

TRATAMIENTO DE LODOS DE FONDO DE LAGUNAS FACULTATIVAS CON ESTABILIZACIÓN EN CONDICIONES DE LABORATORIO

 JHON JAIRO FERIA DIAZ¹
LUISA ELVIRA MARTINEZ ACOSTA²

RESUMEN

En este artículo se muestran los resultados obtenidos en el proceso de estabilización química de lodos de lagunas de estabilización, mediante la adición de cal hidratada común. Se adicionaron en condiciones controladas de laboratorio, dosis de cal al 5 %, 7 %, 9 %, 10 %, 11 %, 12 % y 15 % a una muestra de lodos de fondo de la laguna primaria del sistema de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Montería, Colombia. Se analizaron la peligrosidad del lodo (corrosividad, inflamabilidad y reactividad) y las concentraciones de sulfuros, metales pesados (As, Ba, Cd, Cr, Hg, Ag, Pb, Se), coliformes, salmonella, bacterias mesófilas, áscaris y otros helmintos, antes y después de aplicar una dosis óptima al 10%. Con esta dosis se logró controlar la reactividad por sulfuros y cianuros, pero no se redujeron las concentraciones de coliformes y de bacterias mesófilas. Algunos metales pesados (Cd, Cr, Hg, Ag, Pb) aumentaron luego de la aplicación de la dosis de cal hidratada, aunque las concentraciones halladas no constituyen peligro ambiental, de acuerdo a la normatividad ambiental vigente.

PALABRAS CLAVE: lodos, cal hidratada, pH, metales pesados, reactividad, coliformes.

BOTTOM SLUDGE TREATMENT OF FACULTATIVE PONDS WITH STABILIZATION IN LABORATORY CONDITIONS

ABSTRACT

In this paper we show the results obtained in the chemical stabilization process of pond sludge by adding common hydrated lime. Dosages of 5%, 7%, 9%, 10%, 11%, 12% and 15% were added in controlled laboratory conditions to a sample of sludge taken from the bottom of the primary facultative pond of the wastewater treatment system of Monteria in Colombia. Dangerousness (corrosivity, flammability and reactivity) and concentrations of sulfides, heavy metals (As, Ba, Cd, Cr, Hg, Ag, Pb, Se), coliforms, salmonella, ascaris and other helminths were analyzed in the sludge sample, before and after the application of an optimal 10% dosage. The reactivity by sulfides and cyanides in the sludge sample was controlled with this dosage, however, coliforms and mesophilic bacteria concentrations did not

- 1 Ingeniero sanitario. MsC. en Ciencias Ambientales. Docente Facultad de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Coordinador del Grupo de Investigaciones de Calidad de Aguas y Modelación Hídrica y ambiental-CAMHA. Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Montería, Montería (Colombia).
- 2 Ingeniera civil. MsC. en Ingeniería Civil con énfasis en Ambiental. Docente Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Montería, Montería (Colombia).



Autor de correspondencia Feria-Díaz, J. J. (Jhon Jairo):
Carrera 6 N. 97 A 99, Universidad Pontificia Bolivariana,
sede Montería, Montería (Colombia).
Tel: (574) 7860146 Ext.152
Correo electrónico: jhon.feria@gmail.com

Historia del artículo:

Artículo recibido: 20-V-2013 / Aprobado: 28-II-2014
Disponible online: 12 de mayo 2014
Discusión abierta hasta mayo de 2015



decrease. Some heavy metals increased (Cd, Cr, Hg, Ag, Pb) after the application of hydrated lime dosage, although the concentrations found are not representing environmental danger according to existing environmental regulations.

KEYWORDS: Sludges; Hydrated Lime; pH; Heavy Metal; Reactivity; Coliforms.

TRATAMENTO DE LODO DE FUNDO DE LAGOAS FACULTATIVAS COM ESTABILIZAÇÃO EM CONDIÇÕES DE LABORATÓRIO.

RESUMO

Neste artigo apresentam-se os resultados obtidos no processo de estabilização química de lodos de lagoas de estabilização, mediante a adição de cal hidratada comum. Adicionaram-se em condições controladas de laboratório, dose de cal ao 5%, 7%, 9%, 10%, 11%, 12% e 15% a uma mostra de lodos de fundo da lagoa primária do sistema de tratamento de águas residuais da cidade de Montería, Colômbia. Analisaram-se a periculosidade do lodo (corrosividade, inflamabilidade e reatividade) e as concentrações de sulfeto, metais pesados (As, Ba, Cd, Cr, Hg, Ag, Pb, Se), coliformes, salmonela, bactérias mesófila, áscaris e outros helmintos, antes e depois de aplicar uma dose ótima ao 10%. Com este dose conseguiu-se controlar a reatividade por sulfetos e cianuretos, mas não se reduziram as concentrações de coliformes e de bactérias mesófilas. Alguns metais pesados (Cd, Cr, Hg, Ag, Pb) aumentaram logo da aplicação da dose de cal hidratada, embora as concentrações achadas não constituem perigo ambiental, de acordo com a normatividade ambiental vigente.

