

## Biofiltración del gas natural cubano en soporte orgánico con lodos activos

Yuletsis Díaz-Rodríguez email: [yuletsis@ceinpet.cupet.cu](mailto:yuletsis@ceinpet.cupet.cu)  
Centro de Investigaciones del Petróleo (CIP), La Habana, Cuba.

Raidel Casellas Ortega email: [rcasellaso@nauta.cu](mailto:rcasellaso@nauta.cu)

Susana Rodríguez Muñoz email: [susana@quimica.cujae.edu.cu](mailto:susana@quimica.cujae.edu.cu)

Elina Fernández Santana email: [elina@quimica.cujae.edu.cu](mailto:elina@quimica.cujae.edu.cu)  
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae). La Habana, Cuba.

Sergio Pascual Mustelier Pérez e-mail: [sergio@ceinpet.cupet.cu](mailto:sergio@ceinpet.cupet.cu)  
Depto. de Química Inorgánica y Biotecnología. CIP, La Habana, Cuba.

### RESUMEN

El uso del gas natural cubano se afecta por su elevada concentración de H<sub>2</sub>S. De ahí, la búsqueda de nuevas opciones de tratamiento como los procesos biológicos y el uso de materias primas naturales, renovables y biodegradables para tales fines. Con el objetivo de evaluar la fibra de kenaf como material de empaque, en biofiltro escurrido con lodos activos, para la desulfuración del gas natural; se realizó la caracterización físico-química de la fibra así como pruebas hidrodinámicas. La efectividad se evaluó mediante el crecimiento microbiano y la eficiencia de remoción mayor del 80 %, para diferentes concentraciones de este contaminante. Los resultados demostraron que la fibra posee propiedades satisfactorias, lo que permite disponer de un medio de empaque eficiente para biofiltros de escurrimiento en la desulfuración de gas natural cubano.

**Palabras clave:** biofiltración, desulfuración gaseosa, fibra de kenaf, gas natural.

## Biofiltration of Cuban natural gas in organic support with active mud

### ABSTRACT

The use of Cuban natural gas is affected by its high concentration of hydrogen sulfide. This leads to a search of new treatment options as biological processes and the use of natural, renewable and degradable resources to that end. In order to evaluate the kenaf fiber as a support material on a biotrickling filter with active mud, for the desulfurization of the natural gas, physico-chemical characterization of the fiber and hydrodynamic tests were performed. The effectiveness was evaluated by microbial growth and a removal efficiency greater than 80% for different concentrations of this contaminant. These results proved that the kenaf vegetal fiber possesses satisfactory properties thus making available an efficient material support in biotrickling filters for Cuban natural gas desulfuration.

**Keywords:** biofiltration, gaseous desulfuration, kenaf fiber, natural gas.

## INTRODUCCIÓN

Las tendencias globales del desarrollo sustentable promueven la aplicación de procesos de tratamiento biológicos, así como la necesidad de extender el uso de materias primas naturales, renovables y biodegradables en dichas aplicaciones. La biofiltración presenta como beneficio adicional sobre otras tecnologías de oxidación, carencia de contaminantes secundarios, costos de operación generalmente bajos, alta eficiencia de degradación, larga vida de la biomasa inmovilizada, provocando menor impacto ambiental negativo que los métodos químicos (Lapo y Byron 2014).

Los biofiltros empacados con fibras naturales, de características apropiadas para el desarrollo de poblaciones microbianas, se usaron durante muchas décadas, fundamentalmente en plantas de tratamiento de agua residual (Lapo y Byron 2014) y para la remoción de bajas concentraciones de compuestos olorosos. Otros materiales orgánicos que se emplean generalmente como soporte para estos fines son: compost, turba, astillas de madera y corteza de árboles. En ocasiones estos se mezclan con materiales biológicamente inertes, que mantienen una porosidad y humedad adecuadas donde tiene lugar el desarrollo microbiano.

En la literatura se reportan las especificaciones estándares para los medios filtrantes más empleados, como son: pH de lecho óptimo sobre 7, temperatura de 20 ° C, porosidad homogénea y retención del peso de agua, ambas entre 40 y 80 %, entre otras (Etcharren 2005). Además, se reporta que las matrices orgánicas presentan mayor adsorción que las brindadas por matrices sintéticas. Lo expuesto se atribuye a que los materiales orgánicos poseen mayores cantidades de grupos radicales: como amino, carboxilo, entre otros; así como de nutrientes, lo cual permite adherencia y crecimiento más eficaces.

