

ESTABILIZACIÓN ALCALINA DE BIOSÓLIDOS COMPOSTADOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS PARA APROVECHAMIENTO AGRÍCOLA

ALKALI STABILIZATION OF COMPOSTED BIOSOLIDS FROM DOMESTIC WASTEWATER TREATMENT PLANTS FOR AGRICULTURE PURPOSE

Patricia Torres Lozada¹, Carlos Arturo Madera Parra² y Genny Virginia Martínez Puentes³

Resumen. Uno de los limitantes del aprovechamiento agrícola de lodos y biosólidos producidos por plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas – PTAR es su calidad microbiológica y parasitológica. Se evaluó la estabilización alcalina del compost obtenido a partir la planta de tratamiento de aguas residuales Cañaveralejo de Cali, Colombia (PTAR-C), utilizando ceniza de calderas de una industria papelera, Cal Hidratada (CH) y Cal Viva (CV), en combinaciones con el compost del 8, 15 y 30% para CH y ceniza y de 15% para CV, en proporciones peso a peso. Durante 13 días se monitoreó temperatura, pH, humedad, coliformes fecales y huevos de helmintos. Los resultados obtenidos mostraron que CV y CH al 15% lograron elevar el pH a 12 unidades por más de 72 horas y obtener cero huevos de helmintos viables, lo que muestra una eficiente reducción de patógenos y el alcance de estándares para compost clase A, lo que no se alcanzó con la ceniza en las proporciones evaluadas. En términos de humedad, CV al 15% presentó mejor desempeño que CH, la cual requirió un 30% y de 3 a 5 días para reducir la humedad hasta el 20% sugerido para la aplicación agrícola de compost. Es recomendable evaluar rangos entre 8 y 15% de CV y CH, otras cenizas alcalinas y mezclas para reducir tiempos de tratamiento, requerimientos de área y costos, además considerar la remoción de otros indicadores en plantas y humanos como fitopatógenos y Salmonella.

Palabras claves: Aprovechamiento de biosólidos, compostaje, estabilización alcalina, reducción de patógenos, cal, ceniza.

Abstract. The limitation for agriculture use of sludge and biosolids from wastewater treatment plants is the microbiological and parasitological quality. Alkali stabilization was evaluated in produced compost from biosolids of Cañaveralejo wastewater treatment plant (PTAR-C), based in Cali, Colombia. Ashes, quick and slake lime were applied to compost. Doses of 8, 15 and 30% of ash and hydrated lime and 15% of quick lime were the concentration (in weight) used; during 13th days T°C, pH, humidity, faecal coliforms and helminths eggs were monitored. The results show that for both limes at 15% the pH arise to 12 and keep it for more than 72 hours and helminths eggs were zero, revealing that very good pathogens removal efficiency and met the class A standard, conditions that was not achieve for ash in all evaluated concentrations. Regarding with humidity, quick lime (15%) obtained better performance that hydrated lime, only comparable with 30% valour and required 3 to 5 days for reduce the humidity until 20%, recommendable value for application of compost in agriculture. Is recommendable evaluate ranges between 8 to 15% of quick lime, other type of ashes, mixture between alkali products in order to improve the performance and reduce of treatments time, area requirements and cost also consider other microbiological indicators for plants and humans as Salmonella and phytopatogenic.

Key words: Alkali stabilization, ash, biosolids reuse, compost, lime, pathogen reduction.

La depuración de aguas residuales genera lodos y biosólidos según el nivel de tratamiento; los primeros hacen parte del conjunto descriptor de procesos y el término es utilizado antes de que un criterio de uso benéfico haya sido alcanzado; los biosólidos son los lodos que pueden ser empleados benéficamente después de ser sometidos a procesos de estabilización

(Metcalf y Eddy, 2003). El tipo de tratamiento a aplicar dependerá de su composición y del potencial aprovechamiento o forma de disposición final. Los lodos y los biosólidos tienen alto potencial de aprovechamiento agrícola debido a que mejoran los niveles de materia orgánica, de macro y micronutrientes (Andreoli *et al.*, 2001); sin embargo,

¹ Profesora Asociada. Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Ciencias del Medio Ambiente y Hábitat. A.A. 25360, Cali, Colombia <patoloz@univalle.edu.co>

² Profesor Asistente. Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Ciencias del Medio Ambiente y Hábitat. A.A. 25360, Cali, Colombia <cmadera@univalle.edu.co>

existen riesgos por la potencial presencia de sustancias tóxicas como metales pesados (arsénico, cadmio, cromo, cobre, mercurio, níquel, plomo, selenio, zinc) (Ramírez *et al.*, 2007) y microorganismos patógenos presentes en el agua residual (Guzmán y Campos, 2004). Adicionalmente, su inadecuada aplicación, puede ir en detrimento del crecimiento y producción de algunas especies vegetales (Ramírez y Pérez, 2006).

La presencia de microorganismos patógenos hace necesario, además de los procesos biológicos de digestión, un proceso adicional de estabilización, también llamado de desinfección o higienización para que sus características sanitarias sean

compatibles con su uso (Fernandes y de Souza, 2001).

La Norma 40 CFR parte 503 (Environmental Protection Agency (EPA), 2003) clasifica los biosólidos en dos Tipos (A y B) de acuerdo con la concentración de metales y la cantidad de microorganismos patógenos presentes; la Tabla 1 muestra las características de estos materiales. En Colombia se encuentra en revisión la resolución sobre los lodos estabilizados generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), para su incorporación en forma técnica y ambiental al ciclo económico productivo (MINAMBIENTE, 2006).

Tabla 1. Valores límites recomendados por la EPA Norma CFR 40 Parte 503 para biosólidos.