PALAVRAS-CHAVE: Lodos; Cal hidratada; PH; Metais pesados; Reatividade; Coliformes.

1. INTRODUCCIÓN

Las lagunas de estabilización son una excelente alternativa de tratamiento de aguas residuales domésticas para las municipalidades colombianas, por ser tecnología de baja complejidad y de mantenimiento y operación simple. La remoción de materia orgánica se realiza por sedimentación y a través de procesos biológicos aerobios y anaerobios que generan lodos de fondo en función del tiempo, que disminuyen la profundidad útil de la laguna. Se han reportado tasas de acumulación de lodos de fondo de 0,052 m³/persona-año (Gonçalves, *et al.*, 2002) y de 0,050 m³/persona-año (Peña, *et al.*, 2000) en Brazil y Colombia, respectivamente.

La acumulación de lodos es mayor en las lagunas primarias y puede afectar su rendimiento por la disminución del volumen efectivo y el cambio de forma del fondo, que alteran la hidráulica del reservorio (Peña, *et al.*, 2000). Por lo tanto, la eliminación periódica de lodos suele ser inevitable y la sostenibilidad a largo plazo de estos sistemas dependerá de su gestión segura y eficaz, siendo necesario evacuarlos

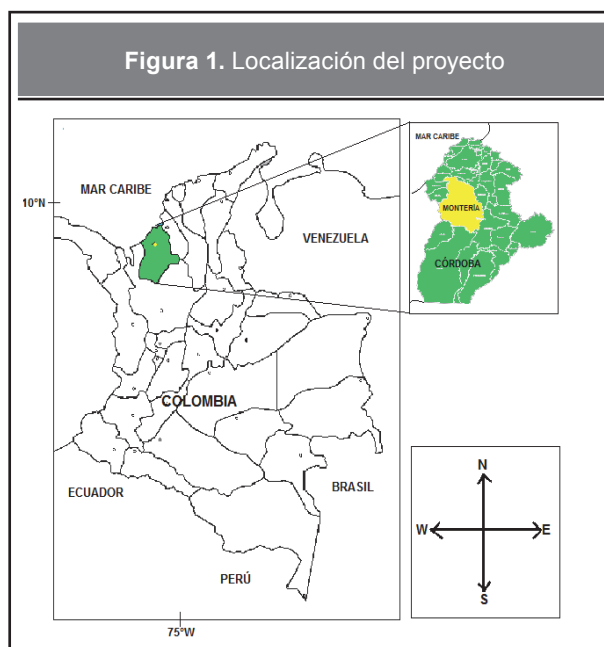
cada 5 a 10 años en la primera etapa de la vida útil de la laguna (Bouza y Salas, 2013). La disposición adecuada de los lodos de fondo, constituye un verdadero problema ambiental debido a que generalmente, son reactivos por cianuros y por sulfuros, como resultado de la oxidación de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas, que suele involucrar reacciones de reducción de sulfatos orgánicos, por acción de las bacterias desulfobivrio (Metcalf y Eddy, 1995). Adicionalmente, estos lodos pueden contener organismos patógenos y contaminantes, un amplio rango de metales pesados y altas concentraciones de sales solubles que pueden afectar negativamente las propiedades del suelo (Samaras, *et al.*, 2008), por esta razón se consideran peligrosos y que requieren de tratamiento.

Una de las técnicas más económicas y simples para evitar la actividad bacteriana en el lodo, es la estabilización química con adición de cal hasta elevar el pH por encima de 11,0 (Wong, *et al.*, 2000; Nakasaki, *et al.*, 1985). La reacción entre la cal y el agua eleva el pH y reduce el contenido de patógenos (Diocaretz, *et al.*, 2010) debido a la creación de un entorno que no favorece la supervivencia de los microorganismos

(Metcalf y Eddy, 1998). Varios estudios validan la necesidad de un pH estable en 12,0 por un período de 20 a 60 días para la eliminación efectiva de *Salmonella* en lodos de aguas residuales (Amer, 1997; Reimers, et al., 1998), considerándose así la estabilización con cal como una opción de tratamiento que requiere relativamente de mucho tiempo (Arthurson, 2008). Sin embargo, Strauch (1999) informó de la eliminación de *Salmonella* en un período de 24 horas a un pH estable de 10. El autor concluyó que la eliminación de estos patógenos depende del pH obtenido, del período de actividad de la cal y de la desecación de los lodos (Strauch, 1999). Acorde con lo anterior, Bina, et al. (2004) demostraron que la calidad microbiológica de los lodos de un sistema de tratamiento, reunía los requisitos para ser clasificados en la categoría B, en las dos primeras horas del ensayo a un pH de 12, mientras que para ser clasificados en la categoría A, la inactivación de *Salmonella* y *Coliformes* fecales se lograba después de 2 y 24 horas, respectivamente, con en el mismo pH (Bina, et al., 2004).

Las reacciones involucradas en este proceso van desde la neutralización de ácidos hasta la precipitación de elementos indeseables, en forma de sales insolubles (Gonçalves, 1999). Además, produce amoníaco que favorece la reducción de los huevos de helmintos viables (Méndez, et al., 2002). Para la cal virgen los parámetros determinantes en la eficiencia del proceso de estabilización, son el aumento del pH y de la temperatura (Thomaz-Soccol, 1998), mientras que para la cal hidratada, solamente depende del aumento del pH (Andreoli, 1997).