La inmovilización eficaz de los microorganismos en el lecho, considera los espacios usados como soporte de inmovilización, siempre y cuando cumplan con ciertos parámetros tales como: superficie de adherencia amplia y de fáciles operación y regeneración. Además una adecuada porosidad permite los intercambios constantes de sustratos, productos y gases en el medio de biofiltración. Por otra parte, un bajo contenido de agua en el lecho filtrante reduce el espesor de la biopelícula y disminuye la actividad biológica y por consiguiente, la actividad del biofiltro como un elevado contenido de humedad contribuye a la creación de la saturación, provocando zonas anaerobias o incremento de la caída de presión (Etcharren 2005).

Las plantas de tratamientos de agua residuales son las fuentes más comunes de microorganismos, encontrándose dentro de estas los lodos activos. Los mismos reciben las descargas de la población urbana y de las industrias donde se generan algunos de los contaminantes a tratar. La aplicación de dichas mezclas complejas para la inoculación de biofiltros resulta más conveniente a escala real que el empleo de especies aisladas de microorganismos con potencialidades para degradar el compuesto de interés. Tales lodos presentan elevadas cargas de bacterias, entre ellas las sulfooxidantes, debido a su alto contenido en compuestos orgánicos; lo que constituye, por tanto, un medio de cultivo favorable para el desarrollo de los microorganismos, que completan los ciclos biogeoquímicos de elementos como: azufre, carbono, nitrógeno y fósforo.

En la actualidad se pretende extender dichas aplicaciones a procesos con mayores cargas contaminantes y desarrollarlos de modo eficiente. De ahí que se realicen acciones para que se apliquen nuevas alternativas con materiales de mayor disponibilidad como la fibra vegetal de kenaf, en la industria petrolera. Teniendo en cuenta lo anteriormente planteado el presente estudio tiene como objetivo fundamental evaluar como empaque la fibra mencionada en un sistema de biofiltración para la desulfuración del gas natural, empleando lodos activos como fuente microbiana.

## MÉTODOS

### **Caracterización de la fibra vegetal utilizada como material de empaque**

Se empleó como material de empaque fibra vegetal de kenaf, a la cual se le determinaron en estudios anteriores los siguientes parámetros físico-químicos: porcentaje de lignina, pentosanos y celulosa, humedad y pH (Vinent et al. 2011). Además se determinó la densidad aparente según el método descrito por Etcharren (2005).

La porosidad se definió utilizando un porosímetro UltraPore 300<sup>TM</sup> según el método de porosimetría con helio (He), el cual se basa en la ley de Boyle para determinar el volumen de grano a partir de la expansión de una masa conocida de helio. El procesamiento de los datos se realizó automáticamente mediante el software de control del equipo.

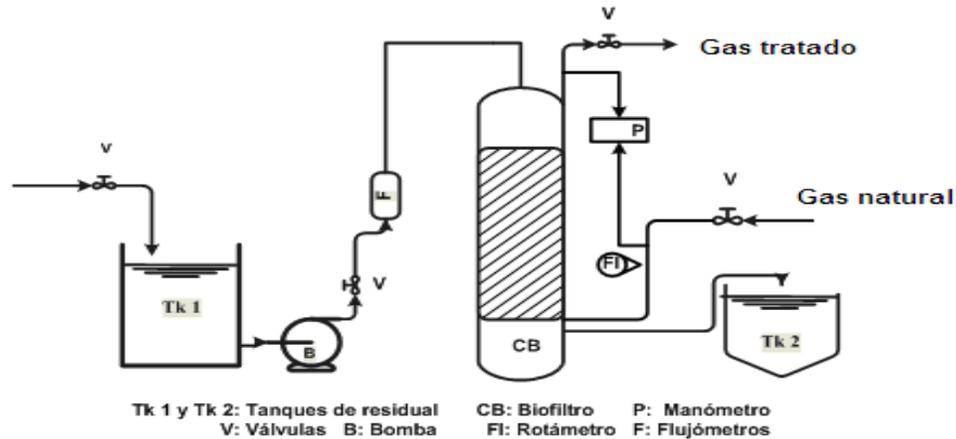
### **Descripción del sistema experimental**

El sistema de biofiltración utilizado en la evaluación del material de empaque se muestra en la figura 1. El mismo consiste en una columna de vidrio de 0,1 m de diámetro y 0,5 m de altura de relleno, siendo el material de empaque fibra vegetal de kenaf con un diámetro de partículas equivalente de 3,33 mm. La misma cuenta con un distribuidor de líquidos en el tope.

