

Aprovechamiento del subproducto sólido de la digestión anaerobia del bagazo de fique (*furcraea macrophylla*) para el acondicionamiento de suelos

Application of solid by-product generated in fique's bagasse (*furcraea macrophylla*) anaerobic digestion for soil improvement

Dayana Rivera González¹; Lorena Plata Martínez¹; Liliana Castro Molano¹;
Carolina Guzmán Luna^{2*}; Humberto Escalante Hernández^{1**}

¹Grupo de Investigación en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente – GIMBA. ²Grupo de Investigación en Bioquímica y Microbiología, Universidad Industrial de Santander (UIS), Carrera 27 calle 9, Bucaramanga, Colombia.
*caguzlun@uis.edu.co **escala@uis.edu.co

Fecha Recepción: 5 de diciembre de 2011

Fecha Aceptación: 8 de mayo de 2012

Resumen

La digestión anaerobia del bagazo de fique (*Furcraea macrophylla*) genera 0,3m³ CH₄/kg sólidos volátiles (SV) y 7L de lodo efluente por kg de bagazo tratado. El lodo efluente (LE) puede ser empleado en agricultura. El objetivo de este trabajo de investigación fue producir un biosólido a partir de la estabilización alcalina del LE y evaluar el efecto reparador en un suelo franco-arenoso de Mogotes –Santander. El desarrollo metodológico consistió en caracterizar fisicoquímica y microbiológicamente el LE producido durante la digestión anaerobia del bagazo de fique, seguido de un proceso de estabilización alcalina para la obtención de biosólido y su evaluación como acondicionador de suelo empleando semillas de *Phalaris canariensis*. Como variables de respuesta se cuantificó el grado de emergencia, la altura de las plantas y los cambios en la concentración de nutrientes del suelo tratado. De acuerdo con los resultados obtenidos de coliformes fecales, *Salmonella* y huevos de helminto, el biosólido puede ser utilizado sin riesgo biológico con las debidas restricciones de aplicación. Como acondicionador de suelo orgánico, puede utilizarse para la recuperación de superficies estériles degradadas a causa del cultivo de fique. La aplicación del biosólido estabilizado contribuye a la enmienda de suelos ácidos y a la reducción de la contaminación ambiental.

Palabras clave: biosólido, microorganismos patógenos, lodo efluente, enmienda de suelos, estabilización alcalina.

Abstract

Fique's bagasse (*Furcraea macrophylla*) anaerobic digestion generate 0.3m³ CH₄/kg SV and 7L of sludge per kg of treated bagasse. The sludge can be applied in agriculture. The aim of this research was to produce a biosolid from sludge stabilized by alkali treatment and evaluates its remedial effect in a sandy loam soil of Mogotes – Santander. The methodology consisted in physicochemical and microbiological characterization of effluent sludge from fique's bagasse anaerobic digestion, followed by an alkaline stabilization process to obtain biosolids as byproduct and the evaluation as soil conditioner using *Phalaris canariensis* seeds. The seedling emergence, the height of plants and the change in soil nutrient composition were evaluated as response variables. According to levels of fecal coliforms, *Salmonella*, and helminth eggs, the biosolid can be applied without biological risk with the respective application restriction. As organic soil conditioner, it is used for the recovery of sterile ground deteriorated by fique's crops. The application of stabilized sludge in agriculture contributes to amendment of acidic soils and the reduction of environmental pollution.

Keywords: biosolid, pathogens microorganism, sludge, soil amended, alkali treatment.

Introducción

El uso de los lodos residuales en la rehabilitación del terreno, es cada vez más considerada una solución técnica para revertir la degradación ambiental y promover el restablecimiento de la cobertura vegetal [1]. La aplicación de lodos obtenidos en las plantas de tratamiento de aguas residual (PTAR) en actividades agrícolas y no agrícolas y su disposición final se ha investigado ampliamente, estableciéndose estrictas regulaciones estadounidenses y europeas, USEPA40 CFR 503 y CEE 86/278 respectivamente, destinadas al reciclaje seguro y mejoramiento de las características de estos materiales [2-4]. La estabilización de lodos de PTAR mediante digestión anaerobia ha presentado indudables ventajas en su utilización en la agricultura, considerándose un material adecuado para la fertilización y restauración de suelos degradados [5].

En Colombia, la actividad fiquera genera aproximadamente 4 toneladas de residuos (bagazo) por hectárea sembrada, los cuales causan graves problemas de contaminación debido a su incorrecta disposición [6,7]. De acuerdo con la caracterización fisicoquímica del bagazo de fique (BF), éste constituye una fuente idónea de carbono para la producción de biogás [8]. En la digestión anaerobia del BF, se generan 0,3m³ CH₄/kg de sólidos volátiles (SV) y como subproducto 7L de lodo efluente (LE) por kg de BF tratado [9]. El subproducto (LE) de la digestión anaerobia del BF presenta un alto contenido de materia orgánica, macro y micronutrientes, que lo hacen viable para ser utilizado como una fuente alternativa de nutrientes para los terrenos de cultivo y por ende para las plantas. Sin embargo, antes de ser dispuesto en el terreno, debe someterse a un proceso de estabilización que permita reducir la carga microbiana y cumplir con las estrictas regulaciones estipuladas para su utilización en suelos [10]. Según la USEPA, los lodos de PTAR que han sido tratados y cumplen con los estándares estatales y federales para su aplicación al suelo, son denominados biosólidos [10]. Entre los requisitos a cumplir están: a) la reducción de microorganismos patógenos (causantes de enfermedad) y b) la disminución de la atracción de vectores (roedores, aves, insectos y otros organismos que pueden transportar microorganismos patógenos) [3].