Constituyentes	Concentración máxima (mg/kg)	Calidad microbiológica Tipo A*	Calidad microbiológica Tipo B**
Arsénico	75		
Cadmio	85		
Cobre	4300		
Plomo	840		
Mercurio	57		
Molibdeno	75		
Níquel	420		
Selenio	100		
Zinc	7500		
Microbiológico			
Coliformes fecales (UFC/g)		< 10 ³	< 2x10 ⁶
<i>Salmonella</i> sp (UFC/g)		3/4	-
Huevos de helmintos/g		1/4	-

* Pueden ser utilizados sin restricción en agricultura y en jardines

** Aplicados con restricciones para contacto público directo, en zonas para revegetación o como material de cobertura en rellenos sanitarios

Fuente: EPA, 2003.

Con la estabilización alcalina se pretende aumentar el pH por encima de 12 unidades y mantenerlo durante 72 horas como mínimo, para lograr la reducción significativa de patógenos y la estabilización del lodo; adicionalmente, este valor de pH sobrepasa los límites de tolerancia para el crecimiento y supervivencia de organismos tan resistentes como los huevos de helmintos (EPA, 2003).

La cal ha sido el producto de mayor uso para este fin, aunque también se ha recurrido a mezclas de cal con cenizas de horno y cenizas volantes. La cal es un producto que comercialmente se encuentra principalmente en dos presentaciones: cal viva (CaO) y cal hidratada (Ca(OH)₂), siendo la primera

la más utilizada en Brasil; estos productos generan un aumento de la temperatura y producen iones hidróxido que aumentan el pH (Andreoli *et al.*, 2001). Debido a que el uso de cal puede no ser económico a nivel macro, hay autores que proponen mezclarla con subproductos industriales como la ceniza, con bajos niveles de metales y que no disminuyan el proceso de reducción de patógenos (Boost y Poon, 1998). La ceniza es un material mineral generado en calderas, cuya proporción y composición química depende principalmente de la procedencia del carbón (Muñoz *et al.*, 2006); su efecto alcalinizante depende de la cantidad de ceniza usada, de su origen y de los compuestos disponibles para la generación de iones de hidróxido (Vinneras *et al.*, 2003), siendo los

compuestos más importantes los óxidos de calcio y de magnesio (Andreoli *et al.*, 2001).

Jiménez, Barrios y Maya (1999), evaluaron cal viva e hidratada en pro-porciones peso a peso entre 15% y 40%, en lodos de tratamiento primario avanzado (TPA) previamente deshidratados (71%–86% de humedad) de una PTAR piloto, alcanzando pH mayores a 12 unidades con los dos materiales en dosis superiores a 20% y removiendo entre 98 a 99% de coliformes fecales (alrededor de 10^3 UFC/g) y 50 a 75% de huevos de helmintos (entre 1 y 10 HH/g); los lodos presentaron características de biosólidos Tipo B.

Moeller, Ferat y López (2005) utilizaron cal hidratada (CH) en una proporción volumen a volumen de 30% CH en 100 ml de biosólido digerido en condición anaerobia de la PTAR de Chapultepec, para elevar el pH a 12 unidades en un tiempo de exposición de 2 horas, reduciendo los coliformes fecales de $1,1 \times 10^7$ a $1,81 \times 10^2$ UFC/g, lo que permitió clasificarlo como biosólido Tipo A.

Madera *et al.* (2002) emplearon cal viva para mejorar la calidad microbiológica de lodos digeridos de una laguna anaerobia en Ginebra, Colombia, empleando dosis de 20, 40 y 60% (peso a peso), encontrando una remoción del 100% en coliformes fecales y huevos de helmintos para todas las dosis de cal aplicada.

Estudios realizados en Vietnam y Etiopía con ceniza (Carlander y Westrell, 1999 y Karlson and Larson, 2000, citados por Vinneras, Björklund y Jönsson, 2003), mostraron disminución de coliformes fecales en materia fecal de aproximadamente $1,0 \times 10^8$ hasta $1,0 \times 10^2$ después de 7 semanas de contacto. Aunque se conoce que este material ha sido utilizado en comunidades para la reducción de patógenos aplicado directamente sobre la materia fecal (Schönning y Stenström, 2004), no se conocen estudios con este material realizados específicamente en biosólidos.

Se presentan los resultados obtenidos en la evaluación a escala piloto de la higienización por estabilización alcalina utilizando cal viva (CV), cal hidratada (CH) y ceniza de calderas de una industria papelera, del compost producido con el biosólido deshidratado proveniente de la digestión anaerobia

Tabla 2. Características promedio de los materiales alcalinizantes empleados para la estabilización del biosólido producido por la PTAR-C de Cali, Colombia.

del lodo primario del sistema de Tratamiento Primario Avanzado (TPA) de la PTAR Cañaveralejo (PTAR-C) de la ciudad de Cali, Colombia, la cual trata las aguas residuales de aproximadamente 2,1 millones de habitantes, produciendo en promedio 100 ton biosólidos/día. (Empresas Municipales de Cali (EMCALI), 2005). La investigación se realizó con el fin de mejorar la calidad microbiológica y parasitológica e incrementar el potencial de aprovechamiento agrícola.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio fue desarrollado en una planta piloto ubicada en las instalaciones de la PTAR Cañaveralejo – PTAR-C de la ciudad de Cali, Colombia, en un área de aproximadamente $102,62 \text{ m}^2$. El proceso de compostaje del biosólido deshidratado producido en la PTAR-C fue realizado en escala piloto, en pilas de 1,5 toneladas con un duplicado, ubicadas aleatoriamente.

Diseño experimental y unidades experimentales.