El flujo de gas natural a desulfurar se midió a partir de un rotámetro de capacidad entre 0,1 y 2,65 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>. A la salida del mismo se conectó un divisor de flujo de tipo Y que permite la obtención de dos corrientes, una dirigida al fondo de la columna y la otra hacia un manómetro. La alimentación del lodo residual al sistema se realizó con una bomba peristáltica Elpan tipo 372.C y se midió a partir de un flujómetro de capacidad desde 0,002 hasta 0,07 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>. El soporte del relleno está construido a partir de una malla de cobre con orificios de 0,0003 m de diámetro, que permite el paso de ambas fases (líquida y gaseosa).

El trabajo experimental se dividió en dos etapas, la primera (etapa 1) fue de adaptación de los microorganismos y la segunda (etapa 2) consistió en el tratamiento del gas natural. En la etapa 1 se utilizó gas natural con un contenido promedio de sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) de 0,17 g m<sup>-3</sup>, procedente de la alimentación de una planta de gas manufacturado, durante dos semanas.

La etapa 2 se mantuvo por un período de seis meses, en el cual se alimentó al sistema gas natural con concentraciones de H<sub>2</sub>S(g) entre 14,3 g m<sup>-3</sup> (1 % molar) y 28,6 g m<sup>-3</sup> (2 % molar), procedente de la línea colectora de los pozos ubicados en el litoral norte de las provincias la Habana y Mayabeque.



**Figura 1. Esquema del sistema de biofiltración para desulfuración de gas natural**

### Análisis hidrodinámico del biofiltro escurrido

El gas natural y el residual líquido se pasaron a contracorriente a través del biofiltro. Primero se determinó la caída de presión ( $-\Delta P$ ) del gas frente al relleno seco, posteriormente se fijó un valor de flujo de líquido ( $Q_L$  entre:  $0,001 - 0,017 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ) y luego se aumentó el flujo de gas ( $Q_G$  entre:  $0,20 - 2,47 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ) hasta que aparecieran cambios que indicaran que el equipo estaba inundado. A continuación se graficó el logaritmo del flujo másico del gas por unidad de área [ $G'(\text{kg h}^{-1}\text{m}^{-2})$ ] contra el logaritmo de la caída de presión entre la altura de relleno ( $Z_r$ ) [ $-\Delta P/Z_r$  ( $\text{Pa m}^{-1}$ )], este gráfico se utilizó para determinar los parámetros de carga e inundación del sistema y fijar los flujos de operación del líquido y el gas (Treybal 1986).

### Caracterización del gas natural

La caracterización del gas combustible se realizó mediante cromatografía gaseosa con dos equipos GOW-MAC Series 600. Se empleó un cromatógrafo gaseoso acoplado con detector de conductividad térmica empleando columna metálica empacada Haysep para determinar hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), aire, metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) y tamiz molecular 5A para altas concentraciones de  $\text{CH}_4$ , C1, C2, C3, C4+,  $\text{CO}_2$ , oxígeno ( $\text{O}_2$ ), nitrógeno ( $\text{N}_2$ ),  $\text{H}_2\text{S}$  y dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ). El segundo equipo contiene detector de ionización de llama empleando columna empacada Chemipack para determinar C1 a C10 y detector fotométrico de llama con columna de teflón empacada Chromosil para  $\text{H}_2\text{S}$  y otros compuestos azufrados. El procedimiento analítico se realizó acorde con la Norma ISO 6974-3 (2000) y el procesamiento de los datos se realizó automáticamente mediante el software para cromatografía Chrom Perfect Tigre IV<sup>TM</sup>. El gas tratado en el biofiltro se caracterizó tres veces al día durante las dos etapas experimentales desarrolladas.

### Análisis de la fuente microbiana

La fuente microbiana que se utilizó en los experimentos fueron los lodos activos de una planta de tratamiento de agua residual. Las muestras se colectaron de forma manual en frascos estériles con un volumen de 1 L. La determinación de sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), como producto de la degradación del  $\text{H}_2\text{S}$ , se realizó por el método turbidimétrico según la Norma APHA 4500-E (2005). Además

se caracterizó microbiológicamente la fuente microbiana empleada antes del tratamiento y el efluente líquido del proceso, realizando en cada caso el conteo de bacterias heterótrofas Mesófilas (ISO 8199 2005) y el conteo de hongos y levaduras (ISO 7954 1987). Lo expuesto corresponde a la evaluación del crecimiento microbiano en el sistema bajo las condiciones impuestas. La fibra de kenaf también se analizó de igual forma durante las dos etapas de trabajo. Los análisis se realizaron con frecuencia semanal durante el período de investigación.

