

Biofiltración de Ácido Sulfhídrico (H₂S), Utilizando Bagazo de Caña de Azúcar y Piedra Pómez como Material de Soporte¹

¹ Este artículo es el resultado de un proyecto cofinanciado por Colciencias y las empresas Sucromiles y Levapan, ejecutado por un grupo de investigadores de la Corporación Biotec y ambas empresas.

Carlos H. Chávez*
Z. Alejandra Mora**
Jorge A. Cabra***
Yesid Carmona****
Sergio Revah*****
Gonzalo Gnecco*****

* Ingeniero Químico - Gerente de Producción, Investigación y Desarrollo, Pampa Ltda., Santiago de Cali, Colombia.
e-mail:carchaye@hotmail.com

** Bióloga - Investigadora Corporación Biotec, Santiago de Cali, Colombia
E-mail:usi2-biotec@cgiar.org

*** Ph.D. Ciencias Agronómicas - Microbiólogo - MG Consultores, Bogotá D.C., Colombia
E-mail:jorcabra@hotmail.com

**** Especialista en Gestión Ambiental, Ingeniero Químico, Santiago de Cali, Colombia.
E-mail:yecarmon@yahoo.es

***** Ph.D. Ingeniería de Procesos Industriales - Docente Universidad Autónoma Metropolitana, México.
E-mail:srevah@xanum.uam.mx

***** MSc. en Administración. Ingeniero Químico. Jefe de Coproductos. Sucromiles, Palmira, Colombia.
E-mail:ggnecco@sucromiles.com.co

RESUMEN

Experimentalmente se determinaron los valores de los parámetros de diseño y operación de un biofiltro para el control de las emisiones de ácido sulfhídrico (H₂S) en un efluente gaseoso, utilizando como materiales de soporte bagazo de caña y piedra pómez inoculados con un consorcio microbiano capaz de degradar H₂S. Se realizaron diferentes pruebas para determinar la capacidad máxima de eliminación de los soportes, así como el efecto de la concentración sobre la eficiencia de remoción. Por su efecto sobre el funcionamiento de los biofiltros también se estudió la variación de algunas propiedades de los soportes como el contenido de humedad, el

Fecha de recepción: Noviembre 25 de 2003
Fecha de aprobación: Abril 30 de 2004

pH y el contenido de sulfatos. La población de los diferentes grupos tróficos presentes en los soportes mostró una tendencia al crecimiento para las bacterias sulfooxidantes (BSO) y a la disminución para los heterótrofos, mohos y levaduras. Gracias a la inoculación y a la idoneidad de los soportes para el establecimiento y desarrollo del consorcio microbiano, los biofiltros presentaron un alto rendimiento desde el arranque. Continuamente se obtuvieron eficiencias de remoción mayores al 99%, siempre que las condiciones de operación fueron las adecuadas.

Palabras Clave: Biofiltro, ácido sulfhídrico, bagazo de caña, eficiencia de remoción.

ABSTRACT

Design and operation parameters of a biofilter for controlling emissions of hydrogen sulfide (H₂S) in a gaseous effluent were determined experimentally by using sugarcane bagasse and pumice stone as support materials, inoculated with a microbial assorted colony (a consortium) capable of degrading H₂S. Different tests were performed to determine maximum elimination capacity of these supports, as well as the effect of their concentration on removal efficiency. Because of the effect on the bio-filter operation, the variation of several properties of the supports, for example: moisture content, pH, and sulfate content was also studied. The monitoring of population variation of the different trophic groups, present in the supports, disclosed a trend toward growth of sulphur-oxidizing bacteria (SOB) and reduction in heterotrophic bacteria, molds, and yeasts. Biofilter yields were high from the start, due probably to the inoculation, and to the characteristics of the support materials that proved suitable to establish and develop a microbial consortium. Removal efficiencies over 99% were continuously obtained whenever operational conditions were appropriate.

Key Words: Biofilter, hydrogen sulphide, sugarcane bagasse, removal efficiency.

1. INTRODUCCIÓN

El ácido sulfhídrico es un contaminante gaseoso altamente oloroso, tóxico e inflamable. Cantidades considerables de H₂S se producen en procesos industriales como el tratamiento de aguas residuales, procesamiento de alimentos, refinamiento de petróleo, manufactura de pulpa para papel y en el pretratamiento de gases combustibles. El control de las emisiones de H₂S es esencial para proteger la salud humana así como para mitigar su impacto ambiental [1,2]. Los procesos utilizados para remover H₂S de corrientes gaseosas residuales envuelven ya sea un tratamiento físico o una oxidación química. Algunos métodos requieren la adición de químicos mientras que otros requieren un alto consumo de energía. Además, estos métodos tradicionales son menos efectivos y más costosos [3].

La biofiltración es un proceso que utiliza microorganismos inmovilizados en una biopelícula sobre las partículas de un material de soporte poroso. A medida que el gas pasa a través del soporte el contaminante se transfiere desde la fase gaseosa a la biopelícula y es metabolizado. En los últimos años la biofiltración se ha desarrollado efectivamente para el control de olores, incluyendo emisiones de H₂S en corrientes de gases residuales diluidas [4,5,6,7]. A pesar de que la biofiltración ha demostrado ser una tecnología eficiente, práctica y simple para el tratamiento de efluentes gaseosos, los parámetros de diseño y operación, como también los procesos microbiológicos que envuelve no están muy bien definidos. Son pocos los investigadores que han reportado detalles relacionados con el control de las emisiones de H₂S utilizando la biofiltración. Por esta razón muchos biofiltros se diseñan y operan empíricamente. Como resultado de esto el comportamiento de los sistemas de biofiltración no es predecible y las condiciones de operación pueden no ser las mejores para obtener la eficiencia deseada en el control del olor [3,8,9]. En este contexto, esta investigación se desarrolló

con el objetivo de estudiar la biofiltración de ácido sulfhídrico, evaluando la viabilidad técnica del bagazo de caña y piedra pómez como materiales de soporte, determinando además los parámetros de diseño y operación, así como las posibles interrelaciones existentes entre ellos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Planta Piloto