Una ventaja adicional de la estabilización con cal es que el pH alto favorece la precipitación de la mayoría de los metales presentes en el lodo, reduciendo de este modo su solubilidad y movilidad. Los iones libres de calcio proporcionados por la cal hidratada forman complejos con especies olorosas de sulfuros, tales como el sulfuro de hidrógeno y los mercaptanos orgánicos, resultando finalmente un lodo con menos olor. Por otra parte, la cal induce un aumento en el contenido de sólidos, haciendo más fácil el manejo y el almacenamiento de los lodos (Oates, 1998). Este proceso ha sido propuesto como tratamiento avanzado de lodos de aguas residuales en importantes documentos

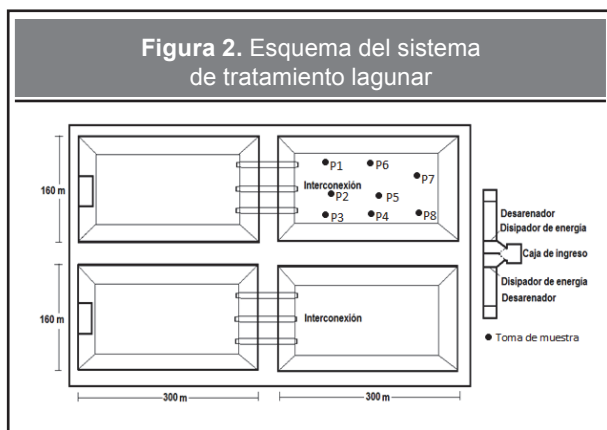


de trabajo de la Unión Europea, para su reutilización y disposición adecuada (Spinosa, 2004).

El objetivo de este trabajo es mostrar los resultados de la estabilización de lodos de fondo de la laguna facultativa de la ciudad de Montería, Colombia y las características fisicoquímicas de los lodos antes y después del proceso de estabilización química con cal hidratada.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Las muestras se recolectaron del sistema de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Montería, en el norte de Colombia. El sistema de tratamiento recibe las aguas residuales de aproximadamente 300.000 habitantes, con un caudal afluente promedio de 240 L/s. Existen dos trenes de tratamiento paralelos, cada uno con una laguna facultativa, seguida por una de maduración. Se tomaron ocho muestras de la laguna facultativa del tren de tratamiento más antiguo, para conocer las características de corrosividad, inflamabilidad y reactividad del lodo y las concentraciones de Sulfuros, Metales pesados (As, Ba, Cd, Cr, Hg, Ag, Pb, Se), Potencia bacteriana, *Coliformes*, *Salmonella sp*, *Ascaris lumbricoide* y otros helmintos. Estos análisis se realizaron de acuerdo con los métodos establecidos por la *American Public*



Health Association (APHA, 1995) y por la *Environmental Protection Agency* (EPA, 1982).

En la **Figura 1** se muestra la localización del sistema de tratamiento y en la **Figura 2**, se muestra un esquema de las lagunas existentes y el lugar de la toma de muestras.

Las muestras fueron recolectadas, almacenadas y transportadas al laboratorio de la Universidad Pontificia Bolivariana en Montería, siguiendo el protocolo descrito por la Agencia de Protección Ambiental de USA (EPA, 1993).

De la muestra más representativa, según el resultado del análisis estadístico aplicado, se tomaron 15 kilogramos y se prepararon 7 submuestras de 1,0 kilogramo cada una, mezcladas con dosis de cal hidratada al 5 %, 7 %, 9 %, 10 %, 11 %, 12 % y 15 %, es decir, en relación peso a peso de lodo seco y cal hidratada (Lim, *et al.*, 2002; Samaras, *et al.*, 2008; Madera, *et al.*, 2011). Se midió el pH de las submuestras, con tres repeticiones, cada 30 minutos durante las 2 primeras horas y luego, cada hora durante 22 horas continuas. La EPA recomienda para la reducción de la atracción de vectores en los lodos, la adición de cal en cantidades suficientes para alcanzar, exceder y mantener el pH en 12,0 unidades durante un período mínimo de 2 horas y mantenerlo por lo menos, en 11,5 sin agregar más cal durante un período adicional de 22 horas (EPA, 1992; Andreoli, 2001). El pH de los lodos, en proporción de 1:2,5 (w/v, peso de lodo: volumen de agua destilada), se midieron con un potenciómetro marca Metrohm, modelo 827 (Wong, *et al.*, 2000;

Page, *et al.*, 1982; APHA, 1995). Adicionalmente, se analizaron las características de corrosividad, reactividad (por Sulfuros y Cianuros) e inflamabilidad y las concentraciones de metales pesados (As, Ba, Cd, Cr, Hg, Ag, Pb, Se), coliformes, salmonela, *Áscaris lumbricoides*, Potencia bacteriana, bacterias mesófilas y otros helmintos antes y después de aplicada la dosis mínima en la submuestra de lodo que permitió un pH mayor a 11,5 durante el período del ensayo.