## DISCUSIÓN

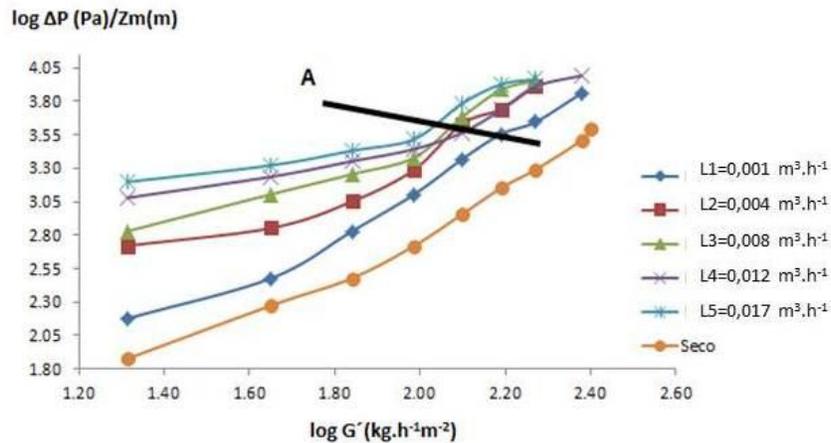
Las principales características del material de empaque empleado durante el proceso de desulfuración del gas natural cubano utilizado en el presente estudio se presentan en la tabla 1.

**Tabla 1. Caracterización de la fibra analizada**

Parámetro	Valor
Lignina (%)	18
Pentosa (%)	19
Celulosa (%)	50
Humedad (%)	16-48
pH	6,7
Densidad aparente ( $\text{kg m}^{-3}$ )	333
Porosidad (%)	89,22

Los resultados de la caracterización de la fibra de kenaf en la tabla anterior indican que este material asegura el desarrollo de una interfase líquido-sólido donde existe un vínculo con el medio externo para el desarrollo del intercambio de nutrientes y la eliminación de metabolitos de desecho, debido a que los valores obtenidos para los parámetros humedad, porosidad y pH se encuentran entre los reportados en la literatura para favorecer el mejor funcionamiento de este tipo de reactores de lecho fijo, radicando este hecho precisamente en que en el soporte poroso se adhieren tanto las bacterias sulfooxidantes, como la materia orgánica evitando la pérdida del lodo (Etcharren 2005).