La concentración de patógenos diferencia los biosólidos como Clase A y Clase B. En la Clase A,

los tratamientos de estabilización (ejemplo: lodos tratados térmicamente) permiten una reducción microbiana (virus entéricos, coliformes fecales, *Salmonella*, y huevos viables de helmintos) por debajo de niveles detectables por los métodos de laboratorio. Los requisitos de la Clase B es reducir los patógenos a niveles que no supongan una amenaza para la salud pública y el medio ambiente. Su aplicación al suelo sólo es permitida si los cultivos, el pastoreo de animales y el acceso público se limita durante determinados periodos de tiempo después de su aplicación hasta que factores ambientales (energía solar, desecación) reduzcan aún más los patógenos [3]. Se ha demostrado que la aplicación de biosólidos municipales clase B en terrenos dedicados a la producción de forrajes es benéfica, ya que la utilización de estos subproductos favoreció los procesos de mineralización del carbono y el incremento del contenido de nitrógeno en el suelo enmendado [11]. Entre los procesos que permiten reducir significativamente el contenido de patógenos en lodos están: la digestión aerobia y anaerobia, el secado al aire, el compostaje y la estabilización alcalina [3,12].

En la digestión aerobia de lodos de PTAR, los microorganismos consumen el componente orgánico degradable, obteniéndose un producto biológicamente estable, al mismo tiempo que se reduce el volumen de los lodos [13]. Lodos residuales contaminados con 4-nonilfenol (sustancia de interés ambiental debido a su toxicidad para los sistemas biológicos), han sido tratados en condiciones aerobias termófilas. Durante el proceso se alcanzó una reducción de 66% de la sustancia tóxica, además de la destrucción del contenido biodegradable de los lodos [14]. En la digestión aerobia no hay recuperación de la energía y el proceso tiende a ser costoso debido al consumo de energía asociado con la aireación continua [13].

El tratamiento anaerobio de los biosólidos permite recuperar la energía en forma de metano y obtener un residuo que puede utilizarse en el acondicionamiento del suelo. La digestión anaerobia en dos etapas (55°C en la primera y 35°C en la segunda etapa), es uno de los procesos implementados para cumplir con los requisitos de reducción de coliformes fecales en los biosólidos Clase A [15]. En comparación con el proceso de una etapa, se garantiza un mejor desempeño en términos de reducción de sólidos volátiles (SV), producción de biogás y deshidratación

del residuo [16]. No obstante, cuando los lodos residuales se someten a digestión anaerobia en dos etapas a gran escala, se pueden presentar problemas técnicos relacionados con el exceso de ácidos grasos volátiles (AGV) y la inhibición por acumulación de propionato y butirato [16].

El secado al aire se utiliza como proceso final en la estabilización de lodos procedentes de digestión aerobia o anaerobia. En este tratamiento, se realiza la descomposición de la materia orgánica, producción de amoníaco, además, de la deshidratación y la reducción microbiana [8]. Mediante el secado en lechos de lodos de PTAR, se observó una reducción del 73% en la concentración de SV, obteniéndose un producto final con contenido de nutrientes, metales pesados y microorganismos fecales convenientes para su utilización como fertilizante en la agricultura [17]. Los lechos de secado son una alternativa de bajo consumo de energía, bajos costos de operación y mantenimiento, y de poco impacto ambiental [18]. El compostaje de lodos de PTAR involucra mezclar el residuo con un material de soporte; el cual proporciona porosidad, permite la circulación de aire y disminuye la humedad. Durante el proceso de compostaje se alcanzan condiciones termófilas que permiten la reducción de patógenos [3]. Durante el compostaje de lodos residuales es necesario mantener condiciones de operación específicas, debido a que la temperatura y la humedad son factores determinantes para garantizar una excelente actividad microbiana que permita la descomposición de la materia orgánica [19].