Las unidades experimentales fueron celdas de madera de 0,5m de ancho, 0,4 m de largo y 0,4 m de alto y espaciamiento entre las unidades de 0,4 m, las cuales se ubicaron aleatoriamente sobre un piso en cemento. Cada tratamiento fue evaluado por duplicado. Se empleó como diseño experimental el completamente al azar donde se asume que todas las unidades experimentales son homogéneas y los tratamientos fueron asignados de manera aleatoria, para lo cual se utilizó una calculadora científica. Esta condición se consideró para las características microbiológicas y parasitológicas del sustrato.

Sustrato. El sustrato evaluado fue el compost producido con el biosólido de la PTAR – C, el cual fue caracterizado en términos de pH, humedad, carbono orgánico, nitrógeno total, fósforo total, potasio, coliformes totales y fecales, siguiendo los procedimientos analíticos de American Public Health Association (APHA, AWWA, WPFC, 1998); los huevos de helmintos fueron determinados por el método de Bailenger Modificado (Bailenger, 1979).

Material alcalinizante. Fueron utilizados cal viva (CV), cal hidratada (CH) y ceniza de caldera de una industria papelera, cuyas composiciones son mostradas en la Tabla 2.

Constituyentes	*Cal Viva (%)	*Cal Hidratada (%)	**Ceniza (%)
Oxido de Calcio (CaO)	91,8 – 95,5	67 -70	0,69
Hidróxido de Calcio Ca(OH) ₂	-	90,0	-
Oxido de Magnesio (MgO)	0,47	0,46	0,81
Oxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)	-	-	28,81
Oxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)	-	-	8,45
Oxido de Sodio (Na ₂ O)	-	-	0,55
Oxido de Titanio (TiO ₂)	-	-	2,83
Silica (SiO ₂)	-	-	56,48
Pérdida por Ignición (LOI)	2,86	2,5	22,4

Fuente: (*) Caldesa S.A. (2006); (**) Ingeominas (2006).

Preparación de las mezclas. Las combinaciones de *compost* y material alcalinizante se prepararon en proporciones peso a peso con un total de 20 kg en cada celda, conformándose un total de 8 tratamientos con un duplicado, los cuales fueron ubicados al azar en la planta

piloto. Tanto el *compost* como el material alcalinizante fueron pesados y mezclados previamente para garantizar una mezcla homogénea e inmediatamente dispuestos en cada una de las celdas de acuerdo con las combinaciones mostradas en la Tabla 3.

Tabla 3. Proporciones de *compost* y material alcalinizante evaluado en el proceso de análisis de los biosólidos producidos por la PTAR-C de Cali, Colombia.

No. Tratamiento	Compost (%)	Material alcalinizante (%)
T1*	100	0
T2	92	8 – Cal hidratada (CH)
T3	92	8 – Ceniza (CN)
T4	85	15 – Cal viva (CV)
T5	85	15 – Cal hidratada (CH)
T6	85	15 – Ceniza (CN)
T7	70	30 – Cal hidratada (CH)
T8	30	30 – Ceniza (CN)

* En el estudio se consideró un testigo consistente en la proporción 100% sustrato (20 kg de *compost*) sin adicionar material alcalinizante.

Medición de parámetros. El período de exposición y monitoreo de los tratamientos fue de 13 días considerando el día de aplicación como el día 0. La Tabla 4 describe los parámetros, la frecuencia de medición y las técnicas de determinación.

recomienda la EPA (Environmental Protection Agency (EPA), 2003).

Los principales parámetros para la identificación de la efectividad del tratamiento fueron el pH y los coliformes fecales, observando si el primero se mantenía por encima de 12 unidades por un periodo mayor o igual a 72 horas como lo

La temperatura fue medida directamente en el interior de la celda en 3 profundidades y luego promediada. Para los otros parámetros, se tomaron porciones de material en 3 puntos aleatorios de la celda y se mezclaron (aproximadamente 90 g de muestra para pH y humedad y 100 g para los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos) para hacer más representativa la medición.

Tabla 4. Parámetros, frecuencias de medición y técnicas de determinación en la evaluación de *compost* obtenido a partir de biosólidos producidos por la PTAR-C de Cali, Colombia.

Parámetro	Unidades	Frecuencia	Técnica
Temperatura	(°C)	Día 0*: Hora cero, a las 4 horas y luego cada hora por 6 horas Días 1 al 6: 3 veces al día Días 7 al 13: 1 vez al día	Termómetro de bulbo de 30 cm
pH	(Unidades)	Día 0*: Hora cero, a la primera hora y a las 4 horas Días 1 al 2: 2 veces al día Días 3 al 13: 1 vez al día	Potenciométrico
Humedad	(%)	Una muestra los días 0*, 3, 8, 11 y 13	Gravimétrico
Coliformes totales y fecales	(UFC/g muestra)	Una muestra los días 0*, 6 y 13.	Filtración por membrana
Huevos de helmintos	(HH/g muestra)	Una muestra los días 0*, 6 y 13.	Método Baillenger modificado

* Día de inicio del ensayo, muestra colectada después de la mezcla con el alcalinizante.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Sustratos. La Tabla 5 muestra las características del biosólido, del compost producido y las características recomendadas del compost para su uso en la agricultura.

El biosólido utilizado en este estudio presenta características típicas de lodos digeridos (Fernandes y de Souza, 2001; Metcalf y Eddy, 2003), con excepción del porcentaje de humedad (70%), ya que es un biosólido sometido a deshidratación; la humedad natural de biosólido sin deshidratar es del orden del 90% a 95%. Las características microbiológicas y parasitológicas de este material son las de un biosólido Tipo B (EPA, 2003).

