microbiológicos (salmonella, *E. coli*, coliformes totales) para determinar la reducción de patógenos (Valencia, 2012, p. 87).

Finalmente, como resultado se obtiene el análisis de las variaciones de las características físicas y microbiológicas del lodo, con las cuales se determina con cuál tipo de material de soporte se presenta una mayor eliminación de patógenos.

## Metodología

El biosólido procede de la digestión anaerobia y deshidratación del lodo primario del tratamiento primario avanzado (TPA), proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) El Salitre, de la ciudad de Bogotá, la cual recibe una alta carga de agua doméstica, por lo cual los biosólidos producidos tienen altos contenidos de materia orgánica y bajo contenido de metales pesados. La producción total de lodos en la PTAR en base húmeda es de aproximadamente  $160 \text{ ton/mes}$  ( $90 \text{ ton/mes}$  en base seca).

El estudio se desarrolló durante los meses de septiembre a febrero de 2014 en una planta piloto de compostaje diseñada en las instalaciones de

la Universidad Santo Tomás, seccional Tunja, con un área total de 11,76 m<sup>2</sup>, donde se construyeron tres pilas cada una con un área de 1 m<sup>2</sup> con capacidad para almacenar un volumen inicial de 1 m<sup>3</sup> de mezcla de biosólidos con material de soporte y enmienda; las pilas se construyen con espaciamentos de 1,2 m entre ellas (Figura 1). Adicionalmente, se elaboran zanjas de conducción alrededor de las pilas de acuerdo a las pendientes propias del terreno, para tener control de lixiviados y aguas lluvias. Finalmente, se estructura el techo con una cubierta de plástico no pigmentado tipo invernadero calibre 7, para permitir el paso de la luz solar y lograr el efecto invernadero que favorece la digestión.

Los materiales de soporte y enmienda se seleccionan teniendo en cuenta condiciones como su disponibilidad sin costo, dado que se consideran materiales de desecho y el aporte de material orgánico con un importante contenido nutricional (Torres et al., 2007, 2004). Con base en lo anterior y con la finalidad de buscar la estabilidad y manejabilidad del biosólido, el material de soporte utilizado para esta investigación es una mezcla de aserrín y viruta de madera en iguales proporciones y como materiales de enmienda se seleccionan poda de pasto, caña de maíz y cáscara de huevo, en diferentes proporciones, las cuales se utilizaron en cada una de las pilas (Tabla 1).

**Tabla 1.** Cantidades de material de soporte y enmienda

Pila	Relación (B/S/E)	Volumen de la pila ( )			
		Biosólidos (B)	Soporte (S)	Enmienda (E)	Total
Cáscara de huevo	1:0.3:0.7	0,5	0,35	0,15	1
Caña de maíz	1:1:0.8	0,35	0,35	0,3	1
Poda de pasto	1:10.8	0,35	0,35	0,3	1

Fuente: Elaboración propia

Luego de conformar las pilas con las características adecuadas para el compostaje se realizaron volteos cada dos semanas en la etapa termofílica y cada una o dos semanas en la etapa de maduración, en función del comportamiento de las variables físicas (Mazzarino et al., 2009); este procedimiento permitió remover periódicamente la mezcla para homogeneizarla, mejorar la ventilación y regular la temperatura y la humedad (Torres et al., 2007).

La toma de muestras se realizó manualmente de acuerdo a la metodología planteada por Semanart (2002), para el muestreo de biosólidos y lodos se recolectaron seis muestras a lo largo del proceso para realizar un seguimiento de las variables físicas (pH, temperatura y humedad) y microbiológicas (coliformes fecales, coliformes totales y salmonella) las cuales fueron enviadas al laboratorio para su evaluación, en la tabla 2 se observa la periodicidad del muestreo.