La estabilización alcalina, también conocido como "encalado", es considerada uno de los procesos más empleados en la transformación de lodos. El encalado es una tecnología de fácil implementación [20]. Materiales como cal (viva o hidratada), carbón, cenizas han sido empleados en la estabilización alcalina de lodos [21-24]. En el proceso, mediante la adición de un material alcalino, durante un determinado tiempo de contacto, se consigue elevar el pH a valores por encima de 12, lográndose la reducción del contenido de patógenos [22]. Tres parámetros son considerados importantes: el monitoreo de los cambios en el pH, el tiempo de contacto y la dosis de álcali utilizada, debido a la relación directa que existe entre estos parámetros y la inactivación de los microorganismos patógenos [25]. Mediante estabilización con cal hidratada, han sido tratados lodos primarios de PTAR, consiguiéndose la inactivación de microorganismos patógenos y el mejoramiento de las características del residuo

para su utilización en la fertilización periódica de suelos [26]. El encalado del biosólido reduce el contenido de patógenos, sin alterar su aporte nutricional de macro y micronutrientes, y al aplicarlo a suelos estériles favorece el desarrollo de cultivos [10].

En esta investigación, el lodo efluente de la digestión anaerobia del BF fue tratado mediante estabilización alcalina con hidróxido de calcio (Ca(OH)_2), dada la factibilidad de transferencia tecnológica en las comunidades rurales dedicadas a la actividad fiquera, además de los pocos requerimientos de equipos para su implementación y la simplicidad del proceso [3]. El objetivo del presente trabajo fue producir un biosólido estabilizado y hacer una primera valoración descriptiva del aporte de nutrientes de un sub-producto de la digestión anaerobia del bagazo de fique, cultivo de interés económico y agrícola en el país y especialmente en Mogotes - Santander.

Parte experimental

Características del Lodo efluente (LE)

El lodo efluente se obtuvo del proceso de fermentación anaerobia del BF en reactores batch operados a 21°C y un tiempo de operación de 20 días [8]. Como inóculo, se utilizó una mezcla de líquido ruminal y lodo de estiércol de cerdo. El líquido ruminal se recolectó en una planta de sacrificio de bovinos y el lodo de estiércol de cerdo fue tomado de lagunas de estabilización de una porcícola.

Caracterización microbiológica y fisicoquímica de los lodos

La cuantificación de indicadores de contaminación de origen fecal: colifagos, coliformes totales y fecales, *Salmonella* sp., y huevos de helmintos, se realizó por técnicas estandarizadas (infección en doble capa de agar; Fermentación en tubos múltiples; Aislamiento no selectivo y diferencial e identificación serológica; Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996: flotación con ZnSO_4 , respectivamente) [27-30].

El análisis fisicoquímico incluyó la determinación de pH, contenido de macro y micronutrientes, mediante un reporte fisicoquímico en base húmeda (Tabla 1).

Proceso de estabilización de LE

Para la estabilización de LE se utilizó cal hidratada (Ca(OH)_2). Se realizó un experimento con tres

concentraciones de cal adicionada al residuo (Tabla 2) de acuerdo con las recomendaciones para la estabilización alcalina de lodos anaerobios [25].

Cada concentración fue evaluada por duplicada. El experimento control (D-0), correspondió a una muestra de LE sin adición de álcali.

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos determinados en lodos y biosólidos.

Parámetro	Unidad	Método analítico
pH	-	LBC 44 Potenciometría
Nitrógeno	%	Suma de Nitrógenos
Potasio	%	NTC 202 Emisión
Fósforo	g/L	NTC 234 Colorimetría
P2O5	g/L	NTC 234 Colorimetría
Azufre	g/L	NTC 1154 Turbidimetría
Cobre	g/L	NTC 1369 A. Atómica
Zinc	g/L	NTC 1369 A. Atómica
Calcio	%	NTC 1369 A. Atómica
Magnesio	%	NTC 1369 A. Atómica
Carbono orgánico oxidable	g/L	NTC 5167 Walkey Black

Tabla 2. Dosificación de Ca(OH)₂ para la estabilización de LE.

Ensayo	(kg Ca(OH) ₂ /kg sólidos totales)
D-0	0,00
D-1	0,14
D-2	0,19
D-3	0,25

Se seleccionó una muestra representativa de un litro de LE para cada dosis de Ca(OH)₂. La cal hidratada fue adicionada en forma gradual a las muestras de LE y para garantizar su homogeneidad, se agitó continuamente a 50rpm mediante un agitador (marca Memmert, Alemania). Teniendo en cuenta que los tiempos de contacto necesarios para la reducción de microorganismos patógenos son variables [26,31,32] y los resultados

preliminares obtenidos en el laboratorio, se determinó un tiempo de tratamiento de 10 días con monitoreo diario de pH (pHmetro marca Schott Instruments, Alemania). Una vez concluido el tiempo de operación se determinó nuevamente la concentración microbiológica y la caracterización fisicoquímica del lodo efluente.

Fertilización del suelo

La capacidad fertilizante del biosólido se valoró utilizando muestras de suelos dedicadas al cultivo del fique y semillas de pasto alpiste. Las muestras de suelo fueron colectadas en el municipio de Mogotes – Santander.

El análisis fisicoquímico del suelo incluyó la determinación de pH, contenido de macro y micronutrientes, textura y la capacidad de intercambio catiónico entre otros (CIC) (Tabla 3).

Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos determinados en el suelo evaluado.