El compost producido presenta valores pH y humedad dentro del rango deseable para compost usados en agricultura (Soto, 2003 y Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), 2004) y presenta deficiencias en términos de los niveles de carbono orgánico y de la relación C/N de acuerdo con los valores recomendados para biosólidos Tipo A y Tipo B (Metcalf y Eddy, 2003 y CONAMA, 2004).

Estas deficiencias pueden ser corregidas con la mezcla con otros materiales. Estudios realizados con

los biosólidos de la PTAR-C han mostrado la potencialidad del uso de la cachaza del procesamiento de la caña de azúcar como un material de enmienda y del residuo de poda como un material de soporte (Torres *et al.*, 2007).

Aunque el compostaje permitió una reducción de organismos patógenos y parásitos del biosólido, los niveles encontrados sugieren la aplicación de una técnica complementaria de desinfección para obtener un producto Tipo A que pueda ser usado sin restricciones en la agricultura. Una probable causa de la baja remoción de patógenos en el compostaje puede estar asociada a las características granulométricas del biosólido (muy fino) que favorecen la formación de grumos, presentándose problemas de aireación por la falta de espacios intersticiales entre las partículas, impidiendo la total degradación del biosólido y por ende una disminución de la temperatura que es uno de los mecanismos asociados a la reducción de patógenos. Por esta razón, es recomendable combinar el biosólido con otro material (soporte) de granulometría más gruesa, que brinde una estructura más porosa al material a compostar como los residuos de poda, la cascarilla de arroz, entre otros (Fernandes y de Souza, 2001; Torres *et al.*, 2005). Con relación a la estabilización alcalina, una característica favorable del compost obtenido es que posee una textura manejable que favorece su mezcla y

homogenización con el material alcalinizante, a textura es grumosa y con tendencia a la diferencia del biosólido sin compostar, cuya compactación.

Tabla 5. Características del biosólido de la PTAR-C y del compost obtenido a partir del biosólido.

Parámetros	Unidades	Biosólido	Compost	Calidad recomendada *
pH	Unidades	6,5	6,1	5,0 - 7,5 (1)
Humedad	%	70	28,12	10-20 < 40 (2)
Carbono orgánico	%	18,5	12,0	> 26,1 Tipo A > 14,5 Tipo B (1)
N-Total	%	2,33	1,77	> 0,8 (1) > 2,0 (2)
Relación C/N	--	8,0	6,8	10-25 Tipo A 10-40 Tipo B (3)
Fosforo total	%	0,9	0,8	0,15-1,5 (1)
Potasio	%	0,08	0,08	0,0215 - 0,025 (4)
Coliformes totales	(UFC/g)	$1,6 \times 10^6$	$7,5 \times 10^4$	
Coliformes fecales	(UFC/g)	$5,2 \times 10^5$	$4,0 \times 10^3$	< $1,0 \times 10^3$ Tipo A (5)
Huevos de helmintos	(HH/g)	3	0	< 1/4 Tipo A (5)

* Calidad recomendada de compost para uso agrícola.

(1) CONAMA, 2004; (2) Soto, 2003; (3) Metcalf y Eddy, 2003; (4) Serapio y Bruzon, 1996 citados por Torres *et al.*, 2007; (5) EPA, 2003.

Comportamiento de las Mezclas en la Estabilización Alcalina

Temperatura. La temperatura tiene un efecto inhibitor sobre los microorganismos patógenos ya que su estructura puede ser modificada por

el efecto térmico (EPA, 2003). El comportamiento de este parámetro es mostrado en las Figuras 1a y 1b; la primera, muestra la variación durante las 24 horas iniciales y la segunda, la variación en los días restantes de la experimentación.

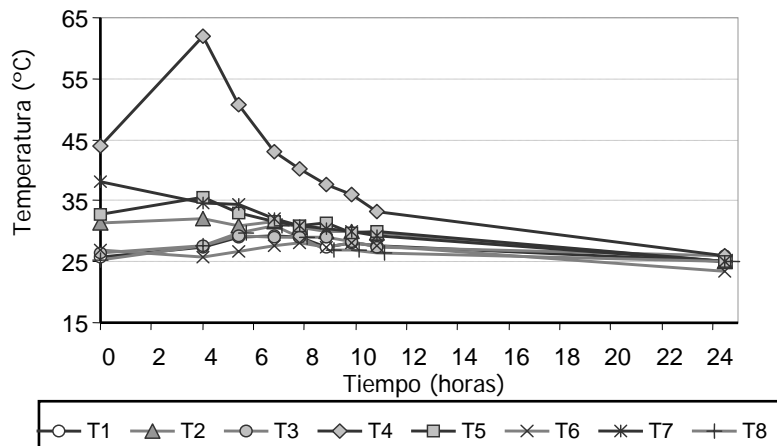


Figura 1 a. Variación de la temperatura del compost en las primeras 24 horas de tratamiento para la estabilización alcalina de biosólidos producidos por la PTAR-C de Cali, Colombia.

Figura 1 b. Variación de la temperatura del compost después del día 0 de tratamiento para la estabilización alcalina de biosólidos producidos por la PTAR-C de Cali, Colombia.

La temperatura del compost al inicio del ensayo fue de 26°C y no presentó variaciones significativas durante el periodo de experimentación; con excepción de la ceniza, la incorporación tanto de la CH como de CV en todas las proporciones evaluadas, causó una elevación instantánea y momentánea de la temperatura a valores hasta de 38°C en el caso de la CH (T7) y de 44°C en el caso de la CV (T4).