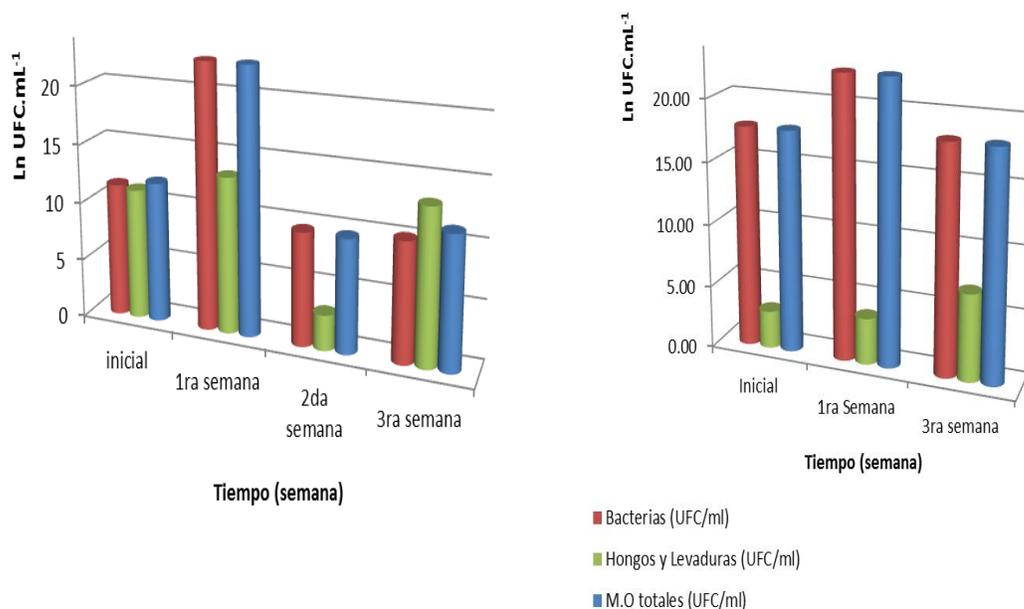
En las pruebas hidrodinámicas se obtuvieron resultados para intervalos de flujo de gas y líquido establecidos entre  $0,20 - 2,47 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  y  $0,001 - 0,017 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  respectivamente, como se muestra en la figura 2. La misma evidencia la similitud entre las curvas de relleno seco y flujo de líquido  $L_1$ . Tal fenómeno ratifica las propiedades hidrofóbicas que presenta la fibra vegetal y que se observan con la línea recta de las curvas. Por otra parte, en la región por debajo de la zona de carga (A) se encuentra una cantidad de líquido contenido en el lecho empacado que se mantiene razonablemente constante, respecto a los cambios en la velocidad del gas. Así mismo, por encima de la región A aparecen señales de recarga en el sistema. El cambio de las condiciones en dicha región es gradual y se determina por el cambio en la pendiente de las curvas, como resultado del incremento de la caída de presión más rápidamente (Treybal 1986). Se destaca que el fenómeno de inundación no ocurre en el sistema estudiado, aunque a flujos de operación de líquido mayores que  $0,017 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  aparece una pequeña capa de líquido donde burbujea el gas.



**Figura 2. Caída de presión del gas para el sistema gas natural-residual en el biofiltro evaluado**

Teniendo en cuenta los resultados de las pruebas hidrodinámicas, se escogió como flujo de gas a desulfurar  $0,95 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  mientras que de líquido fue de  $0,017 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ . Con tales flujos se alcanzaron valores de caída de presión por metro de relleno superiores a los  $2000 \text{ Pa m}^{-1}$  que no superan los  $1000 \text{ Pa}$  de caída de presión global del sistema, según se recomienda. En este sentido no debe exceder los  $1000 \text{ Pa m}^{-1}$  para evitar el deterioro y compactación del material de relleno y se debe reemplazar cuando la caída de presión global alcance los  $1,46 \text{ kPa}$  (Etcharren 2005). En este caso no ocurrió una compactación significativa del empaque lo que puede corresponder a las características del soporte vegetal, cuyas propiedades operacionales para aplicaciones como material de empaque en biofiltros, no se reportan en la literatura. Además, en torres empacadas al azar se recomienda operar a los mayores flujos de operación posible (Treybal 1986).

La representación gráfica del crecimiento microbiano en el lodo residual inicial y el efluente líquido del proceso se muestra en la figura 3. En la misma se evidencia que en la primera semana, que se corresponde a la etapa de adaptación, el crecimiento de los microorganismos totales aumentó de  $1,6 \cdot 10^5$  a  $6,8 \cdot 10^9 \text{ UFC mL}^{-1}$ . Estos resultados sugieren que los microorganismos se encontraban en un medio favorable para su crecimiento a expensas de la carga orgánica y del compuesto azufrado, que utilizaron como fuente de carbono y energía. Por su parte, en la segunda semana disminuyó el crecimiento microbiano en 5 niveles de Unidades Formadoras de Colonias (UFC), lo que se atribuye a que solo sobreviven los microorganismos adaptados a las condiciones impuestas. El conteo microbiano realizado a los microorganismos adheridos a la fibra no se realizó en la segunda semana debido a fallas técnicas pero presentó el mismo comportamiento, de ahí el incremento de este parámetro de  $5 \cdot 10^7$  a  $6 \cdot 10^9 \text{ UFC mL}^{-1}$ . Al finalizar el tratamiento se observó una leve disminución en la concentración de microorganismos, que puede atribuirse a la muerte de aquellos que no consiguen crecer a expensas del  $\text{H}_2\text{S}$ . Así mismo, se evidenció que el desarrollo de los microorganismos adaptados es mayor en el caso de las bacterias, las cuales presentan metabolismo más versátil y una plasticidad fisiológica que les permite colonizar y sobrevivir los hábitats con condiciones nutricionales menos favorables.