Parámetro	Unidad	Método analítico
Textura	-	Bouyoucos
pH	-	LBC 44 Potenciometría
Carbono	%	Colorimétrico
Fósforo disponible	ppm	NTC 234 Colorimetría
Calcio	meq/100 g	NTC 1369 A. Atómica
Magnesio	meq/100 g	NTC 1369 A. Atómica
Sodio	meq/100 g	NTC 1369 A. Atómica
Potasio	meq/100 g	NTC 1369 A. Atómica
Aluminio intercambiable	meq/100 g	Valoración: Extracción KCl
Azufre	ppm	NTC 1154 Turbidimetría
Boro	ppm	Colorimétrico
Hierro	ppm	NTC 234 Colorimetría
Manganeso	ppm	NTC 1369 A. Atómica
Cobre	ppm	NTC 1369 A. Atómica
Zinc	ppm	NTC 1369 A. Atómica
CIC	meq/100 g	Extracción acetato de amonio

*CIC: Capacidad de intercambio catiónico.

Semillas de pasto alpiste (*Phalaris canariensis*, marca *Piamontina*) fueron cultivadas en 2kg de suelo colocados en materas de vinilo (11cm de profundidad, 20cm de ancho y 15cm de largo) provistas de bandejas para la recolección de lixiviados.

En cada matera se colocó una muestra de suelo y biosólido de acuerdo con las relaciones especificadas en la Tabla 4. Luego de la siembra de 40 semillas en cada matera, los ensayos fueron regados diariamente con 80 ml de agua y expuestos a la luz solar con un promedio de 12 horas diarias. Cada muestra fue procesada por duplicado y el valor corresponde al promedio.

Tabla 4. Dosis de biosólido aplicada a un suelo destinado a cultivo de pasto alpiste.

Ensayo	Dosis (L biosol/ m ²)
E- 1	0,00
E- 2	0,25
E- 3	0,50
E- 4	1,00

Treinta días después de la siembra, se evaluó la calidad del suelo en términos de contenido de nutrientes, y la eficiencia del sólido como fertilizante sobre plantas de pasto alpiste. Las variables de evaluación fueron porcentaje de germinación y altura de las plantas (7,14, 21 y 30 días después de la siembra).

El análisis estadístico de los resultados de crecimiento de las plántulas, se realizó mediante el software StatGraphics plus 5.1, StatPoint Inc. (Virginia, EE.UU), utilizando ANOVA para la valoración de las medias y el método de Tukey (HSD) para establecer diferencias significativas ($P < 0,05$), IC:95%.

Resultados y Discusión

Caracterización microbiológica y fisicoquímica de las muestras

En la Tabla 5 se observa que el lodo efluente no contiene *Salmonella* como indicador de

bacterias patógenas y las concentraciones de parásitos cumplen con lo establecidos en normas internacionales. Sin embargo, la concentración de coliformes fecales ($7,1 \times 10^5$ NMP/g ST) lo clasifica como B (Clase A: < 1000 NMP/g ST), evidenciando la necesidad de estabilizarlo antes de ser vertido a suelos de cultivo [3].

La caracterización fisicoquímica de LE resalta el contenido de nitrógeno, potasio, fósforo y el potencial uso en suelos destinados a cultivos (Tabla 6).

Los nutrientes presentes en el LE son similares a los obtenidos con lodos de depuradora, usados como fertilizantes en suelos mediterráneos [33].

Tabla 6. Características fisicoquímicas del LE.

Parámetro	Unidad	Valor
pH	-	7,2
Nitrógeno	%	2,38
Potasio	%	1,11
Fósforo	g/L	3,70
P2O5	g/L	8,50
Azufre	g/L	1,00
Cobre	g/L	0,08
Zinc	g/L	0,15
Calcio	%	2,96
Magnesio	%	2,44
Carbono orgánico oxidable	g/L	45,80

Estabilización del LE

De acuerdo con USEPA, durante el proceso de estabilización se debe elevar el pH a un valor superior a 12 y mantenerlo por 72h [3]. La adición de Ca(OH)_2 /kg de lodo seco al LE, elevó el pH de los ensayos de 7,45 a 12,08 (D-1); 12,12 (D-2) y 12,86 (D-3) en un tiempo de tratamiento de 12h. Con 0,14kg de Ca(OH)_2 /kg de lodo seco (ensayo D-1) el pH disminuyó progresivamente durante los 10 días del proceso (Figura 1). La adición de 0,25kg de Ca(OH)_2 /kg de lodo seco (D-3) mantuvo el pH entre 12 y 13, durante los diez días de experimentación. Teniendo en cuenta que la dosis de 0,19kg de Ca(OH)_2 /kg de lodo seco (D-2) alcanzó valores de pH suficientes para estabilizar

Tabla 5. Caracterización microbiológica del LE.

Microorganismo Patógeno	Unidad	Valor	Técnica de medición
Coliformes totales	NMP/g ST	$5,1 \times 10^9$	NMP en caldo LMX Fluorocult
Coliformes fecales	NMP/g ST	$7,1 \times 10^5$	NMP en caldo LMX Fluorocult
<i>Salmonella sp.</i>	Presencia - Ausencia/ 2g ST	Ausente	Pruebas Bioquímicas e identificación serológica
Huevos de helmintos	HH/ 4g ST	<Límite de detección	Decantación - Flotación en ZnSO ⁴ .

la materia orgánica, se seleccionó esta última concentración.