La incorporación de un 8% tanto de CH como de ceniza (T2 y T3), presentó un comportamiento similar al del testigo, lo que indica que la dosis de alcalinizante usada fue insuficiente para generar una variación de temperatura. Con una dosis de 15%, solamente la CV permitió elevar la temperatura de 44 hasta de 62°C en las primeras 4 horas de contacto con el compost; este comportamiento no se presentó ni con la CH ni con la ceniza en los porcentajes aplicados.

Con base en el comportamiento de la temperatura, el alcalinizante que presenta mejor desempeño es la CV, la cual libera calor en contacto con el agua presente en el lodo, inhibiendo el crecimiento y la presencia de patógenos (Clemente, Borges y Belettini, 2005); sin embargo, al ser mezclada con el lodo, el incremento de temperatura alcanzado no es suficiente para la reducción de patógenos, ya que se recomiendan valores superiores a 52°C

durante un tiempo mínimo de 72 horas (EPA, 2003). El hecho de que CV haya sido más eficiente que CH y que estas dos presentaran mejor desempeño que la ceniza, se debe probablemente a la composición en términos del porcentaje de óxido de calcio, el cual es superior al 90% en CV, entre 67 a 70% en CH e inferior al 1% en la ceniza.

pH. Además de la elevación del pH a valores superiores a 12 unidades para producir un efecto inhibitorio en los microorganismos patógenos presentes, es importante el tiempo de exposición a este cambio para determinar su poder desinfectante (Fernandes y de Souza, 2001); la EPA (2003), establece un tiempo de permanencia mínimo de 72 horas para garantizar este efecto.

Las Figuras 2a y 2b muestran el comportamiento del pH, donde se observa que el valor inicial del compost antes de la adición de los alcalinizantes era de 6,2 unidades (T1). Todos los tratamientos con cal generaron una elevación del pH a valores próximos de 12 unidades por periodos mayores a 4 días y mayores a 11,5 unidades durante todo el ensayo (13 días); en los porcentajes CV y CH 15% y CH 30% se observó la menor variación de pH y los valores se mantuvieron más cercanos a 12. En los tratamientos con ceniza (T3, T6 y T8), no se alcanzó el aumento del pH hasta el rango deseable.

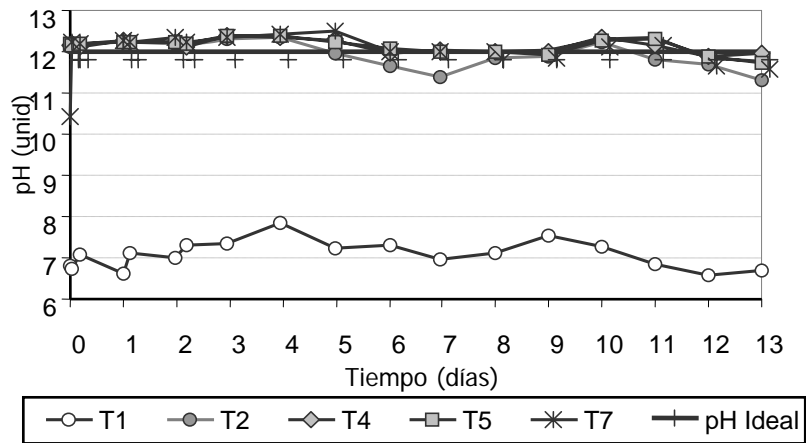


Figura 2 a. Variación del pH del compost al adicionar cal en el tratamiento de estabilización alcalina de biosólidos producidos por la PTAR-C de Cali, Colombia.

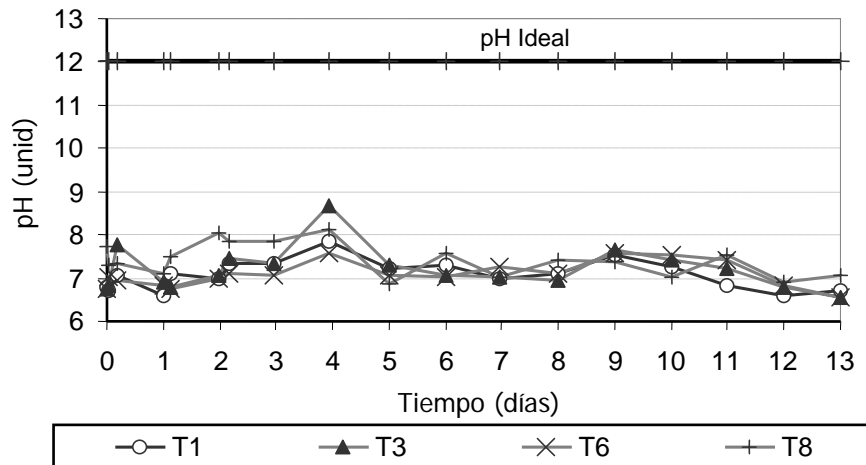


Figura 2 b. Variación del pH del compost al adicionar ceniza en el tratamiento de estabilización alcalina de biosólidos producidos por la PTAR-C de Cali, Colombia.

Humedad. Las Figuras 3a y 3b muestran los valores de humedad alcanzados durante el ensayo con los dos tipos de cal y con la ceniza respectivamente.

15% de cal viva (T4) y 30% de cal hidratada (T7) la reducción de la humedad fue instantánea con valores cercanos a 19,5% y llegando a valores finales de 9,5% y 9,9% respectivamente.

La humedad inicial del *compost* de aproximadamente 28%, se fue reduciendo durante el periodo del experimento llegando al final del ensayo a 19,07%. En el caso de la aplicación del

Considerando que se recomienda una humedad entre 10% y 20% para el uso agrícola del *compost* (Soto, 2003), todos los tratamientos evaluados se mostraron adecuados. Si la humedad esperada es

de 20%, T4 (15% CV) sería el mejor tratamiento por su efecto inmediato; los demás tratamientos de cal requieren un tiempo entre 3 y 5 días y los tratamientos de ceniza requerirán un tiempo mayor

de 8 días. La deshidratación puede favorecer el proceso de reducción de patógenos debido a que la sequedad del sustrato también inhibe el crecimiento bacteriano (EPA, 2003).

