



Evaluación del efecto del peróxido de hidrógeno y estabilización alcalina con cal en el manejo de lodos reactivos e infecciosos¹

Jacqueline Betancur², Solange Sánchez³, Diana Catalina Rodríguez⁴, Gustavo Peñuela⁵

Evaluation of the effect of hydrogen peroxide and alkaline stabilization with lime on the treatment of reactive and infectious sludge

Avaliação do efeito do peróxido de hidrógeno e estabilização alcalina com cal no manejo de lama reativos e infecciosos

RESUMEN

Introducción. El tratamiento biológico de las aguas residuales genera subproductos como los lodos que, a su vez, requieren procedimientos para su disposición como residuos no peligrosos. **Objetivo.** En este trabajo se evalúa el efecto de la adición de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y estabilización alcalina con cal (CaO) en la disminución de los sulfuros y la viabilidad de huevos de helmintos, respectivamente, aplicados a los lodos provenientes del tratamiento biológico del agua residual de una fábrica de chocolates. **Materiales y métodos.** Se realizó una caracterización general del proceso y del lodo generado en la planta. Fueron determinados parámetros como pH, potencial redox (Eh), densidad promedio, velocidad de sedimentación, concentración de sulfuros y viabilidad de huevos de helmintos. La aplicación del tratamiento se efectuó simulando el proceso de deshidratación de los lodos ejecutado en la planta de agua residual; las diferentes cantidades de CaO y de H₂O₂ se suministraron según el diseño de experimentos realizado en statgraphics. **Resultados.** Antes de aplicar el tratamiento se encontró valores de pH ácido y potencial redox negativo, obtenidos tanto a lo largo del Imhoff como a diferentes profundidades. La velocidad de sedimentación hallada correspondió a un lodo disperso

1 Perteneciente al proyecto, Evaluación de alternativas para optimizar el tratamiento de aguas industriales en la Compañía Nacional de Chocolates.

2 Ingeniería biológica, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, jacqueline.betancur@udea.edu.co ORCID: 0000-0002-9268-5101

3 Universidad de Antioquia. Grupo Diagnóstico y Control de la Contaminación (GDCON). Sede de Investigación Universitaria (SIU). Medellín, Colombia, sanchez.mariasolange@gmail.com ORCID 0000-0001-5533-1390

4 Universidad de Antioquia. Grupo Diagnóstico y Control de la Contaminación (GDCON). Sede de Investigación Universitaria (SIU). Medellín, Colombia, catalina.rodriguez438@gmail.com ORCID 0000-0002-9310-6925

5 Universidad de Antioquia. Grupo Diagnóstico y Control de la Contaminación (GDCON). Sede de Investigación Universitaria (SIU). Medellín, Colombia gustavo.penuela@udea.edu.co ORCID 0000-0003-3065-0285

Después de la aplicación de cada tratamiento en el lodo, los resultados de pH fueron alcalinos; en varios puntos el potencial redox mostró valores positivos, y hubo presencia de huevos de helmintos viables antes y después del procedimiento. **Conclusión.** La

minimización de la concentración de sulfuros tuvo una eficiencia del 98.56 %, obteniéndose como resultado final un lodo no reactivo.

Palabras clave: lodo, helmintos, sulfuros, peróxido de hidrógeno, cal, pH

ABSTRACT

Introduction. Biological anaerobic wastewater treatment generates by-products such as sludge, a non-hazardous waste that requires treatment for its disposal. **Objective.** In this work, the effect of the application of hydrogen peroxide (H₂O₂) and alkaline stabilization with lime (CaO) on the reduction of sulfur and the viability of helminth eggs were respectively evaluated. The test was applied to the sludge from the biological anaerobic wastewater treatment plant of a chocolate factory. **Materials and methods.** A general description of the process and of the sludge generated in this particular wastewater treatment is given. Parameters such as pH, redox potential (Eh), average density, sedimentation rate, sulphide concentration and the viability of helminth eggs were determined. The treatment was performed

by simulating the sludge dehydration process that takes place in the plant. The different amounts of CaO and H₂O₂ were supplied in accordance with the experimental design performed in Statgraphics. **Results.** Before applying the treatment, acid pH and negative redox potential values were found, obtained both along the Imhoff and at different depths. The sedimentation rate found corresponded to a disperse sludge. After the application of each treatment in the sludge, pH results were alkaline, the redox potential showed positive values at several points, and there was presence of viable helminth eggs before and after the procedure. **Conclusion.** The reduction of sulfur concentration had an efficiency of 98.56 %, yielding a non-reactive mud as a final product.