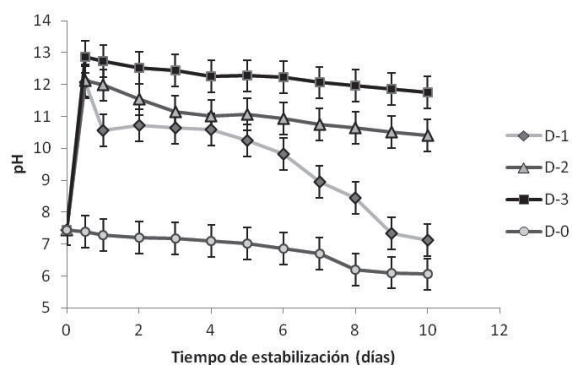


Figura 1. Variación del pH durante la estabilización alcalina de LE.

En relación con el análisis microbiológico del ensayo D-2, los resultados indican la reducción microbiana de coliformes totales y fecales por debajo de los límites de detección del método. La ausencia de *Salmonella sp.* en el lodo estabilizado demuestra que no hubo recrecimiento en la biomasa residual. La no detección de huevos de helminto evidencia un margen de seguridad en cuanto a su utilización. Los niveles de colifagos somáticos en el producto estabilizado fueron inferiores al límite de detección del método [27]. Dado que los colifagos son indicadores de la presencia de enterovirus, se puede inferir una clasificación del biosólido como "A" y su aplicación en procesos agrícolas con las debidas restricciones de uso. Wong *et al.* 2009 obtuvieron una reducción microbiológica en estiércol de cerdo mediante estabilización alcalina [34].

En la Tabla 7 se encuentra el análisis fisicoquímico del LE y el biosólido D-2. Los valores de nutrientes y micronutrientes en las matrices

analizadas aseguran su aprovechamiento en el acondicionamiento del suelo.

Durante el encalado, el cambio del pH hasta valores altamente alcalinos degrada la materia orgánica del residuo metabolizado. La concentración de nutrientes de LE no se ve afectada por el proceso de estabilización alcalina. Se observó una reducción del nitrógeno en un 14%v debido posiblemente al cambio de pH y a fenómenos de volatilización asociados [35,36]. Tanto en el LE como en el biosólido las concentraciones de Cu y Zn son bajas evitando generar contaminación en el ambiente por metales pesados como lo afirma Kuai *et al.* 2000 [37-39].

Las reacciones de los cationes de calcio con azufre favorecen el proceso de estabilización del lodo reduciendo el impacto ambiental [38]. En este estudio, las bajas concentraciones de azufre (1g/L y 0,83g/L) minimizan la generación de olores en el biosólido.

En la Tabla 8, se corrobora la eficiencia del tratamiento alcalino como proceso de estabilización de la materia teniendo como parámetros de referencias los valores de DQO, DBO y SV. La disminución del contenido de sólidos volátiles es atribuida a la desactivación de la carga microbiana, a causa de los valores de pH altamente alcalino. Concentraciones bajas de sólidos volátiles disminuyen la atracción de vectores [11,38].

Capacidad del biosólido como fertilizante de suelos

En la Tabla 9 se presenta el avance en el grado de emergencia de las plántulas de pasto alpiste, sembradas con suelo abonado con diferentes dosis de biosólido. El mayor porcentaje de plántulas emergidas se obtuvo con el experimento E-3 (33 plantas/ maceta).

Tabla 7. Características fisicoquímicas del LE y biosólido.

Parámetro	Unidad	Valor	
		LE	Biosólido
pH		7,2	10,40
Nitrógeno	%	2,38	2,04
Potasio	%	1,11	1,11
Fósforo	g/L	3,70	4,20
P ₂ O ₅	g/L	8,50	9,60
Azufre	g/L	1,00	0,83
Cobre	g/L	0,08	0,08
Zinc	g/L	0,15	0,17
Calcio	g/L	2,96	9,90
Magnesio	g/L	2,44	2,40
Carbono orgánico oxidable	g/L	45,80	32,30
Sólidos Totales	g/L	64,60	182,54

Tabla 8. Indicadores de degradación de la materia orgánica.