Los datos fueron analizados usando el paquete estadístico Statgraphics Centurion®, versión XVII, con un computador personal DELL. Se utilizó ANOVA (Valor-P < 0,05) de una vía para comparar las principales diferencias de concentraciones de las muestras tomadas en la laguna y coeficientes de variación, para determinar el grado de homogeneidad o heterogeneidad del pH en función de las dosis de cal hidratada aplicada al lodo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los análisis de las muestras de lodo, se presentan en la **Tabla 1**. Ninguna de las muestras tiene características corrosivas o de inflamabilidad, pero todas son reactivas por sulfuros, con concentraciones elevadas en la zona de ingreso de la laguna facultativa. La salmonela tiene presencia no uniforme en el área de fondo de la laguna, sin embargo, no se detectó presencia de huevos de *Áscaris lumbricoide* ni de otros helmintos. A excepción del bario y del mercurio, las concentraciones de metales pesados en las muestras de lodo, estuvieron por debajo del límite detectable del método de análisis utilizado, lo que indica la poca presencia de estos contaminantes en los lodos de fondo de la laguna.

Los resultados estadísticos señalan que cualquier muestra que se tome es válida para obtener las submuestras a las cuales se aplicaran las diferentes dosis de cal hidratada, puesto que las pruebas de verificación de varianzas respaldan la hipótesis nula de que las desviaciones estándar de cada una de las ocho muestras es la misma. El valor -P es menor a 0,05, es decir, que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95,0 % de confianza. Se seleccionó la muestra

Tabla 1. Características fisicoquímicas y biológicas de los lodos de fondo

| Análisis | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | Nivel Referencia |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Corrosividad | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Inflamabilidad | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Reactividad | + | + | + | + | + | + | + | + | - |
| Sulfuros residuo (mg/L) | 6572,1 | 7572,1 | 5045,6 | 3929,3 | 1415,3 | 2698,8 | 2291,7 | 4322,8 | 500 ppm |
| Potencia bacteriana (UCF/g) | 14x10 ⁵ | 39x10 ³ | 11x10 ⁴ | 98x10 ³ | 54x10 ³ | 11x10 ⁵ | 11x10 ⁶ | 77x10 ⁴ | - |
| <i>Salmonella</i> sp (NMP. Salmo./g) | 0,02 | 0,0 | 5,61 | 0,22 | 0,76 | 5,56 | 0 | 6,50 | - |
| Coliformes fecales (NMP de C/g) | 16x10 ⁴ | 20x10 ⁴ | 42x10 ⁴ | 28x10 ⁴ | 58x10 ⁴ | 42x10 ⁴ | 60x10 ⁴ | 50x10 ⁴ | 3, 2x10 ⁶ |
| <i>Áscaris lumbricoide</i> (huevos/gr de base seca lodos) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Otros helmintos | No obs. | No obs. | No obs. | No obs. | No obs. | No obs. | No obs. | No obs. | - |
| Arsénico (mg/L) | <0,552 | <0,552 | <0,552 | <0,552 | <0,552 | <0,552 | <0,552 | <0,552 | 5,00 |
| Bario (mg/L) | <0,031 | <0,031 | <0,031 | 1,43 | 1,59 | 1,85 | 1,27 | 1,95 | 100,0 |
| Cadmio (mg/L) | <0,006 | <0,006 | <0,006 | <0,006 | <0,006 | <0,006 | <0,006 | <0,006 | 1,00 |
| Cromo (mg/L) | <0,088 | <0,088 | <0,088 | <0,088 | <0,088 | <0,088 | <0,088 | <0,088 | 5,00 |
| Mercurio (µg/L) | <0,488 | <0,488 | <0,488 | <0,488 | 4,59 | <0,488 | <0,488 | <0,488 | 0,20 |
| Plata (mg/L) | <0,0032 | <0,0032 | <0,0032 | <0,0032 | <0,0032 | <0,0032 | <0,0032 | <0,0032 | 5,00 |
| Plomo (mg/L) | <0,031 | <0,031 | <0,031 | <0,031 | <0,031 | <0,031 | <0,031 | <0,031 | 5,00 |
| Selenio (mg/L) | <0,230 | <0,230 | <0,230 | <0,230 | <0,230 | <0,230 | <0,230 | <0,230 | 1,00 |

del punto 3 para obtener las submuestras requeridas para el ensayo.

En la **Tabla 2** se muestran los resultados del comportamiento del pH con diferentes dosis de cal hidratada aplicada a las submuestras del lodo, en condiciones de laboratorio. Las dosis al 5 % y 7 %

cayeron a pH menores de 12,0 unidades durante las primeras tres horas del ensayo, razón por la cual se descartaron. La dosis del 10 % de cal hidratada mantuvo el pH de los lixiviados de los lodos con un valor promedio de $12,20 \pm 0,15$, con un máximo de 12,42 unidades de pH y un valor mínimo de 11,84 unidades al final del ensayo, reuniendo así

las condiciones mínimas para ser considerada como una posible dosis óptima (pH mínimo de 11,5 unidades).