Keywords: anaerobic digestion, helminths, hydrogen peroxide, sludge, sulfides

RESUMO

Introdução. O tratamento biológico das águas residuais gera subprodutos como os lodos que, por sua vez, requerem procedimentos para sua disposição como resíduos não perigosos. **Objetivo.** Neste trabalho se avalia o efeito da adição de peróxido de hidrogeno (H₂O₂) e estabilização alcalina com cal (CaO) na diminuição dos sulfuretos e a viabilidade de ovos de helmintos, respectivamente, aplicados aos lodos provenientes do tratamento biológico da água residual de uma fábrica de chocolates. **Materiais e métodos.** Se realizou uma caracterização geral do processo e do lodo gerado na planta. Foram determinados parâmetros como pH, potencial redox (Eh), densidade média, velocidade de sedimentação, concentração de sulfuretos e viabilidade de ovos de helmintos. A aplicação do tratamento se efetuou simulando o processo de desidratação dos lodos

executado na planta de água residual; as diferentes quantidades de CaO e de H₂O₂ se subministraram segundo o desenho de experimentos realizado em statgraphics. **Resultados.** Antes de aplicar o tratamento se encontrou valores de pH ácido e potencial redox negativo, obtidos tanto ao longo do Imhoff como a diferentes profundidades. A velocidade de sedimentação encontrada correspondeu a um lodo disperso. Depois da aplicação de cada tratamento no lodo, os resultados de pH foram alcalinos; em vários pontos o potencial redox mostrou valores positivos, e houve presença de ovos de helmintos viáveis antes e depois do procedimento. **Conclusão.** A minimização da concentração de sulfuretos teve uma eficiência de 98.56 %, obtendo-se como resultado final um lodo não reativo.

Palavras-chave: digestão anaeróbia, helmintos, peróxido de hidrogênio, lama, enxofre

INTRODUCCIÓN

El tratamiento biológico de las aguas residuales está siendo utilizado por las empresas del país como una opción que permite obtener resultados para dar cumplimiento al Decreto 3930 de 2010 de Colombia. Como resultado del tratamiento biológico se producen residuos denominados lodos. Los lodos generados en el nivel industrial son de alto volumen, y pueden poseer características que los definen en términos de desecho o residuo como reactivo, explosivo, inflamable, infeccioso, radioactivo y / o tóxico (Decreto 4741, 2005).

Según el Decreto 4741 de 2005 vigente para Colombia, la existencia de una alta concentración de sulfuros y la viabilidad de huevos de helmintos hacen clasificar al biosólido (lodo estabilizado) como un residuo o desecho reactivo e infeccioso, otorgándole la categoría de desecho peligroso. El anterior decreto no es específico para biosólidos, sino que hace referencia a todo tipo de residuos en general. En el país no se cuenta con una normativa específica para lodos y biosólidos; lo más reciente que se conoce es una propuesta de norma presentada en abril de 2009 por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible, cuyas delimitaciones las presentan Torres et al., (2009) en su trabajo. Las empresas del país que trabajan con tratamiento biológico de sus aguas residuales actúan bajo las normas EPA, establecidas para el tratamiento del lodo y la disposición del biosólido (EPA 40CFR-503, 2003).

El lodo reactivo puede relacionarse con la corrosión de las tuberías, los malos olores e, incluso, con la intoxicación del personal operativo (McFarland y Provin, 1999); el infeccioso representa un riesgo para

la salud humana y animal (Decreto 4741, 2005). Los lodos con estas características deben disponerse como lodos de tipo B, y deben usarse en recuperación de suelos, plantaciones forestales, cultivos que no sean de consumo humano y cobertura de rellenos sanitarios (Barros et al., 2005).

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de la adición de peróxido de hidrogeno (H₂O₂) y estabilización alcalina con cal (CaO) en la disminución de sulfuros y la viabilidad de huevos de helmintos. El procedimiento se realizó en los lodos provenientes del tratamiento biológico de agua residual de una fábrica de chocolate, con el fin de disponer el biosólido como residuo no peligroso.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

El muestreo para la obtención del lodo se realizó en el tanque Imhoff de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de una fábrica de chocolates, ubicada en el departamento de Antioquia (Colombia). La región presenta una temperatura promedio de 18 °C y una humedad relativa promedio de 79 %.