Parámetro	Unidades	LE	Biosólido	Porcentaje de disminución
DBO	mg O ₂ /L	10833	3525	32,54
DQO	mg/L O ₂	65944	16800	25,48
SV	% p/p	28,48	4,30	15,10

Tabla 9. Grado de emergencia de las plántulas de pasto alpiste

Experimento	Dosis [L biosólido/ m ²]	Plántulas emergidas	Porcentaje de plántulas emergidas
E-1	0,0	29	72,5
E-2	0,25	31	77,5
E-3	0,50	33	82,5
E-4	1,00	25	62,5

En el experimento E-4, la dosis de 1L/m² de biosólido (equivalente a 12Mg/ha), redujo el porcentaje de emergencia de las plántulas, dada la formación de capas de lodo que causaron obstrucción física que restringe el desarrollo normal de las plántulas. Este comportamiento fue observado con la aplicación de concentraciones superiores a 30Mg/ha de biosólido en la evaluación de la emergencia de pasto *Bouteloua gracilis* [39]. La adición de biosólido, ocho días antes de la siembra, contribuyó a la degradación química, biodegradación y volatilización de los compuestos que podrían resultar tóxicos para las semillas a germinar reduciendo el riesgo de fitotoxicidad [40]. En la Figura 2 se presentan los cambios en la longitud de los tallos de las plántulas de pasto alpiste, durante el tiempo de experimentación.

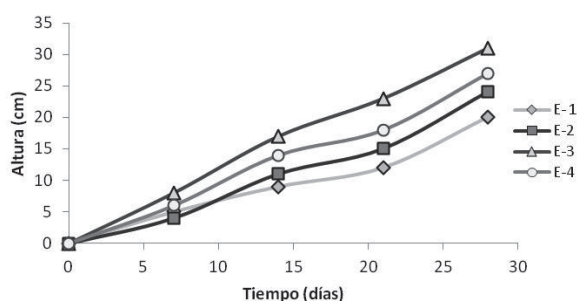


Figura 2. Crecimiento de plántulas de pasto alpiste en suelo abonado con Biosólido

El menor crecimiento de las plántulas se observó en el ensayo control (E-1), y los valores más altos de crecimiento de las plántulas se obtuvieron en el suelo tratado con 0,5L/m² (E-3), con una altura promedio de 19,58 ± 2,5cm durante el ensayo. En la Figura 3 se muestra la distribución de los valores de medias y medianas (variable altura

de las plántulas) utilizados para la evaluación del biosólido como fertilizante.

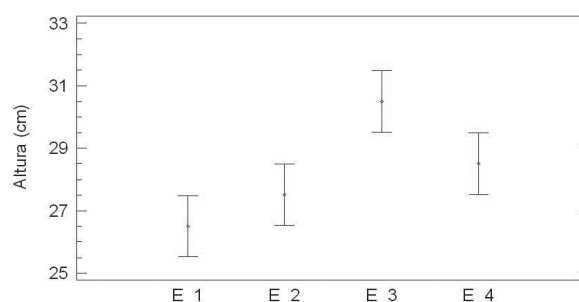


Figura 3 Distribución de medias para el crecimiento de las plántulas durante el ensayo.

Existen diferencias significativas entre el crecimiento alcanzado del pasto alpiste para cada uno de los ensayos, con un intervalo de confianza de 95% y un valor P=0,0001, evidenciando que al adicionar al suelo estéril una dosis de 0,50L biosólido/m² favorece el desarrollo de las plántulas.

Cambios fisicoquímicos del suelo tratado con biosólido

Teniendo en cuenta el resultado de los análisis estadísticos, donde se evidencia que la dosificación agregada en el experimento E3 es la más adecuada, se caracterizó fisicoquímicamente el suelo antes y después de la aplicación del biosólido (Tabla 10).

El fique es una planta de corte que absorbe gran cantidad de nutrientes del suelo y libera iones amonio, estas acciones causan acidez y esterilización del suelo; requiriendo continuas fertilizaciones. Sin embargo, los cultivadores de fique no realizan esta práctica y los terrenos tienden a degradarse [2]. La aplicación del

biosólido modificó significativamente las características ácidas del terreno, ventaja asociada con la estabilización de lodos residuales mediante encalado [41]. El aumento del valor de CIC mantiene el contenido de materia orgánica y favorece la retención de minerales para las plantas. Este aspecto se evidencia con el incremento de las concentraciones de elementos trazas como calcio, potasio, fósforo y magnesio. El potasio es absorbido por las plantas en cantidades mayores

que cualquier otro mineral [42]. En el ensayo E-1 se observó una necrosis foliar posiblemente asociada con la ausencia de este elemento. El incremento de micronutrientes como B, Mn, Cu, Zn mejoró las propiedades agronómicas del suelo. Teniendo en cuenta que el biosólido se produce a partir de la digestión anaerobia del bagazo de fique, la presencia de algunos de los nutrientes mencionados, pueden estar asociados a esta matriz [7].

Tabla 10. Cambios fisicoquímicos del suelo tratado con biosólido

Parámetro	Unidad	E-1 (0 L biosólido/m ²)	E-3 (0,5 L biosólido/m ²)
Textura		Franco -arenoso	Franco -arenoso
ph		5,3	6,2
Carbono orgánico	%	3,25	3,19
CIC	meq/100 g	13,4	18,0
Fósforo	ppm	110	245
Calcio	meq/100 g	5,58	6,88
Magnesio	meq/100 g	0,75	2,12
Sodio	meq/100 g	0,15	0,35
Potasio	meq/100 g	ND*	0,35
Aluminio	meq/100 g	ND*	ND*
Azufre	meq/100 g	7,05	34,5
Boro	meq/100 g	0,21	0,55
Hierro	meq/100 g	133	93,6
Manganeso	meq/100 g	3,44	3,32
Cobre	meq/100 g	1,64	4,52
Zinc	meq/100 g	9,0	22,4

*ND: No detectado

Los resultados de este trabajo coinciden con los reportados en otro estudio, donde se ha demostrado que la aplicación de un biosólido modifica favorablemente las características fisicoquímicas del suelo, debido a que se mejora la actividad microbiana del suelo y por ende se incrementa la fertilidad del terreno tratado [43].