**Tabla 2.** Periodicidad y métodos para la toma de datos y muestras

Variable	Periodicidad de toma	Método para la toma
Temperatura	Diario	Manual con multiparámetro
pH	Diario	Manual con multiparámetro
Humedad	Semanal	I.N.V.E-122-07
Volumen	Semanal	Manual con cinta métrica
Volteos	Dependiente de la fase	Manual

Variable	Periodicidad de toma	Método para la toma
Coliformes fecales	Mensual en etapa de maduración	SM 9221 B, E
Coliformes totales	Mensual en etapa de maduración	SM 9221 B
Salmonella	Mensual en etapa de maduración	Enriq/siembra medio selectivo

Fuente: Elaboración propia

La toma de datos de los parámetros físicos se realizó con un multiparámetro marca HANNA (modelo HI98197 CE/TDS/resistividad/salinidad), que cuenta con un sensor para la medición del pH, la temperatura y conductividad; para el caso de la humedad se tomaron muestras de acuerdo a la norma I.N.V.E-122-07 para determinar el contenido de agua del material comparando su peso húmedo y su peso seco. Este procedimiento se realizó en las instalaciones del Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja.

## Resultados y Discusión

### Caracterización inicial del biosólido.

Los datos de la caracterización del biosólido de la PTAR El Salitre Bogotá se obtuvieron del Laboratorio de Análisis Microbiológicos de la PTAR, donde clasifican el biosólido como residuo de clase B debido al contenido de metales pesados y patógenos (Tabla 3). Este biosólido es monitoreado periódicamente por la empresa con el fin de verificar el comportamiento y sus características físicas, químicas y microbiológicas (Acueducto de Bogotá, 2000).

**Tabla 3.** Concentración microbiológica

Parámetro	Promedio
Coliformes fecales (UFC/g Base Seca)	6,88E+05
Fagos somáticos (PFP/4g Base Seca)	2,43E+06
Salmonella (NMP/4g Base Seca)	0,80

Fuente: Acueducto de Bogotá (2000)

### Variables microbiológicas y remoción de microorganismos.

De acuerdo al Decreto 1287 de 2014 en Colombia (Minvienda, 2014), el biosólido inicial se caracteriza evaluando coliformes totales, coliformes fecales y presencia de salmonella. Con base en esta información se determinó el porcentaje de remoción microbiológica al comparar la caracterización inicial con los resultados de la caracterización final del proceso de compostaje (NTC-5167). De acuerdo con los resultados obtenidos se puede determinar que los biosólidos provenientes de la PTAR El Salitre presentaron valores superiores a los permitidos por la legislación colombiana actual (véase la Tabla 4).

**Tabla 4.** Caracterización microbiológica del biosólido inicial

Ensayo	Valor obtenido	Valor max. Colombia	Valor max. Epa	Und.	Método
Coliformes totales (A)	20x10 <sup>6</sup>	1,00 E(+3)	<1000	NMP/100 mL	SM 9221 B
Coliformes fecales (A)	36x10 <sup>5</sup>	1,00 E(+3)	<1000	NMP/100 mL	SM 9221 B, E
Salmonella	35	Ausencia	Ausencia	NMP/100 mL	Enriq/Siembra medio Selectivo

Fuente: Elaboración propia

Los más altos de remoción de carga microbiológica se presentaron en la pila con cáscara de huevo; las pilas con poda de pasto y caña de maíz presentaron reducciones importantes. Sin embargo, no alcanzaron a cumplir con los máximos permitidos por el Decreto 1287 de 2014 de Colombia; la remoción de salmonella no fue efectiva por lo cual su contenido aumentó (Figura 1).