Mediciones *in situ*

Se realizó la determinación *in situ* de pH, conductividad eléctrica (CE), temperatura y potencial redox (Eh), en los puntos señalados en la figura 1. Estos parámetros fueron medidos con una sonda multiparamétrica (OTT-Hydrolab Quanta), la cual fue introducida en los cuatro compartimentos del tanque Imhoff.

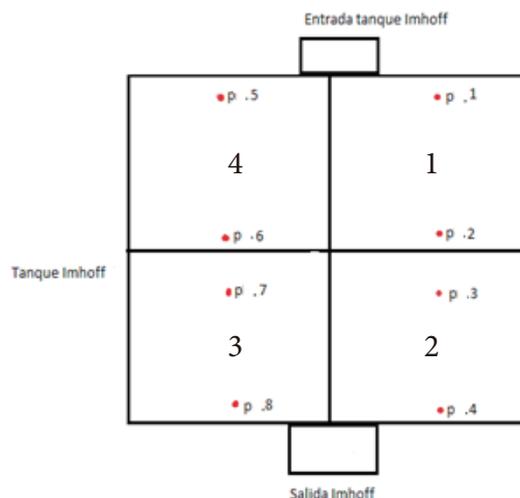


Figura 1. Puntos de muestreo en el tanque Imhoff con la sonda multiparamétrica

Fuente: elaboración propia

Caracterización del lodo proveniente del tanque Imhoff

Velocidad de sedimentación del lodo

Para la determinación de la velocidad de sedimentación del lodo, se siguió la metodología reportada por Nielsen et al. (2005). Se tomó una muestra de lodo de 20 mL y se diluyó con agua en una probeta hasta completar un volumen de 1000 mL. La probeta fue tapada y homogeneizada por inversión. Se registró la distancia que recorría una partícula de lodo en el tiempo hasta sedimentar totalmente.

Determinación de la densidad del biosólido

Una cierta cantidad de biosólido fue pesada para determinar su masa. En una probeta se adicionó un volumen conocido de agua y se depositó la cantidad de biosólido pesado. El volumen de agua desplazado por el cuerpo fue registrado, y el valor de la densidad fue obtenido mediante definición. El procedimiento se realizó cinco veces consecutivas, registrando y calculando el valor promedio de la densidad.

Determinación de la presencia (viabilidad / inviabilidad) o ausencia de huevos de helmintos

La determinación de la viabilidad de los huevos de helmintos se hizo mediante el procedimiento De Victorica y Galván (2002), referenciado en la norma SEMARNAP, NOM-001-ECOL-1996. La metodología incluyó los siguientes pasos:

- Se diluyeron 20 mL de lodo fresco (líquido) o 4 g de lodo (sólido) en 200 mL de agua destilada.
- Se agitó la solución manualmente hasta homogeneizar.
- Se centrifugó 50 mL de la muestra homogeneizada a 500 RPM durante 5 minutos.
- Se descartó el sobrenadante, y el sedimento colectado se lavó 3 veces con solución salina al 0.85 %, centrifugando a 500 RPM durante 5 minutos en cada lavado.
- Los huevos se recuperaron por flotación, centrifugando el sedimento obtenido del paso anterior con una solución de sulfato de zinc preparada previamente de tal forma que adquiriera una densidad de 1.2 g / mL, aproximadamente.
- Se extrajeron los huevos mediante una jeringa plástica.

- Se adicionaron 2 mL de fenolftaleína al 0.1 %.
- Se adicionó la muestra sobre un portaobjetos limpio y finalmente se realizó la observación al microscopio en un aumento de 10X y 40X.

Aplicación del tratamiento químico con H_2O_2 y CaO

La muestra de biosólido se obtuvo simulando el proceso de deshidratación que se realiza en la PTAR de la fábrica de chocolates. El proceso de tratamiento del lodo a escala piloto se llevó a cabo utilizando el equipo de test de jarras, con el fin de suministrar la velocidad de agitación requerida (60 RPM), correspondiente a la real en el tanque de adecuación de lodos de la PTAR.