Conclusiones

El encalado del lodo efluente generado por la digestión anaerobia del bagazo de fique, produce un biosólido sin riesgo biológico constituyéndose en una alternativa tecnológica viable para la disposición de este residuo. El biosólido puede utilizarse para la recuperación y acondicionamiento de suelos estériles degradados a causa del cultivo de fique. Adicionalmente, si éste biosólido es utilizado en un suelo estéril (a una dosis de 0,5 L/m²) aporta nutrientes esenciales para el crecimiento de plántulas de pasto alpiste. La aplicación del biosólido estabilizado podría ser una alternativa

para reducir el problema de contaminación ambiental y contribuir a la sostenibilidad del sector fitoquímico de la región.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo brindado por COLCIENCIAS, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural MADR, Grupo de investigación en Biohidrometalurgia y Medio Ambiente, Grupo de Investigación en Bioquímica e Ingeniería de Proteínas de la Universidad Industrial de Santander. Al Bacteriólogo Freddy Alonso Mantilla Caballero.

Referencias

- [1] Navas A, Bermúdez F, Machín J. Influence of sewage sludge application on physical and chemical properties of Gypsisols. *Geoderma*. 1998;87(1-2):123–35.
- [2] Mantovi P, Baldoni G, Toderi G. Reuse of

- liquid, dewatered, and composted sewage sludge on agricultural land: effects of long-term application on soil and crop. *Water Res.* 2005;39(2-3):289–96.
- [3] Environmental Protection Agency USEPA/625/R-92/013. Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge. Cincinnati, OH, USA; 2003.
- [4] Official Journal of the European Communities CCE/86/278. Council directive on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture; 1986.
- [5] Oleszczuk PH. Comparison of sewage sludge toxicity to plants and invertebrates in three different soils. *Chemosphere.* 2011;83(4):502–9.
- [6] Finagro. Fique. Producción y zonas de producción. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [Cited: Noviembre 23 de 2011] Disponible: <http://www.finagro.com.co>
- [7] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial; Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural; Departamento Nacional de Planeación. El fique agronomía y transformación. En: Guía ambiental del subsector fiquero. Panamericana Formas e Impresos S.A, Colombia; 2006.
- [8] Castro L, Escalante H, Quintero M, Ortiz C, Guzmán C. Producción de Biogás a partir del bagazo de fique generado durante el beneficio de fique. En: Memorias del IV Simposio de Química Aplicada – SIQUIA. Armenia, Colombia, septiembre, 2009.
- [9] Barrera P, Villareal M, Castro L, Ortiz C, Escalante H. Estudio preliminar de la bioproducción de metano a partir de los residuos del proceso de beneficio del fique. *Rev. Ion.* 2009;22(1):21-25.
- [10] Office of water. USEPA/832-F-00-064. Biosolids Technology Fact Sheet. Land Application of biosolids. Washington, DC, 2000.
- [11] Jin J, Haney R, Arnold J. Potential carbon and nitrogen mineralization in soils from a perennial forage production system amended with class B biosólidos. *Agr Ecosyst Environ.* 2011;141(3-4):461–5.
- [12] Fytili D, Zabaniotou A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—A review. *Renew sust energy rev.* 2008;12(1):116-40.
- [13] Bernard S, Gray NF. Aerobic digestion of pharmaceutical and domestic wastewater sludges at ambient temperature. *Water Res.* 2000;34(3):725-34.
- [14] Banat F, Prechtl S, Bischof F. Aerobic thermophilic treatment of sewage sludge contaminated with 4-nonylphenol. *Chemosphere.* 2000;41(3):297-302.
- [15] Harikishan S, Sung S. Cattle waste treatment and Class A biosólido production using temperature-phased anaerobic digester. *Adv Environ Res.* 2003;7(3):701–6.
- [16] Zhanga P, Zenga G, Zhangb G, Lia Y, Zhanga B, Fan M. Anaerobic co-digestion of biosólidos and organic fraction of municipal solid waste by sequencing batch process. *Fuel process technol.* 2008;89(4):485-9.
- [17] Uggetti E, Llorens E, Pedescoll A, Ferrer I, Castellnou R, García J. Sludge dewatering and stabilization in drying reed beds: Characterization of three full-scale systems in Catalonia, Spain. *Bioresource Technol.* 2009;100(17):3882–90.
- [18] Stefanakis A, Tsihrintzis V. Dewatering mechanisms in pilot-scale Sludge Drying Reed Beds: Effect of design and operational parameters. *Chem Eng J.* 2011;172(1):430-43.
- [19] Liang C, Das KC, McClendon RW. The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend. *Bioresource Technol.* 2003;86(2):131–7.
- [20] Environmental Protection Agency USEPA/822/R-93/004. Technical support document for reduction of pathogens and vector attraction in sewage sludge. U.S. Cincinnati, OH, USA; 1992.
- [21] Fang M, Wong JWC, Li GX, Wong MH. Changes in biological parameters during co-composting of sewage sludge and coal fly ash residues. *Bioresource Technol.* 1998;64(1):55–61.
- [22] Wong JWC, Su D. The growth of *Agropyron elongatum* in an artificial soil mix from coal fly ash and sewage sludge. *Bioresource Technol.* 1997;59(1):57–62.
- [23] Logan T.J, Harrison B. Physical characteristics of alkaline stabilized sewage sludge (N-viro soil) and their effects on soil physical properties. *J Environ Qual.* 1995;24:153–64.
- [24] Wong J, Fang M, Jiang R. Persistency of bacterial indicators in biosolids stabilization with coal fly ash and lime. *Water Environ Res.* 2001;73(5):607–11.
- [25] Laurence W, Nazih S, Yung-Tse H. Advanced biological treatment processes. En: Handbook of Environmental Engineering. Estados