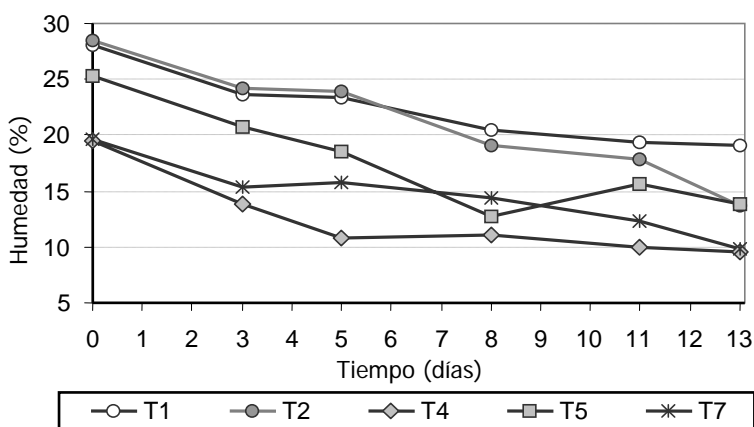


Figura 3 a. Variación de la humedad del compost al adicionar cal en el tratamiento de estabilización alcalina de biosólidos producidos por la PTAR-C de Cali, Colombia.

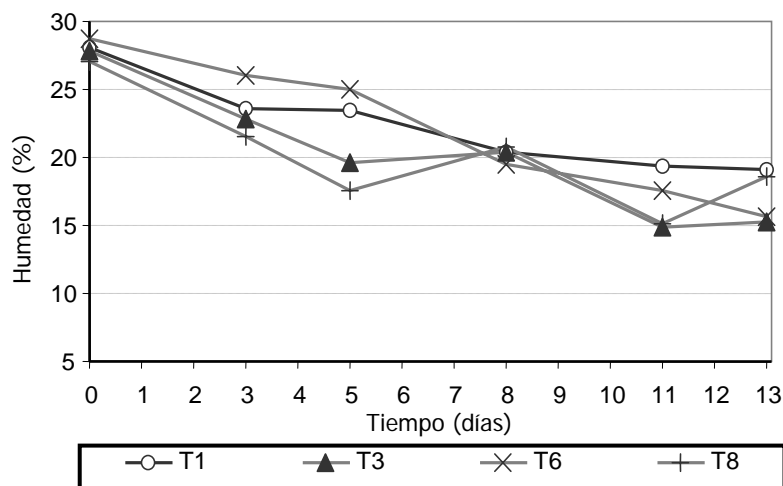


Figura 3 b. Variación de la humedad del compost al adicionar ceniza en el tratamiento de estabilización alcalina de biosólidos producidos por la PTAR-C de Cali, Colombia.

Coliformes fecales y huevos de helmintos. El propósito principal de la estabilización alcalina es la reducción de patógenos a niveles por debajo del límite de la norma, que permitan su disposición segura o su uso en la agricultura sin restricciones.

En cuanto a coliformes fecales, la Tabla 6 muestra el nivel de estos microorganismos el día de inicio y la remoción alcanzada a los 6 y 13 días del ensayo. Los resultados encontrados limitaron el uso del modelo

estadístico planteado.

Tabla 6. Contenidos de coliformes fecales en compost obtenido a partir de la estabilización alcalina de biosólidos producidos por la PTAR-C de Cali, Colombia.

Tiempo	Día 0	Día 6	Día 13
Tratamientos	Coliformes fecales (x10 ³ UFC/g muestra)		
Tipo A*	<1,0	<1,0	<1,0
Testigo- T1	4,0	0,07	0,6
8 % - T2	0	0,8	1,6
8 % - T3	1,5	0,1	1,0
15 % - T4	0	0	0
15 % - T5	0	1,3	0
15 % - T6	-	0	0,8
30 % - T7	0	0	0
30 % - T8	10	0	5,0

* Norma 40 CFR 503 (EPA, 2003)

Los datos de coliformes fecales presentes en el compost mostraron que su calidad es de un material Tipo B que requiere una desinfección complementaria para permitir un uso agrícola sin restricciones (Tipo A). En general, la CV y CH, en proporciones superiores a 15%, presentaron un efecto desinfectante adecuado durante todo el ensayo y con valores de pH cercanos a 12 unidades, a diferencia de la ceniza que tuvo presencia de patógenos durante el proceso, lo que coincide con el comportamiento de este material en términos de la deficiente elevación de la temperatura y el pH.

Respecto a los huevos de helmintos, en todos los tratamientos se obtuvieron valores nulos de huevos de helmintos viables, lo que disminuye el riesgo a la salud pública.

De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio, se observa que tanto la cal viva como la cal hidratada mostraron buen desempeño en porcentajes de 15% y 30% y presentaron menor variación de pH al mantenerse cercanos a las 12 unidades, lo cual es beneficioso si se quieren garantizar características de un material Tipo A. Sin embargo, es necesario continuar los estudios con el objetivo de verificar la posibilidad de reducir los tiempos de contacto y las dosis a aplicar, evaluando rangos entre 3 y 13 días y dosis entre 8 y 15% de ambos tipos de cal. La ceniza, en las proporciones evaluadas, no presentó

resultados satisfactorios, recomendándose evaluar otras calidades de ceniza con mayor contenido de óxidos de calcio y características alcalinas, además de evaluar posibles mezclas cal-cenizas.