En un vaso de precipitados de 1000 mL se dispuso una muestra de lodo líquido del tanque Imhoff, se suministraron 3.33 g de tierra filtrante y 2 mL de cloruro férrico (cantidad de reactivos a escala para simular las condiciones reales de la PTAR). La cantidad de cal y de peróxido de hidrógeno fue suministrada según el diseño de experimentos. Los reactivos se adicionaron al inicio de la mezcla, la cual tuvo lugar por espacio de 2 horas (simulando condiciones estándar de operación). Seguidamente, se registraron el valor del pH y el potencial redox. La simulación del filtro prensa se realizó con toallas absorbentes que fueron impregnadas previamente en una solución de tierra filtrante y agua. El lodo que estaba en el vaso de precipitados fue vertido sobre la toalla. El exceso de agua fue eliminado ejerciendo presión con las manos; las tortas de lodo o el biosólido obtenidos se transportaron hasta el laboratorio del grupo Diagnóstico y Control de la Contaminación (GDCON) en la Sede de Investigación Universitaria de la Universidad de Antioquia (SIU), laboratorio acreditado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) que pertenece al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia para realizar análisis ambientales. La determinación de sulfuros y presencia o ausencia de huevos de helmintos fue desarrollada en dicho lugar.

Determinación de sulfuros en lodo

Se realizó por destilación según el método EPA 9030 utilizando ácido sulfúrico a 70 °C como medio ácido.

Se empleó una muestra de 250 mL (lodo líquido) o 25 g (lodo seco) diluida en 250 mL de agua destilada.

El montaje fue realizado como se muestra en la figura 2. La muestra se calentó en un baño maría a una temperatura de 70 °C para el proceso de extracción. El destilado obtenido (sulfuro de hidrógeno H₂S) fue recogido en botellas de lavado de gases con acetato

de zinc mediante un flujo de nitrógeno, donde se precipita como sulfuro de zinc. Finalmente, la cuantificación de sulfuros fue llevada a cabo mediante valoración.

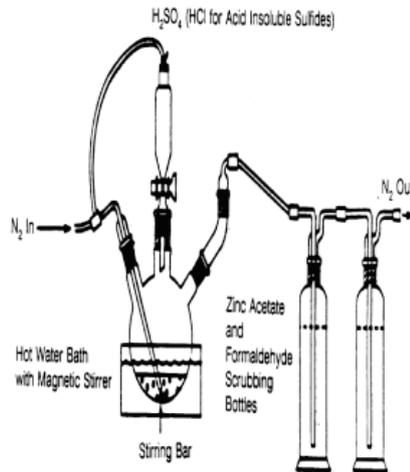


Figura 2. Montaje para la determinación de sulfuros en lodo. Izquierda, montaje sugerido por la EPA 9030. Derecha, montaje real para el desarrollo de la presente investigación.

Fuente: elaboración propia

Diseño de experimentos y análisis estadístico

Las variables experimentales estudiadas fueron la concentración de cal (CaO) (en gramos de cal por litro de lodo) y de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) en mililitros de peróxido por litro de lodo). Los niveles para cada una de las variables (factores) fueron: 8.5 g / L; 6.25 g / L, y 4.0 g / L para el CaO; y 2.26 mL / L; 1.395 mL / L, y 0.53 mL / L para el H₂O₂.

Los tratamientos resultaron de la combinación de los tres niveles de cada factor. Para cada tratamiento se establecieron al menos dos repeticiones. Para los niveles medios de cada factor, se establecieron seis repeticiones con el fin de obtener un rango de datos más amplio en los niveles de mayor posibilidad de éxito. En la tabla I se describen los tratamientos obtenidos mediante la combinación de los niveles establecidos para cada factor y el número de repeticiones..

Tabla I. Tratamientos obtenidos en el diseño experimental.

Tratamiento	Combinación		Número de repeticiones
	CaO (g/L)	H ₂ O ₂ (mL/L)	
1	4.00	0.53	2
2	4.00	1.40	2
3	4.00	2.26	2
4	6.25	0.53	2
5	6.25	1.40	6
6	6.25	2.26	2
7	8.50	0.53	2
8	8.50	1.40	2
9	8.50	2.26	2
10*	6.25	0.00	4

* Condiciones estándar de operación bajo condiciones de la PTAR, tratamiento control. Fuente: elaboración propia

La ecuación general del polinomio cuadrático utilizado fue (ecuación 1):

$$Z = \beta_1 + \beta_2 * X_1 + \beta_3 * X_2 + \beta_4 * X_1^2 + \beta_5 * X_1 * X_2 + \beta_6 * X_2^2 \quad \text{Ecuación 1}$$

Las variables de respuesta evaluadas fueron la concentración de sulfuros (mg / L) y el pH. Los datos experimentales se analizaron mediante el programa estadístico Statgraphics Centurión, versión 15.