Las dosis del 11 % al 15 %, mantuvieron el pH por encima de 12 unidades, sin llegar a 12,5 unidades y con un coeficiente de variación muy pequeño a lo largo del ensayo. Si se tiene en cuenta que la dosis óptima será la mínima dosis de cal hidratada aplicada a los lodos, capaz de conservar el pH de sus lixiviados por encima de 11,5 unidades de pH, la dosis al 10 % es la dosis óptima para la estabilización de los lodos de fondo de la laguna facultativa estudiada.

En la **Tabla 3** se muestra el comportamiento de los criterios evaluados para definir la peligrosidad de los lodos (Corrosivo, Reactivo, Inflamable) antes y después de la aplicación de la dosis óptima.

Para considerar un lodo peligroso a partir de sus características de corrosividad, el desecho deber ser acuoso y presentar un pH menor o igual a 2,0 o mayor

o igual a 12,5 unidades de pH, de acuerdo a lo establecido en el anexo 3 del Decreto 4741 de 2005. Según la **Tabla 3** las muestras no presentaron características de corrosividad y el pH se mantuvo en el rango descrito.

La reactividad de un residuo peligroso depende en gran medida de la concentración de sulfuros y cianuros presentes en él. Dado que la normatividad colombiana de residuos peligrosos no cuantifica el valor mínimo permisible para considerar un residuo peligro por reactividad a partir de las concentraciones de sulfuros y cianuros, se utilizó como referente la norma Mexicana (NOM-052-SEMARNAT-1993), la cual establece que un lodo cuando se expone a condiciones de pH entre 2,0 y 12,5 unidades, puede generar gases, vapores o humos tóxicos y ser reactivos con concentraciones mayores de 250 mgCN/kg de residuo para los cianuros o de 500 mgS⁻²/kg de residuo para los sulfuros. La muestra de lodo fresco, presentó características reactivas, con concentraciones de

Tabla 2. Comportamiento pH con distintas dosis de cal hidratada

| Tiempo (Horas) | Concentración de la Dosis de Cal Hidratada (%) | | | | | | | |
|-----------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0 | 5 | 7 | 9 | 10 | 11 | 12 | 15 |
| 1 | 6,88 | 11,83 | 11,96 | 12,39 | 12,41 | 12,43 | 12,44 | 12,46 |
| 2 | 7,22 | 11,82 | 11,93 | 12,35 | 12,42 | 12,43 | 12,41 | 12,45 |
| 3 | 7,17 | 11,48 | 11,60 | 11,93 | 12,33 | 12,40 | 12,42 | 12,44 |
| 4 | 7,09 | - | - | 12,13 | 12,18 | 12,27 | 12,31 | 12,43 |
| 5 | 8,01 | - | - | 12,02 | 12,23 | 12,30 | 12,31 | 12,41 |
| 6 | 7,28 | - | - | 11,90 | 12,24 | 12,27 | 12,31 | 12,43 |
| 7 | 7,14 | - | - | 11,95 | 12,19 | 12,29 | 12,30 | 12,42 |
| 8 | 6,98 | - | - | 12,00 | 12,12 | 12,25 | 12,31 | 12,41 |
| 9 | 7,01 | - | - | 12,00 | 12,20 | 12,27 | 12,31 | 12,42 |
| 10 | 7,11 | - | - | 12,03 | 12,20 | 12,27 | 12,32 | 12,43 |
| 11 | 8,03 | - | - | 11,99 | 12,19 | 12,25 | 12,33 | 12,42 |
| 12 | 7,12 | - | - | 12,00 | 12,20 | 12,27 | 12,33 | 12,40 |
| 16 | 7,05 | - | - | 11,80 | 12,00 | 12,22 | 12,32 | 12,40 |
| 24 | 6,98 | - | - | 11,49 | 11,84 | 12,17 | 12,31 | 12,42 |
| Promedio pH | 7,22 | 11,71 | 11,83 | 12,00 | 12,20 | 12,29 | 12,34 | 12,42 |
| Desv. Estándar | 0,35 | 0,20 | 0,20 | 0,22 | 0,15 | 0,08 | 0,05 | 0,02 |
| Coef. Variación | 0,05 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 |

Tabla 3. Peligrosidad del lodo por Corrosividad, Reactividad e Inflamabilidad

| Parámetros | Antes de dosis óptima | Después de aplicar dosis óptima | Nivel límite de Referencia |
|---|-----------------------|---------------------------------|------------------------------|
| Corrosividad | Negativa | Negativa | - |
| pH-Residuo Unidades pH | 7,637 | 12.184 | pH<2 y pH>12,5* |
| Reactividad | Positiva | Negativa | - |
| Cianuro Reactivo mg CN-/Kg _(BS) | 3373,50 | 385,55 | 250 mg C/kg** |
| Sulfuro Reactivo mg S ⁻² /Kg _(BS) | 1211,14 | 9,0 | 500 mg S ⁻² /Kg** |
| Inflamabilidad | Negativa | Negativa | - |

* Decreto 4741/2005 (Colombia) ** NOM-052-SEMARNAT-1993 (México)