Los criterios de selección de la cal viva o la cal hidratada están en función también de aspectos específicos relacionados con el sitio de aplicación y aspectos técnicos y económicos; dentro de los primeros se encuentran la facilidad de adquisición, calidad del material, riesgos y requisitos de manipulación y dentro de los segundos están los costos de inversión inicial, operación y mantenimiento, costos del producto y costos asociados a su manipulación. En la literatura se recomiendan ambos productos, siendo la cal viva la de mayor utilización y en la presentación molida, ya que una fina granulometría ayuda a una mejor homogenización en la mezcla con el biosólido (Fernandes y de Souza, 2001).

Los costos pueden ser bajos si se considera un equipo de mezcla sencillo y transporte y almacenamiento cercano. A gran escala se deben considerar en los costos las cubiertas para el material tratado, que controle los olores debido al desplazamiento de amoníaco y volatilización de componentes (Ilhenfeld, Andreoli y Lara, 1999).

El compost alcalinizado, además de ser un material con un contenido de materia orgánica y nutrientes

aprovechables para su uso agrícola (lo que reduce los costos de producción por la disminución de adquisición de fertilizantes), tiene un alto poder reactivo en el suelo debido al efecto alcalinizante remanente, por lo que su uso estaría enfocado principalmente a suelos que posean pH ácidos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales – PTAR contienen una alta concentración de patógenos y parásitos que representan un alto riesgo para la salud pública, requiriendo de un tratamiento para su aprovechamiento y segura disposición. Métodos como el compostaje y la estabilización alcalina permiten mejorar sus características, aumentando su potencial de aplicación agrícola con menor riesgo a la salud pública.

La estabilización alcalina del compost con cal viva y cal hidratada en las proporciones de 15% y 30% logró elevar el pH a 12 unidades por un periodo mayor a 72 horas y manteniéndolo cercano a 12 unidades durante todo el ensayo, lo que garantizó una eficiente reducción de microorganismos patógenos y obtención de un material Tipo A, resultados que no se obtuvieron con la ceniza en las dosis y condiciones evaluadas.

En términos de humedad, la cal viva al 15% alcanzó una reducción de humedad instantánea hasta 19,5%; con CH se requirió una dosis de 30% para alcanzar el mismo efecto en un periodo de tiempo de 3 a 5 días.

Dadas las características alcalinas del material obtenido, deben realizarse estudios de pH y características del suelo donde se va a aprovechar o a disponer para determinar los porcentajes de material desinfectado por hectárea que pueden ser agregados.

Aunque la ceniza evaluada no presentó resultados satisfactorios, en caso de contarse con una ceniza de características alcalinas de fácil adquisición y mínimo costo, se recomienda evaluar diferentes proporciones y evaluar la posibilidad de mezclarlas con la cal para reducir costos.

Se recomienda realizar pruebas complementarias de estabilización alcalina para reducir la dosis mínima requerida de cal viva e hidratada, evaluando un rango entre el 8 y el 15%, además de evaluar la estabilización alcalina del biosólido sin compostar, con el objetivo de reducir tiempos de tratamiento y por lo tanto costos y requerimientos de área.

Se debe evaluar la reducción de otros organismos causantes de enfermedades en las plantas y en la salud pública como los fitopatógenos y la salmonella.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a EMCALI –EICE- ESP y a la Universidad del Valle, por facilitar la realización de este estudio y a Colciencias por la beca otorgada a la Joven Investigadora.

BIBLIOGRAFÍA

Andreoli, C., A. Ferreira, C. Cherubini, C. Rodrigues, Ch. Cameiro e F. Fernandes, 2001. Capítulo 4, Higienização do lodo de esgoto. p 87-116. En: Andreoli, C. Resíduos sólidos do saneamento: processamento e disposição final. ABES y PROSAB, Rio de Janeiro, Brasil.

American Public Health Association (APHA, AWWA, WPFC). 1998. Standard methods for the examination of waters and wastewaters. 20th Edition. APHA, AWWA, WPFC. Washington D.C. 1200 p.

Bailenger, J. 1979. Mechanisms of parasitological concentration in coprology and their practical consequences. J. Amer. Med. Technol. (41): 65-71.

Boost M. and Poon C. 1998. The effect of a modified method of lime-stabilization sewage treatment on enteric pathogens. Environ. Intl. 24(7): 783-788.

Carlander, A. and T. Westrell. 1999. A microbiological and sociological evaluation of urine-diverting doublevalve latrines in Cam Duc, Vietnam. Minor Field Studies No. 91. SLU, Uppsala, p. 44. Citados por: Vinneras, B., A. Björklund, and H. Jönsson. 2003. Thermal composting of faecal matter as treatment and possible disinfection method—laboratory-scale and pilot-scale studies. Bioresour. Technol. 88(1):47–54.

Clemente, E., A. Borges and C. Belettini 2005. Estudo de avaliação da estabilização em estufa plástica de lodos de estações de tratamento de água e esgoto com adição de cal. No. III – 184. En: 23^o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES - PROSAB, Rio de Janeiro, Brasil. 9 p.

- Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). 2004. Norma Chilena 2880 de 2004. En: <http://www.conama.cl/rm/568/articles-28706recurso2.pdf>. Consulta: Marzo 2007.
- Empresas Municipales de Cali (EMCALI- EICE ESP). 2005. Informe de descargas finales al río Cauca. Gerencia de Acueducto y Alcantarillado. Febrero. Cali. 41 p.
- Environmental Protection Agency (EPA). 2003. Environmental regulations and technology. Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge. En: <http://www.epa.gov/ORD/NRMRL/pubs/625r92013/625R92013.pdf>. Consulta: Mayo 2007.
- Fernandes, F. e S. de Souza. 2001. Capítulo 2: Estabilização de lodo de esgoto. p. 29-55. En: Andreoli, C. Resíduos sólidos do saneamento: processamento e disposição final. ABES y PROSAB, Río de Janeiro, Brasil.
- Guzmán, C. y C. Campos. 2004. Indicadores de contaminación fecal en biosólidos aplicados en agricultura. *Universitas Scientiarum* 9(1):59-67.
- Ilhenfeld, R., C. Andreoli, e A. Lara. 1999. Capítulo 6: Higienização do lodo de esgoto. pp. 34-45. En: Programa De Pesquisa em Saneamento Basico (PROSAB). Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura. ABES, São Paulo, Brasil. 97 p.
- Industria de Cal Caldesa S.A. 2006. Información de composición de la cal viva y cal hidratada. Medellín.
- Industria Productora de Papeles (PROPAL S.A.). 2006. Información de procedencia de ceniza y características promedio de la Planta 1. Yumbo, Cali.
- Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas). 2006. Resultados análisis de composición de óxidos de ceniza en laboratorio de carbones. Bogotá.
- Jiménez, B., J. Barrios y C. Maya. 1999. Estabilización alcalina de lodos generados en un tratamiento primario avanzado. Instituto de Ingeniería UNAM. Ciudad de México. 14p. En: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/tratagua/mexicana/R-0119.pdf>. Consulta: Mayo 2007].
- Karlsson, J. and M. Larsson. 2000. Composting of latrine products in Addis Ababa, Ethiopia. *Minor field studies* No. 32. Luleå University of Technology, Luleå, Suecia. Citado por: Vinneras, B., A. Björklund and H. Jönsson, 2003. Thermal composting of faecal matter as treatment and possible disinfection method-laboratory-scale and pilot-scale studies. *Bioresour. Technol.* 88(1): 47-54.
- Madera, C., M. Peña, D. Mara and Muñoz, N. 2002. Treatment and disinfection of biosolids from anaerobic ponds: lime application or natural drying?. p. 761-765. En: *Proceedings of the 5th International IWA Conference on Waste Stabilisation Ponds, Auckland, New Zealand.*
- Metcalf and Eddy. 2003. *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*. 4th Edition. Mc Graw Hill, New York. 1819 p.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MINAMBIENTE). 2006. "Por la cual se reglamentan los artículos 70, 71, 72 y 78 del Decreto 1713 de 2002 sobre el aprovechamiento de residuos sólidos, el artículo 70 del Decreto 1594 de 1984 y el artículo 1 del Decreto 838 de 2005 sobre los lodos estabilizados generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, para su incorporación en forma técnica y ambiental al ciclo económico productivo, y se dictan otras disposiciones". Versión 16 del borrador de resolución. Bogotá. 10 p.
- Moeller, G., C. Ferat y R. López. 2005. Aplicación de procesamiento térmico y alcalino para la desinfección de lodos residuales primarios un estudio comparativo. No. I-169. En: XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria e Ambiental. Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental - AIDIS. Montevideo, Uruguay.
- Muñoz, A., F. Chejne, J. Espinel y C. Londoño. 2006. Evaluación de la celulosa de papel y de las cenizas de carbón como materiales aislantes alternativos. *Dyna* 73(148):1-8.
- Ramírez, R. y M. Pérez. 2006. Evaluación del potencial de los biosólidos procedentes del tratamiento de aguas residuales para uso agrícola y su efecto sobre el cultivo de rábano rojo (*Rfaphanus sativus L.*). *Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín* 59(2): 3543-3556.
- Ramírez, R., D. Velásquez y E. Acosta. 2007. Efecto de la aplicación de biosólidos en el crecimiento de *Jacaranda mimosifolia* (Gualanday) en las condiciones físicas y químicas de un suelo degradado. *Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín*. 60(1): 3751-3770.
- Schöningh, C. y T. Stenström. 2004. Guidelines for the safe use of urine and faeces in ecological sanitation systems. Swedish Institute for Infectious Disease Control (SMI). EcoSanRes Programme, Stockholm, Sweden. 44p.
- Serapio, F. y C. Bruzon. 1996. Curso de abono y sustratos orgánicos. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 300 p. Citado por: Torres, P., A. Pérez, J. Escobar, I. Uribe y R. Imery. 2007. Compostaje de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales. *Eng. Agríc.* 27(1): 267-275.

- Soto, M. 2003. Abonos orgánicos, Principios, aplicaciones e impacto en la agricultura. p. 20–49. En: Meléndez, G. (ed.). Abonos orgánicos: definiciones y procesos. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), San José de Costa Rica.
- Torres, P., J. Escobar, A. Perez, R. Imery, P. Nates, G. Sánchez, M. Sánchez y A. Bermudez. 2005. Influencia del material de enmienda en el compostaje de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Ing. Investig. 25(2):54–61.
- Torres, P., A. Pérez, J. Escobar, I. Uribe y R. Imery, 2007. Compostaje de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales. Eng. Agric. 27(1): 267-275.
- Vinneras, B., A. Björklund, C. Andreoli, A. Ferreira, C. Cherubini, C. Rodrigues, Ch. Cameiro e F. Fernandes, 2001. Capítulo 4, Higienização do lodo de esgoto. p 87-116. En: Resíduos sólidos do saneamento: processamento e disposição final. ABES y PROSAB. Río de Janeiro, Brasil.
- Vinneras, B., A. Björklund, and H. Jönsson. 2003. Thermal composting of faecal matter as treatment and possible disinfection method—laboratory-scale and pilot-scale studies. Bioresour. Technol. No. 88(1):47–54.