RESULTADOS

Caracterización del proceso en el tanque Imhoff

Las figuras 3 y 4 muestran valores de pH ácido y potencial redox negativo, obtenidos tanto a lo largo del Imhoff como a diferentes profundidades. Los valores hallados y registrados en cada punto de muestreo presentan un comportamiento similar.

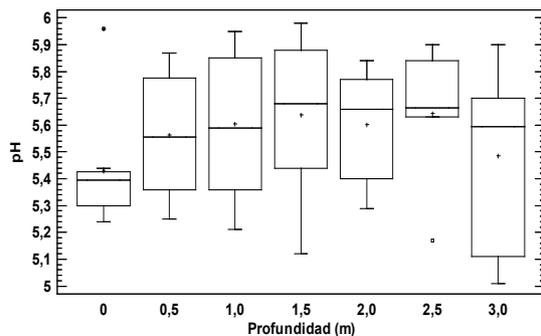


Figura 3. Variación del pH a diferentes profundidades en el tanque Imhoff.

Fuente: elaboración propia

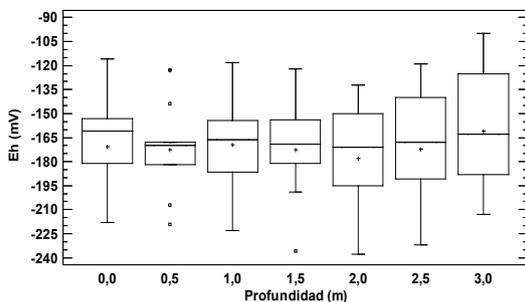


Figura 4. Variación del Eh a diferentes profundidades en el tanque Imhoff.

Fuente: elaboración propia

Caracterización del lodo proveniente del tanque Imhoff

La velocidad de sedimentación del lodo obtenida fue de 2.5 cm / h. Físicamente el lodo no posee la característica de formar una agregación de partículas (gránulos). Una réplica de muestra de lodo fue dejada en reposo, con el fin de saber en qué tiempo se obtenía la sedimentación total del lodo. En la figura 5 se observa la sedimentación tras transcurrir un tiempo de 20 horas. Es evidente que 20 horas de reposo no son tiempo suficiente para que todas las partículas de lodo sedimenten.



Figura 5. A. Solución de lodo homogenizado, B. Solución de lodo en reposo durante 20 horas.

Fuente: elaboración propia

En la tabla 2. Se muestran los resultados obtenidos para la densidad del lodo, la concentración de sulfuros y la presencia o ausencia de huevos de helmintos, presencia determinada mediante viabilidad o inviabilidad. Los resultados presentados en la tabla 2 corresponden a resultados previos al tratamiento aplicado.

Tabla 2. Características del lodo en cada compartimento del tanque Imhoff antes del tratamiento.

Número de compartimento	Densidad (kg/L)	Sulfuros (mg/kg)	Huevos de helmintos		
			Viables	Inviabiles	Ausencia
1	1.38	787.47	x		
2	1.27	734.98	x		
3	1.27	787.47	x		
4	1.33	776.97	x		
Valor Promedio	1.31	771.72	x		

Fuente: elaboración propia

Aplicación del tratamiento en el lodo

Después de la aplicación de cada tratamiento en el lodo, los resultados de pH fueron alcalinos ($\text{pH} > 9$) lo que condiciona que la reacción producida con el H_2O_2 sea la siguiente:



El peróxido de hidrógeno oxida el sulfuro a sulfato soluble, un ion inocuo para salud de la población humana.

En varios tratamientos realizados, el potencial redox mostró valores positivos, lo cual favorece las reacciones de oxidación y conlleva la considerable disminución en el valor de la concentración de sulfuros (figuras 6 A y 6 B).

La mayor parte del sulfuro fue oxidado por el peróxido de hidrógeno (figura 6 C); se observó que entre más positivo el valor del potencial redox más sulfuro fue eliminado.