Tabla 4. Metales pesados en lixiviados de los lodos

| Parámetros | Antes de dosis óptima | Después de aplicar dosis óptima | Nivel máximo permisible en Lixiviado* |
|----------------------------|-----------------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| Arsénico-Lixiviado mg As/L | <0,552 | <0,552 | 5.00 |
| Bario-Lixiviado mg Ba/L | 1.911 | 0.552 | 100.00 |
| Cadmio-Lixiviado mg Cd/L | <0,006 | 0.014 | 1.00 |
| Cromo-Lixiviado mg Cr/L | <0,088 | 0.151 | 5.00 |
| Mercurio-Lixiviado µg Hg/L | <0,488 | 13.242 | 200 |
| Plata-Lixiviado mg Ag/L | <0,0032 | 0.0260 | 5.00 |
| Plomo-Lixiviado mg Pb/L | <0,031 | 1.351 | 5.00 |
| Selenio-Lixiviado mg Se/L | <0,230 | <0,230 | 1.00 |
| % Sólidos (%) | 74.08 | 87.19 | N/A |

* Dec. 4741/2005 (Colombia)

cianuros y sulfuros mayores a los valores límites de referencia, pero luego de la aplicación de la dosis óptima, no presentó reactividad por sulfuros, pero sí por cianuros si se compara con la norma mexicana de referencia. Las características de inflamabilidad de las muestras de lodos dieron negativas.

En la **Tabla 4** se muestra los resultados de la caracterización de metales pesados en los lixiviados de los lodos. La concentración de algunos metales pesados como cadmio, cromo, mercurio, plata y plomo aumentó en los lixiviados luego de la aplicación de la dosis óptima. Lo anterior se explica porque estos elementos pueden pasar fácilmente de la fase sólida

a la fase líquida en los sistemas acuáticos y viceversa, debido tanto a variaciones de los componentes bióticos como abióticos, principalmente por las variaciones de pH (Alloway, 1995). El pH del sedimento tiene un efecto sobre la biodisponibilidad de la mayoría de los metales pesados al afectar el equilibrio entre la especiación metálica, solubilidad, adsorción e intercambio de iones, logrando solubilizar los metales en el lixiviado (Reichman, 2002). En sedimentos ácidos, se produce una competencia de los iones de H⁺ con los cationes metálicos por los sitios de intercambio. A pH altos en los lodos se produce desorción de los metales pesados hacia el medio acuoso, aumentando su concentración y su biodisponibilidad en el lixiviado, mientras que

a pH bajos en los lodos, ocurre el efecto contrario (Alloway, 1995).

Con excepción del Mo, Se y As, la biodisponibilidad de los metales pesados en los lodos disminuyó con el aumento del pH del lodo debido a su precipitación como hidróxidos insolubles, carbonatos y complejos orgánicos, pero aumenta la concentración de los mismos en sus lixiviados (Silviera, *et al.*, 2003). Lo anterior explica lo ocurrido en las etapas del ensayo.

Sin embargo, si se tienen en cuenta los valores de referencia establecidos en la anexo 3 del Decreto 4741 de 2005, todas las concentraciones halladas en las muestras analizadas bajo las diferentes condiciones del ensayo se mantuvieron por debajo de los niveles máximos permisibles en el lixiviado, de tal forma que el riesgo de toxicidad por metales pesados presentes en los lixiviados es bajo para el medio ambiente.

Un residuo o desecho con características infecciosas se considera peligroso, cuando contiene agentes patógenos. Los agentes patógenos son microorganismos (tales como bacterias, parásitos, virus, rickettsias y hongos) y otros con suficiente virulencia y concentración como para causar enfermedades en los seres humanos o en los animales. Sin embargo, la norma colombiana no establece valores límites permisibles, razón por la cual se tomará la ausencia de estos agentes patógenos como nivel

máximo permisible. La legislación francesa considera un lodo higienizado, si luego de tratado, contiene menos de tres huevos de helmintos viables por cada 10,0 gramos de lodos (*Journal Officiel Français*, 1998), mientras que la EPA propone como objetivo para un lodo Clase A, reducir la Salmonella, los virus entéricos y los huevos de helmintos viables por debajo de los límites detectables. En el caso de los huevos de helmintos, se define el límite detectable, como menos de un huevo de helmintos viables por cada 4,0 gramos de biosólidos sólidos totales (EPA, 1992). En la **Tabla 5** se muestran los resultados obtenidos para las características de biopeligrosidad de los lodos.