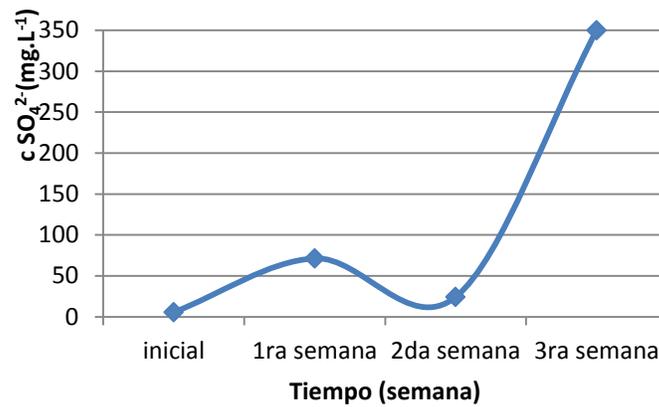
**Figura 3. Crecimiento microbiano expresado en logaritmo de las UFC.mL<sup>-1</sup> contra tiempo: (izq) En lodo activo y efluente líquido del proceso (der) En fibra de kenaf**

En la figura 4 se muestra el comportamiento de la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  en el medio líquido muestreado a la salida del biofiltro desulfurador, donde se observó correspondencia en los niveles de la concentración del mismo y el crecimiento microbiano antes de la segunda semana de experimentación.

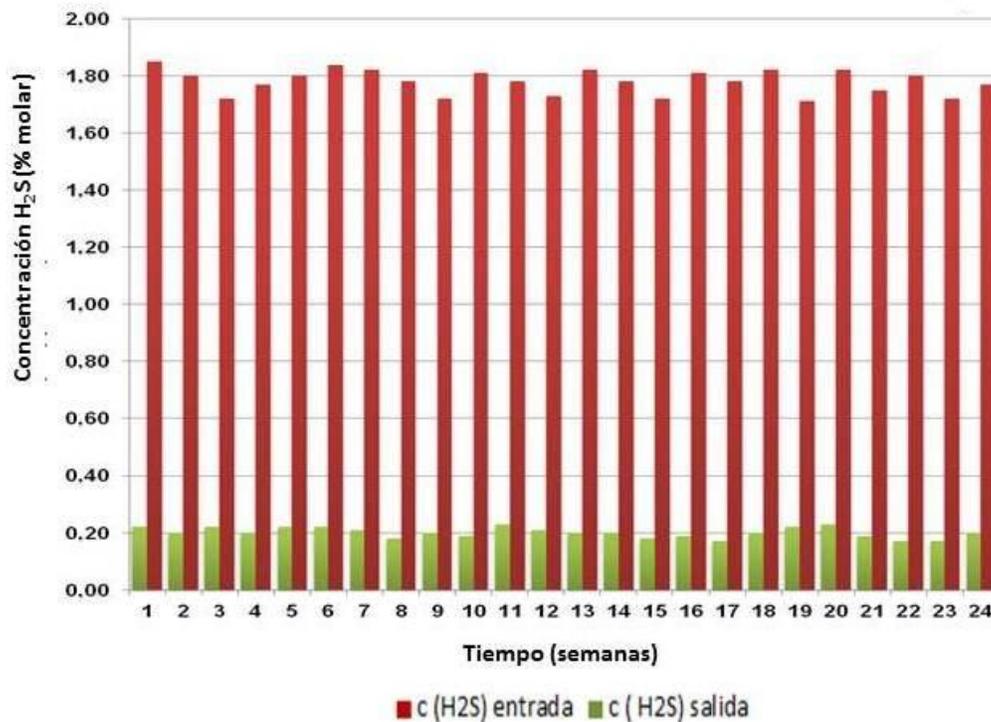
El comportamiento de la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  en el efluente residual mostró un aumento de su concentración desde  $5,63 \text{ mg L}^{-1}$  a  $349,92 \text{ mg L}^{-1}$ , lo que se corresponde con lo descrito en la literatura, como resultado del metabolismo de compuestos azufrados, según el ciclo del azufre.