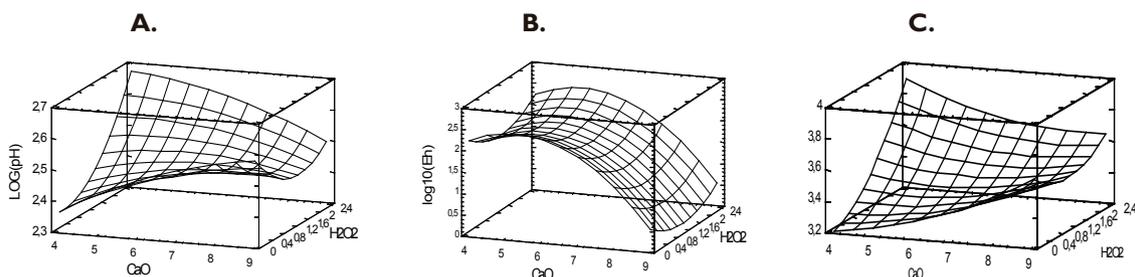


Figure 6. A. Comportamiento del pH con respecto a la concentración de CaO (g / L) y H_2O_2 (mL / L), B. Comportamiento del Eh con respecto a la concentración de CaO (g / L) y H_2O_2 (mL / L), C. Comportamiento de los sulfuros con respecto a la concentración de CaO (g / L) y H_2O_2 (mL / L).

Fuente: elaboración propia

En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos para los huevos de helmintos, tras aplicar los diferentes tratamientos.

Tabla 3. Resultados de huevos de helmintos para cada tratamiento aplicado

Tratamiento	Combinación		Repetición																		
	CaO	H ₂ O ₂	1			2			3			4			5			6			
	g/L	mL/L	v	Nv	au	v	nv	au	v	nv	au	v	nv	au	v	nv	au	v	nv	au	
1	4.00	0.53	x	X		x															
2	4.00	1.40		X		x	x														
3	4.00	2.26	x				x														
4	6.25	0.53			x			x													
5	6.25	1.40	x	X			x			x				x		x					x
6	6.25	2.26	x					x													
7	8.50	0.53	x				x														
8	8.50	1.40			x	x															
9	8.50	2.26			x			x													
10*	6.25	0.00	x			x			x			x									

* Condiciones estándar de operación bajo condiciones de la PTAR, tratamiento control. (v) Huevos de helmintos viables. (nv) Huevos de helmintos inviables. (au) Ausencia de huevos de helmintos.

Fuente: elaboración propia

Análisis estadístico

Mediante el análisis estadístico se pudo observar que la variable CaO y sus combinaciones en el análisis de varianza no presentaron diferencias significativas ($p > 0.05$), lo que indica que el CaO no afecta la producción de sulfuros; caso contrario ocurrió con la variable H₂O₂, la cual tuvo un nivel de significancia ($p < 0.05$) que indica que el H₂O₂ tuvo el mayor efecto sobre la presencia de sulfuros.

La función polinómica empleada para encontrar las combinaciones óptimas de CaO y H₂O₂, se presenta en la ecuación 2:

$$Z = 3.30909 - 0.0749065 X_1 + 0.308476 X_2 + 0.0123588 X_1^2 - 0.0570456 X_1 X_2 + 0.0879747 X_2^2$$

Siendo Z = Sulfuros, X₁ = CaO y X₂ = H₂O₂. Ecuación 2

La optimización de las variables se realizó minimizando la concentración de sulfuros; de acuerdo con esto es necesario aplicar un tratamiento de 4 g / L de CaO y 0.53 mL / L de H₂O₂.

DISCUSIÓN

Según los resultados observados antes de aplicar algún tipo de tratamiento, se estima que en el tanque Imhoff, las reacciones de óxido-reducción y el potencial redox negativo están proporcionando un ambiente que favorece las reacciones de reducción, situación favorable para que se genere la reducción de sulfatos a sulfuros (Fagundo *et al.*, 2005). Un potencial redox negativo cercano a -150 mV y pH ácido (5.4 - 5.7), como los obtenidos en los resultados de los cuatro compartimientos en el tanque Imhoff, son condiciones óptimas para que la reducción de sulfatos sea presentada y se produzca un alto contenido de H₂S (Zhang *et al.*, 2008).

En cuando a la breve caracterización del lodo en el tanque Imhoff, el valor obtenido de velocidad de sedimentación y la característica física de no formar gránulos definidos permiten clasificarlo lodo como lodo disperso (Nor *et al.*, 2012). Un lodo con estas características presenta poblaciones muy bajas de bacterias metanogénicas y, por el contrario, posee bacterias sulfatorreductoras como población dominante, lo que aporta al problema que posee la