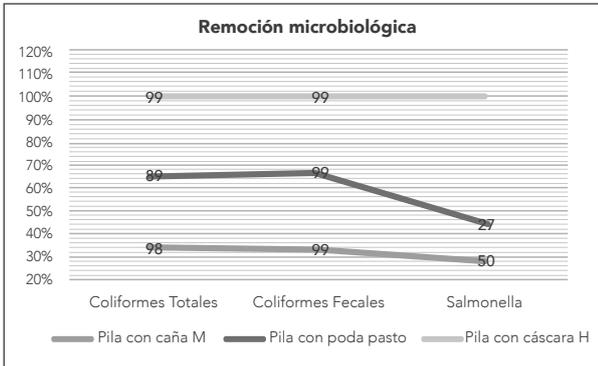


Figura 1. Porcentaje de remoción de microorganismos patógenos.  
Fuente: Elaboración propia

### Variables físicas.

La Figura 2 muestra el comportamiento de la disminución de la humedad. Al comparar el peso inicial y final de las pilas se alcanzó una reducción de humedad aproximadamente del 35 % al 57 %, estos porcentajes concuerdan con los recomendados por el Icontec (2003) y las NTC (5167) para ser usados como en la industria agrícola como abonos orgánicos, fertilizantes y acondicionadores. Adicionalmente, estos resultados demuestran que la técnica del compostaje es una alternativa de estabilización de la materia orgánica (Tchobanoglous, Burton y Stensel, 2003) y favorece la disposición final adecuada porque disminuye el volumen, los olores y la proliferación de otros agentes patógenos.

Cuando la humedad presentó valores entre el 40 % y 65 % se presentaron las temperaturas más altas, mientras que al presentarse valores superiores o inferiores a este rango la temperatura tiende a disminuir.

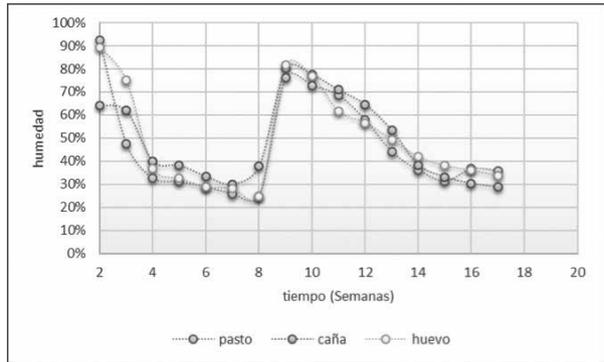


Figura 2. Variación de la humedad.  
Fuente: Elaboración propia

Respecto a los valores de temperatura, la pila de caña de maíz registró las temperaturas más altas y por consiguiente rangos de humedad más bajos, las otras dos pilas presentaron menores temperaturas y rangos de humedad. Es importante resaltar que la oxigenación de las pilas obtenida a partir de los volteos del material favoreció la pérdida de humedad y volumen y el control de la temperatura (Figura 3).

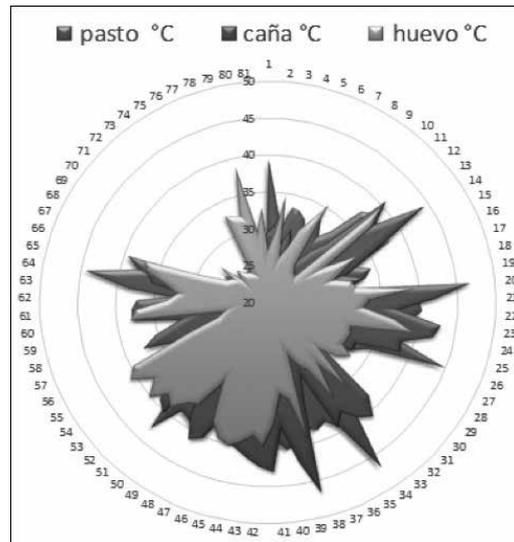
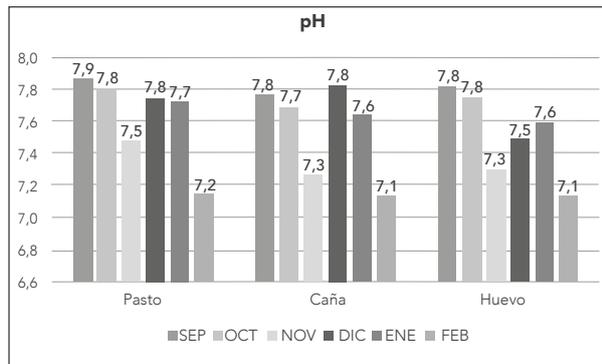