Los resultados obtenidos antes y después de aplicada la dosis óptima de cal hidratada a las muestras de lodos, en condiciones de laboratorio, indican que no hay cambios en las concentraciones de los parámetros biológicos. En cuanto las bacterias mesófilas y los coliformes fecales y totales, se hallaron concentraciones que no indican efecto alguno de la dosis óptima aplicada en la eliminación total o parcial de estos microorganismos. Estos resultados contrastan con los hallados en estudios recientes, donde se sostiene el control y la inactivación de salmonela y coliformes fecales con dosis que garanticen un pH de 12,0 unidades durante 24 horas (Bina, *et al.*, 2004). Estudios de estabilización para lodos primarios de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cañaveralejo, de Cali, Colombia,

Tabla 5. Concentraciones de coliformes, salmonela, *Áscaris lumbricoide*, bacterias mesófilas y otros helmintos en los lodos

| Parámetros | Antes de dosis óptima | Después de aplicar dosis óptima | Nivel máximo permisible en lixiviado* |
|--|-----------------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| Coliformes totales, NMP/100 mL | 1600 | 1600 | Ausencia |
| Coliformes fecales, NMP/100 mL. | 1600 | 1600 | Ausencia |
| Coliformes fecales, NMP colif fec/g | 18x10 ⁴ | 18x10 ⁴ | Ausencia |
| Salmonela, NMP salmo/100 MI. | 0 | 0 | Ausencia |
| Salmonela, NMP salmo/g | 0 | 0 | Ausencia |
| <i>Ascaris lumbricoide</i> huevos/gr. Base seca. | 0 | 0 | Ausencia |
| Potencia bacteriana, UFC/gr | 47x10 ⁴ | 47x10 ⁴ | Ausencia |
| Bacterias mesófilas, UFC/ml | 54 | 54 | Ausencia |
| Otros helmintos | No se observaron | No se observaron | Ausencia |

* Dec. 4741/2005 (Colombia)

reportan control de coliformes con pH cercano a 12 unidades en un período de 3 días, a partir de una dosis de cal hidratada al 15 % (Madera, *et al.*, 2011), lo que sugiere que la dosis del 10 % aplicada al lodo estudiado no garantiza una completa higienización, pero sí una reducción de atracción de vectores en los lodos. Sin embargo, es posible considerar que la ausencia de *Salmonella* y huevos de *Áscaris lumbricoide* en el lodo estudiado, indica bajo riesgo biológico.

4. CONCLUSIONES

Aplicaciones de cal hidratada, superiores al 10 % respecto a la cantidad de sólidos presentes en el lodo, permiten alcanzar un pH sobre 12 unidades durante las dos primeras horas de aplicación y superior a 11,5 unidades durante las 22 horas siguientes, sin embargo, esta dosis no garantiza la eliminación total de agentes patógenos como bacterias mesófilas y los coliformes fecales y totales presentes en la muestra de lodo. En contraste, la dosis aplicada logró reducir eficientemente la reactividad del lodo, principalmente causada por sulfuros (mayor al 99 % de eficiencia), y en una proporción menor, por cianuros (88,6 % de eficiencia). De acuerdo a las características de peligrosidad, toxicidad y de riesgo biológico obtenidas en el lodo, después de la aplicación de la dosis óptima de cal hidratada seleccionada, es posible afirmar que el lodo tratado no representa un riesgo ambiental al momento de su disposición final, ya sea en un relleno sanitario o en un suelo sin vocación agrícola.

AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen y agradecen el apoyo económico dado por la Empresa Proactiva, Aguas de Montería S.A. E.S.P., y al Laboratorio de Calidad de Aguas de la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Montería, donde se realizaron los análisis fisicoquímicos de los lodos.

REFERENCIAS

Alloway, B. (1995). *Chapter 2: Soil process and the behavior of the heavy metals*. Blackie Academic and Professional. 2nd edition, London, pp. 11-37.

- Amer, A. A. (1997). Destruction of Sludge Pathogenic Bacteria Using Quick Lime and Cement Dust. *Egyptian Journal of Soil Science*, 37(3). pp. 343-354
- American Public Health Association, APHA. (1995). *Standard Methods for the Examination of Waste and Wastewater*. 20th edition. Washington, DC. USA.
- Andreoli, C. V.; Domaszak, S.; Fernandez, F. y Lara, A. I. (1997). Proposta preliminar de regulamentação para a reciclagem agrícola do lodo de esgoto no Paraná. *Revista Técnica Sanepare*, 7(1), pp. 53-60.
- Andreoli, V. (2001). *Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final*. Brazil: RiMa, ABES. 1ª Edição. p. 93.
- Arthurson V. (2008). Proper Sanitization of Sewage Sludge: a Critical Issue for a Sustainable Society. *Applied And Environmental Microbiology*, 74(17), pp. 5267-5275.
- Bina, B.; Movahedian, H.; Kord, I. (2004). The Effect of Lime Stabilization on the Microbiological Quality of Sewage Sludge. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 1, pp. 34-38.
- Bouza-Deaño, R.; Salas-Rodríguez J.J. (2013). Distribution and Spatial Variability of Sedges in a Wastewater Stabilization Pond System without Desludging for a Long Period of Time. *Ecological Engineering*, 50, pp. 5-12
- Diocaretz, M.C.; Vidal, G. (2010). Aspectos técnicos y económicos de procesos de higienización de lodos provenientes del tratamiento de aguas servidas, *Theoria*, 19(1), pp. 51-60.
- Environmental Protection Agency, EPA. (1982). *Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods*. EPA, Publication SW-846. Second Edition. Washington, D.C. USA.
- Environmental Protection Agency, EPA. (1992). *Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge Under*. EPA, Under 40 CFR Part 503. Washington, D.C. USA.
- Environmental Protection Agency, EPA. (1993). *Preparing Sewage Sludge For Land Application Or Surface disposal*. EPA, 40 CFR Part 503. Washington, D.C. USA.
- Gonçalves, R. F., (1999). "Gerenciamento do lodo de lagoas de estabilização não mecanizadas". Departamento de Hidráulica e Saneamento Centro Tecnológico Universidade Federal do Espírito Santo. Edital 01/99 - PROSAB / FINEP.
- Gonçalves, R.F., (2002). Recycled sludge thickening and digestion pond from physicochemical upgrading process of facultative pond effluent. *Proceedings of 5th*