PTAR con la alta concentración de sulfuros (Chojnacka et al., 2011). El Decreto 831 de 1993, aplicado para Colombia y aún vigente, fija como límite máximo de sulfuros un valor de 500 mg S²⁻/ Kg de residuo. Como se muestra en la tabla 2, el lodo analizado sobrepasa dicho valor; por tanto, se considera propenso a provocar daño a la salud humana, y se clasifica como peligroso, por poseer características de reactividad debido a una alta presencia de sulfuros, e infeccioso, por la presencia de huevos de helmintos viables (Decreto 4741, 2005). Un lodo con características de infeccioso tiene una concentración de huevos de helmintos >1 huevo / 4 g (EPA 40CFR-503, 2003). Para su disposición final debe tratarse como lodo de clase B, y solo podrá ser dispuesto en rellenos sanitarios o en suelos que no involucren un contacto cercano con el ser humano (que no haya contaminación de fuentes de agua por escorrentía, ni suelos que sean utilizados para siembras de consumo humano).

La estabilización alcalina del lodo se realizó con el objetivo de atacar dos problemas existentes; el primero relacionado con la formación de la especie H₂S, y el segundo involucrado con la viabilidad de huevos de helmintos. Según los resultados obtenidos (figura 6 A y tabla 3), para la inviabilidad total de huevos de helmintos no es suficiente la elevación del pH a valores superior a 12, lo que demuestra que estos microorganismos son altamente resistentes y necesitan de otras condiciones para su destrucción, que generalmente ocurre en menos de 72 horas a pH básicos a 52 °C (EPA, 2003), pero cuyo gasto energético resultaría muy costoso para la operación de una PTAR. Aunque algunas fuentes bibliográficas insisten en que los huevos de helmintos pueden ser inactivados a valores de pH superiores a 12 y temperatura ambiente (Farzadkia et al., 2007), esto no ocurrió en el presente tratamiento. Es importante tener cuidado con no obtener valores de pH mayores a 12.5 porque, según el Decreto 4741 de 2005 en Colombia, un residuo con un pH superior a este se clasifica como corrosivo, lo cual le otorga al biosólido la característica de residuo peligroso.

La aplicación de oxidación mediante peróxido de hidrógeno dio como resultados un incremento en los valores de pH, obteniéndose lodo alcalino que conduce a un equilibrio químico favorable para que el peróxido de hidrógeno oxide el sulfuro a sulfato soluble, cuya presencia no produce daño para la salud humana. Las reacciones de oxidación dentro del tanque Imhoff se ven favorecidas cuando los valores de potencial redox son positivos, lo que concuerda con los resultados tras aplicar el tratamiento con

peróxido de hidrógeno. Entre más positivo el valor de potencial redox mayor concentración de sulfuro es removida y mayor concentración de sulfato es formada, razón por lo cual el lodo deja de tener características de reactividad.

Para la remoción de sulfuros, la variable que fue estadísticamente significativa fue la concentración del peróxido de hidrógeno aplicada en el tratamiento, cuya relación fue directamente proporcional. A mayor concentración de peróxido utilizado en el tratamiento, mayor remoción de sulfuro es dada.

CONCLUSIONES

El tratamiento óptimo para la minimización de sulfuros con peróxido de hidrógeno y estabilización alcalina se obtuvo con una concentración de 0.53 Ml / L y 4.0 g / L de H₂O₂ y CaO, respectivamente, lo que dio como resultado una eficiencia en la disminución de la concentración de H₂S de 98.55 %, que permitió la obtención de lodos considerados no reactivos por presencia de sulfuro; sin embargo, la estabilización alcalina de los lodos no fue suficiente para la inactivación de huevos de helmintos; por tanto, este continúa aportando características de residuo infeccioso y lodo de clase B para su óptima disposición.

AGRADECIMIENTOS

Al grupo GDICON, a la empresa Nacional de Chocolate S. A., y al Fondo de Sostenibilidad 2013-2014 de la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Antioquia por la financiación del proyecto.

REFERENCIAS

- Barbusiński, K. & Filipek, K. (2003). Aerobic Sludge Digestion in the Presence of Hydrogen Peroxide and Fenton's Reagent. *Polish Journal of Environmental Studies*, 12(1), 35–40.
- Barros, K. K.; Florencio, L.; Takayuki, M. K. & Gavazza, S. (2005). Desaguamento e estabilização alcalina de lodo anaeróbico. 23.º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Brasil.
- Bentzen, G.; Smith, A. T.; Bennet, D.; Webster, N. J.; Reinholt, F.; Sletholt, E. & Hobson, J. (1995).