Estos resultados indicaron que los microorganismos presentes durante el proceso de adaptación y hasta la segunda semana se alimentaron fundamentalmente de la carga orgánica presente en los lodos. A partir de ese tiempo se incrementó la concentración de este ión a causa de que los microorganismos que sobrevivieron a esas condiciones degradaron solo el  $\text{H}_2\text{S}$  como única fuente de sustrato, hasta obtener su forma más oxidada que son los  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Como resultado de la actividad biológica de los microorganismos sulfooxidantes, en la primera etapa de trabajo, la concentración de  $\text{H}_2\text{S}$  en el gas natural tratado disminuyó de  $0,17 \text{ g m}^{-3}$  hasta  $0,03 \text{ g m}^{-3}$ , lo que equivale a una eficiencia de remoción de 82 %, que se mantuvo constante durante las dos semanas correspondientes a la adaptación de los microorganismos. Los resultados obtenidos para la segunda etapa de trabajo se muestran en la figura 5 y en la figura 6.



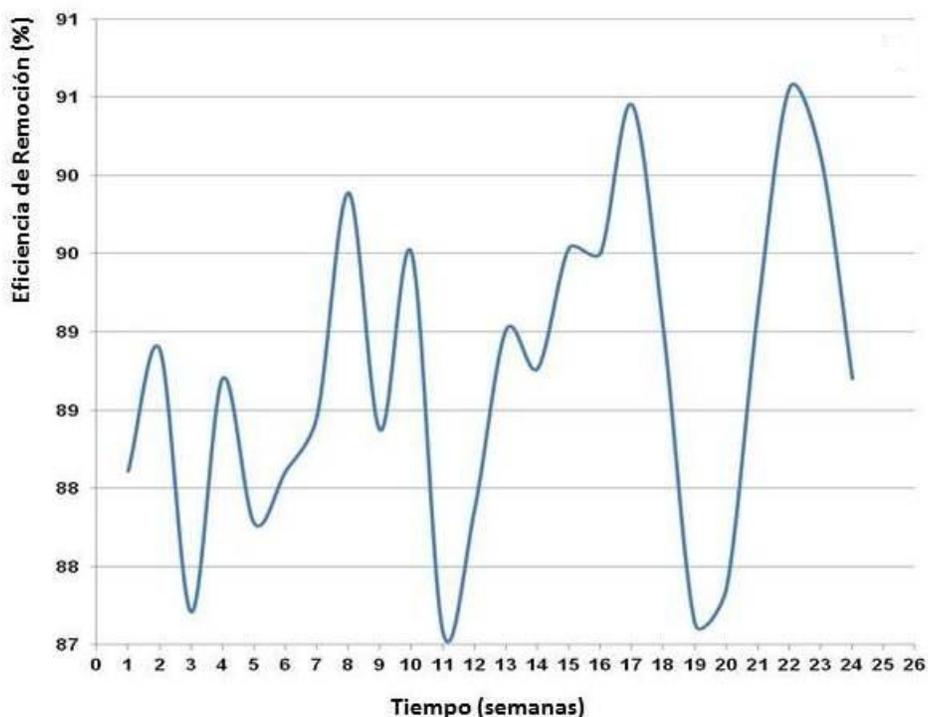
**Figura. 4. Concentración de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> en el medio como producto de la degradación de H<sub>2</sub>S en el gas natural tratado**



**Figura 5. Comportamiento de la concentración de H<sub>2</sub>S durante el tratamiento del gas natural: concentraciones H<sub>2</sub>S a la entrada y salida del biofiltro**

La figura 5 muestra que durante el tiempo de operación de seis meses, el contenido de H<sub>2</sub>S(g) en el gas natural a tratar varió entre 1,85 % molar (26,5 g m<sup>-3</sup>) y 1,71 % molar (24,5 g m<sup>-3</sup>), obteniéndose a la salida del reactor biotecnológico concentraciones de este contaminante entre

0,22 % molar y 0,17 % molar, o sea muy cercanos al límite permisible que se establece en las normas internacionales vigentes que es de 0,1 % molar (NOM 137 2013).



**Figura 6. Comportamiento de la concentración de H<sub>2</sub>S durante el tratamiento del gas natural: eficiencia de remoción de H<sub>2</sub>S**

Estos resultados se corresponden con las eficiencias de remoción reportadas en la figura 6, en la cual se observa que este parámetro alcanza valores superiores al 87 %, los cuales son similares a los reportados en la literatura para biofiltros de empaque orgánico pero con concentraciones de H<sub>2</sub>S(g) entre 0,07 y 0,26 g m<sup>-3</sup> (Morgan et al. 2002).