- International IWA Specialist Group Conference on Waste Stabilization Ponds, Pond Technology for the New Millennium*. Auckland, New Zealand.
- Journal officiel français. (1998). Prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles, Code permanent environnement et nuisances. Arrêté du 8 janvier 1998. Bulletin 245. p. 6605–12.
- Lim, S.; Wangi, J.; Lee, J.; Lee, K. y Kim, N. (2002). Engineering Properties of Water/Wastewater-Treatment Sludge Modified by Hydrated Lime, Fly Ash and Loess. *Water Research*, 36. pp. 4177–4184.
- Madera, C.; Mara, D.; Torres, P. (2011). Sanitization of Biosolids from Chemically Enhanced Primary Treatment Plant: Composting or Alkali Stabilization? *Ingeniería y Competitividad*, 13(2), pp. 23 – 31.
- Méndez, J.; Jiménez, B.; Salgado, G. (2002). Efecto del amoníaco en la estabilización alcalina de lodos residuales. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. México, p.8.
- Metcalf y Eddy. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales: Redes de alcantarillado y bombeo*. España: Mc. Graw Hill. Segunda Edición, pp. 262.
- Metcalf & Eddy. (1998). *Ingeniería Sanitaria: Tratamiento, Evacuación y Reutilización de Aguas Residuales*. España: Mc. Graw Hill. Tercera Edición, pp. 916-917.
- Nakasaki, K.; Shoda, M. and Kubota, H. (1985). Comparison of Composting of Two Sewage Sludges. *Journal of Fermentation Technology*, 63. pp. 537 – 543.
- Nelson, K.L.; Yang, I.J. (2004). The Effects of Degradation and Consolidation on Sludge Accumulation in Primary Wastewater Stabilization Ponds. *6th International Conference on Waste Stabilization Ponds*. Avignon, France.
- Oates, J. A. H. (1998). *Lime and Limestone: Chemistry and Technology, Production and Uses*. Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, Germany.
- Page A. L.; Miller, R. H. and Keeney, D. R. (1982). *Method of Soil Analysis, Part 2-Chemical and Microbiological Properties*, 2nd ed. ASA, SSSA Publ, Madison, Wisconsin, USA, *Agronomy*, No. 9.
- Riechaman, M. (2002). The Responses of Plants to Metals Toxicity: A Review Focusing on Copper, Manganese and Cinc. *Australian Minerals and Energy Environment Foundation*, pp. 54.
- Reimers, R. S. E. R.; Desocio, W. S.; Bankston, and J. A. Oleszkiewicz. (1998). Current/Future Advances in Biosolids Disinfection Processing. In Proceedings of the 71st Water Environment Federation Technical Exhibit Conference, Orlando, Florida. Water Environment Federation. Alexandria, VA. pp. 445–459.
- Samaras, P.; Papadimitriou, C.A.; Haritou, I.; Zouboulis, A.I. (2008). Investigation of Sewage Sludge Stabilization Potential by the Addition of Fly Ash and Lime. *Journal of Hazardous Materials*, 154. pp. 1052 – 1059.
- Silviera, M.; Alleoni, L.; Guilherme, L. (2003). Biosolids and Heavy Metals in Soils. *Scientia Agricola*, 60(4), pp. 793-806.
- Spinosa L. (2004). From Sludge to Resources Through Biosolids. *Water Science and Technology*, 50(9), pp 1-9.
- Strauch, D. (1999). Improvements of the Quality of Sludge: Microbial Aspects. In A. H. Dirkszawger and P. L. Hermitz (ed.). *Sewage sludge treatment and use*. Elsevier, London, United Kingdom. pp. 160–169.
- Thomaz-Soccol, V. (1998). Aspectos sanitários do lodo de esgoto. Anais do I Seminário sobre Gerenciamento de Biosólidos do Mercosul, Curitiba, Paraná. pp. 65-72.
- Wong, J., Fang, M. (2000). Effects of Lime Addition on Sewage Sludge Composting Process. *Water Research*, 34(15), pp. 3691–3698.

**PARA CITAR ESTE ARTÍCULO /
TO REFERENCE THIS ARTICLE /
PARA CITAR ESTE ARTIGO /**

Feria-Díaz, J. J.; Martínez-Acosta, L. E. (2014). Tratamiento de lodos de fondo de lagunas facultativas con estabilización en condiciones de laboratorio. *Revista EIA*, 11(21) enero-junio, pp. 113-122. [Online]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.14508/reia.2014.11.21.113-122>