- Unidos: Editorial Humana Press; 2009. p. 443-77.
- [26]Plachá I, Venglovsky J, Maková Z, Martínez J. The elimination of *Salmonella typhimurium* in sewage sludge by aerobic mesophilic stabilization and lime hydrated stabilization. *Bioresource Technol.* 2008;99(10):4269–74.
- [27]International Organization for standardization. ISO 10705-2. Water quality – detection and enumeration of bacteriophages, Part 2. Enumeration of somatic coliphages. International Organization for standardization. Geneva. Switzerland; 2000.
- [28]APHA-AWWA-WPCF, 2001. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed. American Public Health Association, Washington, DC.
- [29]FDA. 1995. Bacteriological analytical manual. *Salmonella*. Chapter 5. 8th edition. United States.
- [30]Norma Oficial Mexicana. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de agua residuales en aguas y bienes nacionales. NOM-001-ECOL. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos naturales y pesca. México; 1996.
- [31]Akram J, Norieh N, Farzadkia M. Comparison of aerobic and lime stabilization methods for evaluation of sewage sludge reuse. *J Environ Sci.* 2011;4(2):182-90.
- [32]Bina B, Movahedian H, Kord I. The effect of lime stabilization on the microbiological quality of sewage sludge. *J Env Health Sci Eng.* 2004;1(1):34-8
- [33]Valdecantos A, Cortina J, Ramón V. Differential field response of two Mediterranean tree species to inputs of sewage sludge at the seedling stage. *Ecol Eng.* 2011;37(9):1350–9.
- [34]Wong J, Ammayappan S. Reduction of indicator and pathogenic microorganism in pig manure trough fly ash and lime addition during alkaline stabilization. *J. Hazard Mater.* 2009;169(1-3):882-9.
- [35]Franco-Hernández O, Mckelligan-González A, López-Olguin A, Espinosa-Ceron F, Escamilla-Silva E, Dendooven Luc. Dynamics of carbon, nitrogen and phosphorus in soil amended with irradiated, pasteurized and limed biosolids. *Bioresource Technol.* 2003;8(1):93–102.
- [36]Topaç Olcay F, Savaş H, Alkan U. The effects of fly ash incorporation on some available nutrient contents of wastewater sludges. *Bioresource Technol.* 2008;99(5):1057–65.
- [37]Kuai L, Douлами F, Verstraete W. Sludge treatment and reuse as soil conditioner for small rural communities. *Bioresource Technol.* 2000;73(3):213-9.
- [38]Azeez J, Van A. Nitrogen mineralization potential of three animal manures applied on a sandy clay loam soil. *Bioresource Technol.* 2010;101(14):5645–51.
- [39]Domínguez-Caraveo H, Jurado P, Melgoza-Castillo A. Emergence and survival of blue grama with biosolids under greenhouse conditions. *J Arid Environ.* 2010;74(1):87–92.
- [40]Eliot E. Land Application of Sewage Sludge and Biosólids. Editorial Lewis Publishers, Estados Unidos; 2003.
- [41]Adegbidia H, Briggs D, Volkb T, White H, Abrahamson P. Effect of organic amendments and slow-release nitrogen fertilizer on willow biomass production and soil chemical characteristics. *Biomass and Bioenergy.* 2003;25(4):389–98.
- [42]Crush J, Sarathchandra U, Donnison A. Effect of plant growth on dehydration rates and microbial populations in sewage biosolids. *Bioresource Technol.* 2006;97(18):2447–52.
- [43]Antolín M, Muro Iara, Sánchez Manuel. Application of sewage sludge improves growth, photosynthesis and antioxidant activities of nodulated alfalfa plants under drought conditions. *Environ Exp Bot.* 2010;68(1):75–82.