Figura 3. Variación de la temperatura en grados centígrados

Fuente: Elaboración propia

Con el monitoreo de los valores de pH se obtiene una medida indirecta del control de la aireación de la mezcla, ya que al existir en las pilas condiciones anaeróbicas se liberan ácidos orgánicos que provocan el descenso del pH (Suler y Finstein, 1977). En este mismo sentido, Suler y Finstein (1977) establecieron una relación entre los cambios de pH y la aireación de la mezcla y concluyeron que un compostaje con la aireación adecuada conduce a productos finales con un pH entre 7 y 8 (Figura 4); valores más bajos del pH son indicativos de fenómenos anaeróbicos y de que el material aún no está maduro. En la Figura 4 se muestra que los valores de pH obtenidos en las tres pilas



se encuentran dentro del intervalo recomendado para lograr un óptimo proceso de compostaje.

Figura 4. Variación del pH. Fuente: Elaboración propia

### Relación entre variables físicas y microbiológicas.

Se ha evidenciado una relación entre las condiciones físicas (pH, humedad y temperatura) y el proceso de latencia, crecimiento y muerte de microorganismos. Dicha relación establece unos parámetros en lo que los patógenos tienen un ambiente óptimo para su crecimiento con respecto a la temperatura, pH y humedad (Valencia, 2012). En este mismo sentido, Suler y Finstein (1977) estudiaron las relaciones pH-aireación-microorganismos existentes en el proceso y dedujeron que la degradación orgánica se inhibe a pH bajos, por tanto, cuando el pH se mantiene por encima de 7,5 durante el proceso es síntoma de una buena descomposición.

Para analizar el comportamiento de la relación de la variable física temperatura con respecto a las variables microbiológicas (coliformes totales, coliformes fecales y salmonella), se hizo un promedio de los datos registrados diariamente y la remoción de microorganismos de todo el proceso (Figura 5). Esta relación permite analizar la importancia de resaltar el parámetro de la temperatura, que tradicionalmente se considera como una variable fundamental en el control del compostaje (Liang, Das y McClendon, 2003; Miyatake e Iwabuchi, 2006), porque, de acuerdo con los autores, la evolución de la temperatura representa muy bien el proceso de compostaje, ya que se ha comprobado que pequeñas variaciones de temperatura afectan más la actividad microbiana que pequeños cambios de la humedad, el pH o C/N.

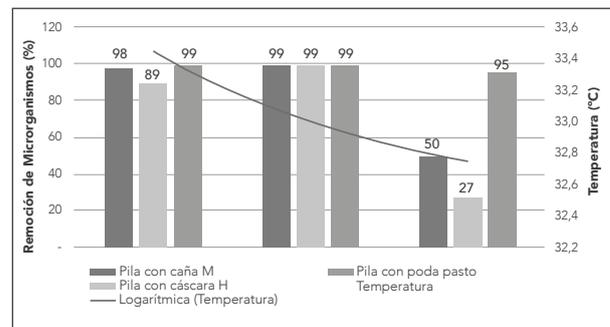


Figura 5. Remoción de microorganismos en relación con la temperatura. Fuente: Elaboración propia

Los valores de remoción de las variables microbiológicas y parasitológicas indican cómo es el desarrollo del sistema de compostaje en el mejoramiento de la calidad del biosólido. En este proceso se pudo determinar que el compostaje se muestra como una potencial alternativa de tratamiento para la reducción de la carga microbiológica contaminante, al obtener porcentajes de remoción superiores al 95 % en las pilas de caña y cáscara de huevo.