- Controlled dosing of nitrate for prevention of H₂S in a sewer network and the effects on the subsequent treatment process. *Water Sci. Technol.*, 31, 293–302.
- De Victorica, J. & Galvan, M. (2003). Preliminary testing of a rapid couple methodology for quantitation/viability determination of helminth eggs in raw and treated wastewater. *Water Research*, 37(6), 1278-87.
- Einarsen, A. M.; Rasmussen, A.; Bungum, S. & Sveberg, M. (2000). Biological prevention and removal of hydrogen sulphide in sludge at Lillehammer wastewater treatment plant. *Water Sci. Technol.*, 41(6), 175–187.
- Environmental Protection Agency. (1991). *Hydrogen sulphide corrosion in wastewater collection and treatment system. Report Number, EPA 430 / 09-91-010*. Washington: EPA.
- Environmental Protection Agency - EPA. (1992). *Detection, Control, and Correction of Hydrogen Sulfide Corrosion in Existing Wastewater System*. Washington, D.C.: Office of Wastewater Enforcement and Compliance.
- Environmental Protection Agency - EPA. (2003). *Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge under 40 CFR part 503. Office of Water/ Office Science and Technology Sludge / Risk Assessment Branch*. Washington: EPA.
- Fagundo, J. R.; Hernández, P. G.; Muñoz, M. S.; Rodríguez, C. M. (2005). Relaciones entre potenciales redox y concentraciones de sulfuros en aguas termales de Cuba. *Contribución a la educación y Protección Ambiental*, (6), pp. 31–44.
- Farzadkia, M.; Jaafarzadeh, N.; Loveimi, L. (2007). *Feasibility study of lime addition method for biosolids stabilization in West Ahwaz wastewater treatment plant*. Ahwaz, Iran: Department of Environmental Engineering, Islamic Azad University. P.G. Studies and Research Center.
- McFarland, M. L. & Provin, T. (1999). *Hydrogen Sulfide in Drinking Water - Causes and Treatment Alternatives. L-5312*. Texas: Agricultural Extension Service, College Station, Texas Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes; U.S. Environmental Protection Agency. Office of Research and Development. Environmental Monitoring and Support Laboratory. ORD EPA-9030.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2005). *Decreto 4741 del 30 de diciembre del 2005, por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral*. Bogotá, Colombia: El Ministerio.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2006). *Resolución 1402 de 2006, por la cual se desarrolla parcialmente el Decreto 4741 del 30 de diciembre de 2005, en materia de residuos o desechos peligrosos*. Bogotá, Colombia: El Ministerio.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2010). *Reglamentación parcial, usos del agua y residuos líquidos, Título I de la Ley 9.ª de 1979, Capítulo II del Título VI -Parte III - Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974, Decreto 3930 de octubre 25 del 2010*. Bogotá, Colombia: El Ministerio.
- Nielsen, A. H.; Lens, P.; Vollertsen, J. & Hvitved-Jacobsen, T. (2005). Sulfide-iron interactions in domestic wastewater from a gravity sewer. *Water Res.*, 39, 2747–2755.
- República Argentina (1993). *Decreto 831 / 1993. Residuos peligrosos - Generación, manipulación, transporte y tratamiento - Reglamentación de la Ley 24.051. Anexo V: Límites establecidos para los parámetros físicos de los barros*. Buenos Aires: República Argentina.
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca - SEMARNAP. (1996). Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a agua y bienes nacionales. Anexo I: Técnica para la determinación y cuantificación de huevos de helminto. *Diario Oficial*, lunes 6 de enero de 1997.
- Shriner R. L. (2001). *Identificación sistemática de compuestos orgánicos*. Limusa Noriega Editores. México D. F.

- Tomar, M. & Abdullah, T. H. (1994). Evaluation of chemicals to control the generation of malodorous hydrogen-sulfide in wastewater. *Water Res.*, 28, 2545–2552.
- Torres, P.; Madera, C. y Silva, C. (2009). Mejoramiento de la calidad microbiológica de biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas, *Revista EIA*, (11), 21–37.
- Van Der Zee, F. P.; Villaverde, S.; García, P. & Fdz-Polanco, F. (2007). Sulfide removal by moderate oxygenation of anaerobic sludge environments. *Bioresource technology*, 98(3), 518–24.
- Zhang, L.; De Schryver, P.; De Gussemé, B.; De Muynck, W.; Boon, N. & Verstraete, W. (2008). Chemical and biological technologies for hydrogen sulfide emission control in sewer systems: a review. *Water Research*, 42(1-2), 1–12.