Estos resultados evidencian que las condiciones de operación empleadas, permiten que el sistema se comporte estable, tanto desde el punto de vista de eficiencia de remoción como del hidráulico, ya que durante el tiempo de operación no hay indicios de inundación en el equipo, aunque en el tanque de almacenamiento del efluente residual del biorreactor se observa presencia de materia orgánica, que pudiera atribuirse al desprendimiento de la biopelícula.

## CONCLUSIONES

De manera general, las partículas de fibra kenaf presentaron condiciones apropiadas de pH, porosidad y humedad para el crecimiento de los microorganismos degradadores de sulfuro de hidrógeno. Tales características permitieron el crecimiento microbiano adherido a la superficie de la fibra, con un aumento de 10<sup>2</sup> UFC mL<sup>-1</sup> en comparación con la concentración inicial. El

tratamiento se realizó con un flujo de gas natural a desulfurar de  $0,95 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  y de líquido  $0,017 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

Con ello se garantizó una caída de presión global del sistema de  $858,96 \text{ Pa m}^{-1}$ , la cual no provoca el deterioro y la compactación de la fibra de kenaf como material de relleno.

Como consecuencia, se alcanzó una eficiencia promedio de remoción de  $\text{H}_2\text{S}(\text{g})$  de 88,72 % para concentraciones iniciales de este contaminante en el gas natural tratado entre 1,85-1,71 % molar, durante seis meses de operación del sistema.

La utilización de materiales de desecho como esta fibra resultan alternativas económicas y amigables con el medio ambiente que merecen especial atención para futura aplicación, no obstante se debe continuar el estudio y optimización del proceso para lograr disminuir el contenido de  $\text{H}_2\text{S}(\text{g})$  a valores menores del 0,1 % molar y la aplicabilidad de la alternativa evaluada en la presente investigación a una mayor escala, teniendo en cuenta el aumento de las cantidades de gas natural disponibles actualmente en Cuba.

## REFERENCIAS

**APHA 4500-E** (2005). “Standard Methods for the examination of water and wastewater”. American Public Health Association (APHA), 21st ed. ISBN 13: 978-0875530475. Washington, DC. USA.

**Etcharren P. A.** (2005). “Diseño de un sistema de biofiltración para la eliminación de olores en la fábrica Lubascher y Krause”, Tesis de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería, Universidad Católica de Temuco. México.

**ISO 6974-3** (2000). “Natural gas -- Determination of composition with defined uncertainty by gas chromatography - Part 3: Determination of hydrogen, helium, oxygen, nitrogen, carbon dioxide and hydrocarbons up to C8 using two packed columns”. International Organization for Standardization (ISO). First Ed: 2000. Geneva. Switzerland.

**ISO 7954** (1987). “Microbiology general-guidance for enumeration of yeasts and moulds-colony count technique at  $25^\circ\text{C}$ ”. International Organization for Standardization (ISO). Geneva. Switzerland.

**ISO 8199** (2005). “Water quality – general guide to the enumeration of microorganisms by culture”. International Organization for Standardization (ISO). Geneva. Switzerland.

**Lapo C. y Byron G.** (2014). “Estudio de medios de soporte para crecimiento bacteriano aplicado al tratamiento biológico aerobio de aguas residuales”. Tesis de Máster en Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad Politécnica Nacional de Quito. Ecuador.

**Morgan J. M., Revah S. y Noyola A.** (2002). “Remoción de  $\text{H}_2\text{S}$  de corrientes gaseosas por biofiltración: efecto de la carga másica y del mezclado del medio biológico”, Congreso

Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales 13. Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, pp. 1-10, AIDIS. Memorias FEMISCA. Guanajuato, México D.F.

**NOM 137** (2013). “Contaminación atmosférica. plantas desulfuradoras de gas y condensados amargos. Control de emisiones de compuestos de azufre”. Norma Oficial Mexicana (NOM). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). México D.F.

**Treybal R.E.** (1986) “Operaciones de transferencia de masa”. 2<sup>a</sup> ed., ISBN 968-6046-34-8. McGraw-Hill, México D.F. México.

**Vinent E., Fajardo O., Batista R. A., Martínez A. L.; Sánchez A., Beltrán L. M., Diago E. y Núñez de Villavicencio K.** (2011) “Explotación sostenible del kenaf (*Hibiscus cannabinus*, L.). I. absorbentes naturales de hidrocarburos”. Temas de Ciencia y Tecnología. Revista de la Universidad Tecnológica de la Mixteca, vol. 15, no. 44, pp. 23 - 29. ISSN 2007-0977. Oaxaca, México.