### Pila con caña de maíz

Las pilas con un volumen de 1 m<sup>3</sup> propician el crecimiento de los microorganismos estudiados, es decir, coliformes totales, coliformes fecales y salmonella. Los rangos de las variables físicas que presentó la pila con soporte de caña de maíz fueron:

temperaturas entre 20 y 35 °C, con pH entre 6,5 y 8 y humedades entre 30 y 40 %. Por ello es importante mencionar que la temperatura ambiente en el lugar donde se realizó la experiencia es variable todo el año y presenta un promedio anual entre 13,7 °C y 11,9 °C. Lo anterior sugiere que este factor puede haber influido en que las temperaturas máximas de las pilas no alcanzaran los registros comunes para el compostaje de lodo. Aun así, se observa la disminución de microorganismos patógenos, en este caso se estima que el factor coadyuvante para que se presente la reducción es el porcentaje de material de soporte y enmienda, que supera el 50 % frente a los biosólidos, elemento que difiere de las otras investigaciones evaluadas, donde el material de soporte y enmienda usualmente se propone en 30 % o 35 %.

Los valores de temperatura más altos se presentaron en el mes de noviembre, para este mes se obtuvieron valores de humedad superiores al 60 %, mientras que los valores más bajos de temperatura se registraron en los meses de septiembre, enero y febrero, cuando los datos de humedad fueron los máximos y mínimos respectivamente y estuvieron por encima del 65 % y por debajo del 40 %. Entre enero y febrero se observa un ascenso de la humedad, pero un descenso en la temperatura, lo que no concuerda con lo establecido anteriormente. Esto se presenta por la disminución de volumen que para estos meses fue del 60 % con respecto al volumen inicial.

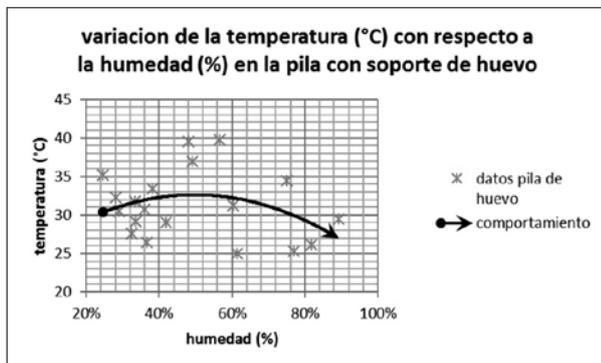


Figura 6. Variación de la temperatura con respecto a la humedad.  
Fuente: Elaboración propia

### Pila con poda de pasto

El comportamiento del contenido de microorganismos no se reduce de forma constante, de hecho presenta un aumento entre las muestras. El comportamiento de la temperatura, la humedad y el pH es similar a la pila con caña de maíz.

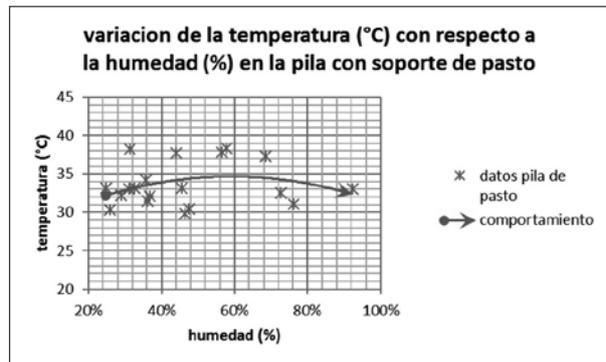


Figura 7. Comportamiento variables físicas y microbiológicas en pilas con poda de pasto.  
Fuente: Elaboración propia

**Pila con cáscara de huevo** En los meses en los que se realizaron las pruebas de laboratorio, la pila con cáscara de huevo tuvo los mejores resultados microbiológicos con el mayor porcentaje de remoción entre las tres pilas, donde los valores registrados para las variables físicas en los meses son parecidos a los presentados por las pilas de biosólidos con poda de pasto y caña de maíz, la tendencia con respecto a las variables físicas sigue siendo la misma. Además, se encuentra que, con la reducción de humedad, el contenido de patógenos tiende a disminuir y que cuando se encuentra entre los rangos óptimos (40 a 60 %) la temperatura aumenta.

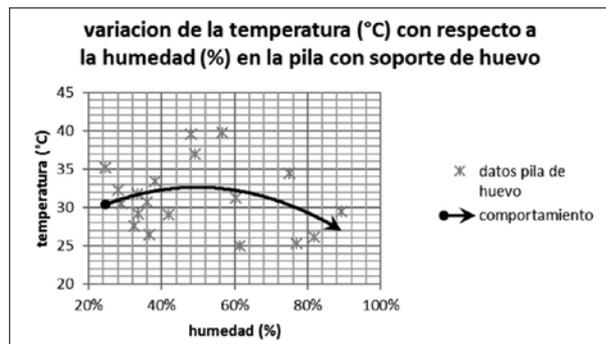


Figura 8. Comportamiento de variables físicas y microbiológicas en pilas con cáscara de huevo.  
Fuente: Elaboración propia

## Conclusiones

Con esta investigación se pudo determinar que es posible profundizar en la investigación del compostaje de biosólidos provenientes de plantas de tratamiento de agua residual. Además, se demostró que se puede compostar este material en pilas menores a 1 m<sup>3</sup> y se presentaron reducciones en las variables microbiológicas a las que hacen referencia algunas normas para la disposición de este material. Los resultados obtenidos en esta investigación demostraron que el compostaje de biosólidos con implementación de material de soporte cáscara de huevo es una alternativa de uso beneficioso, ya que logra remover la carga microbiológica patógena. En este sentido, cabe resaltar que se logra clasificarlo según el Decreto 1287 como clase A y por lo tanto hacer uso de él en la agricultura.

El resultado de esta investigación puede ser adoptado por plantas de tratamiento de agua residual cuya producción de biosólidos sea pequeña. Es importante que en futuras investigaciones se pueda confirmar efectivamente la existencia de una relación entre la temperatura ambiente y el proceso de compostaje de lodo, pues como se observó en los resultados, la temperatura no superó los 45 °C. Los resultados de pH obtenidos en esta investigación muestran que se mantiene en los rangos aptos (6,5-8) para el uso en la agricultura, según la NTC 5167, en el caso del material compostado en todas las pilas. Con el cambio de las dimensiones y cantidades de material para cada pila, las variables microbiológicas y físicas se comportan de manera diferente a las establecidas por otros autores, pero se genera disminución de patógenos, lo que significa que la temperatura no es el único factor implicado en la reducción de patógenos y se puede afirmar que cada uno de ellos actúa como variable independiente frente a la reducción.

La pila con cáscara de huevo arrojó valores apropiados en cuanto a contenido de microorganismos patógenos con respecto a los máximos permisibles por el Decreto 1287 de 2014, lo que cataloga el compost resultante como clase A, al igual que la norma de USEPA título 40 parte

503, según la cual puede ser apto para el uso en la agricultura.

La pila con poda de pasto disminuyó el contenido de coliformes totales y fecales, pero aumentó el contenido de salmonella, no alcanzó los valores máximos permisibles por el Decreto 1287 de 2014, por lo tanto su uso es restringido.

La pila con caña de maíz aumentó el contenido de salmonella y disminuyó el contenido de coliformes fecales y totales, pero no alcanzó los parámetros establecidos por el Decreto 1287 de 2014, aunque es catalogado como lodo clase B, según la norma de la USEPA, título 40 parte 503, que lo hace apto para uso agrícola con ciertas restricciones.

Se obtuvo un compost estable, esto se puede asegurar por sus condiciones y por los registros similares en investigaciones en cuanto a olor y color: su olor parecido al de tierra mojada y casi imperceptible y su color café oscuro, por lo que está entre los rangos necesarios para compostaje (Valencia, 2012).

Los resultados obtenidos a partir de esta investigación demuestran que el compostaje de lodo en pilas menores o iguales a 1 m<sup>3</sup> es factible, siempre y cuando se utilicen materiales de soporte y enmienda en cantidades adecuadas y se controle el tiempo de volteos y las variables físicas. Estas variables son definitivas para elaborar un compost estable; para obtener un material clase A la relación que logró cumplir fue: 0,5 de lodo, 0,35 de soporte y 0,15 de enmienda.

## Referencias

- Acosta P. (2015). Análisis de interferencia de parámetros físicos del agua, en desinfección por radiación UV. *Revista de Tecnología*, 14(2), 105-112.
- Acueducto de Bogotá (2000). Guía conceptual sobre la PTAR Salitre. Bogotá. p. 10- 11.
- Icontec (2003). Norma Técnica Colombiana NTC 5167, Productos para la industria agrícola y materiales usados como fertilizantes y acondicionadores. Colombia.

- Liang, C., Das, K. y McClendon, R. (2003). The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend. *Biores. Technol.*, (86), 131-137.
- Mazzarino, M. (2000). Planta de compostaje de biosólidos: investigación y desarrollo en Bariloche, Argentina. *Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, (50), 86-89.
- Mazzarino, M. (2012). *Compostaje de biosólidos*. Bariloche, Argentina: Orientación Gráfica editora.
- Mazzarino, M., Satti, P., Laos, F., Roselli, L., Crego, M. P., Kowaljow et al. (2009). *Compostaje de biosólidos: 12 años de la planta de Bariloche*. En M. J. Mazzarino y P. Satti (Eds.), *Compostaje en la Argentina: Experiencias de producción, calidad y uso* (pp. 99-105). Buenos Aires: Orientación Gráfica editora.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia (Minvivienda) (10 de julio, 2014). Decreto 1287. Por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. *Diario Oficial*, 49.208. Bogotá.
- Miyatake, F. y Iwabuchi, K. (2006). Effect of compost temperature on oxygen uptake rate, specific growth rate and enzymatic activity of microorganisms in dairy cattle manure. *Biores. Technol.*, (97), 961-965.
- Monsalve, M. Delgado, E. y Giraldo, E. (2004). *Modelación del compostaje de biosólidos en pila estática aireada*. Bogotá: Centro de Investigaciones en Ingeniería Civil y Ambiental (CIIA). Universidad de los Andes.
- Quinchía A. y Carmona, D. (2004, jul.-dic.). Factibilidad de disposición de los biosólidos generados en una planta de tratamiento de aguas residuales combinada. *Revista EIA*, (2), 90-107.
- Ramírez M. (2007). Valorización energética de biosólidos. Algunos aspectos económicos y ambientales en la EDAR Guadalhorce (Málaga). *Residuos*, (98), 60-67.
- Suler, D. y Finstein, S. (1977). Effect of temperature, aeration, and moisture on CO<sub>2</sub> formation in Bench-Scale, continuously thermophilic composting of solid waste. *Appl. Environ. Microbiol.*, 33(2), 345-350.
- Tchobanoglous, G., Burton, F. y Stensel, H. D. (2003). *Wastewater Engineering. Treatment and Reuse*. (4th ed.). Washington: McGraw Hill. Metcalf & Eddy, Inc.
- Torres, P., Escobar, J., Pérez, A., Imery, R. y Uribe, I. (2004). Evaluación de la tecnología de compostaje para el aprovechamiento de los biosólidos generados en la PTAR-Cañaveralejo de Emcali. *Eice Esp. Colciencias*, Universidad del Valle, Emcali, OCyT, BID y Fundación Biociedad. Cali, Informe final.
- Torres, P., Pérez, A., Escobar, J., Uribe, I. e Imery, R. (2007, ene.-abr.). *Compostaje de biosólidos de plantas de tratamiento de agua residual*. *Eng. Agríc.*, Jabolicabal, 27(1), 267-275. Cañaveralejo, Cali.
- Valencia, J. (2012). *Estudio para la viabilidad técnica de compostaje a partir de biosólido seco proveniente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR*. (Trabajo de grado). Universidad de San Buenaventura, Facultad de Administración Agroindustrial, Cali.