El trabajo experimental se realizó utilizando un sistema de biofiltración a escala de planta piloto, Figura 1, constituido por dos biofiltros cilíndricos con fondo cónico, (0.5 m de diámetro, 2.5m de alto), construidos en acrílico, cada uno empacado con un lecho de material de soporte de 1 m de altura soportado en una rejilla de acrílico. En los costados y a lo largo del lecho los biofiltros contaban con puntos para el muestreo del soporte y para medir la caída de presión y la variación de la concentración de H_2S a través del lecho. Adicionalmente en la parte superior de los biofiltros se instaló un sistema de riego para el control de la humedad del lecho y la reposición de nutrientes.

Mediante un compresor y a través de una línea de tubería se condujo aire atmosférico hasta una cámara empacada con anillos plásticos (1/2" de diámetro), donde se humidificaba por burbujeo en agua. Durante la operación se obtuvieron rutinaria y continuamente humedades relativas entre el 95.0 y el 100.0 %. El H_2S gaseoso se produjo y mezcló continuamente con el aire prehumidificado en la línea de entrada (tubería de PVC) a los biofiltros. El caudal de aire se midió en un rotámetro y se ajustó con una válvula de aguja (acero inoxidable 316), mientras que el H_2S se dosificaba con una bomba peristáltica (Masterflex I/P73), misma que se utilizaba para controlar su caudal.

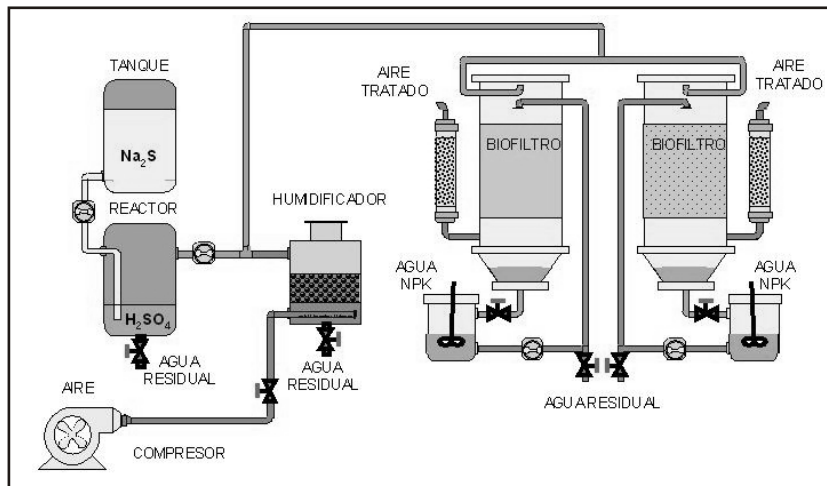


Figura 1. Diagrama Planta Piloto de Biofiltración

Soportes

En la Tabla 1 se presenta un resumen de las propiedades de los materiales de soporte utilizados. El bagazo de caña es un material orgánico, poroso, que como características básicas presenta: una buena capacidad de retención de agua, un pH neutro, un bajo costo y además una capacidad de adsorción de H_2S [10]. Para mejorar las propiedades mecánicas del bagazo de caña se optó por utilizar como segundo soporte una mezcla entre este material y la piedra pómez en proporción 4 a 1 (v/v)[3]. La piedra pómez es un material inerte de origen volcánico, de alta porosidad y excelentes propiedades hidrofílicas, lo que hace altamente recomendable su uso como soporte desde el punto de vista estructural.

Tabla 1. Propiedades de los Soportes

Propiedad	Bagazo	Mezcla
pH	7.3	7.0
Densidad aparente (kg/m^3)	65.0	85.0
Densidad real (kg/m^3)	136.8	262.4
Porosidad (% v/v)	30	45
Contenido de agua (% m/m)	70	65
Materia orgánica	64.3	59.3
Azufre total (mg S/g)	-	-
Fósforo soluble (% m/m)	-	-
Carbono total (% m/m)	30.5	31.3
Nitrógeno total (% m/m)	4.27	1.75
Relación C/N	7.14	17.86
Tam. prom. de las partículas (mm)	28.0	35.0

Inóculos

Los soportes fueron inoculados con una mezcla, en partes iguales, de tres lodos aeróbicos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales de empresas productoras de: alimentos procesados (L1), bebidas gaseosas (L2) y una destilería (L3). Antes de ser mezclados los lodos fueron sometidos a un proceso de adaptación y selección de las especies microbianas capaces de utilizar azufre como fuente de energía, mediante la adición diaria de medios nutritivos cuya composición se muestra en la Tabla 2. A la mezcla obtenida (L4) se le continuó adicionando el medio 2 y ésta se utilizó para inocular los biofiltros.

Tabla 2. Composición de los medios nutritivos utilizados en la adaptación de los lodos

Lodo Activo	Compuesto	Composición (g/L)
L1 y L2 (Medio 1)	Triple 15 (N, P, K)	2.0
	Carbonato de calcio	1.0
	Tiosulfato de Sodio	1.0 - 5.0
L3 (Medio 2)	Úrea	1.0 - 2.0
	Fosfato de amonio	1.0 - 1.5
	Hidróxido de potasio	0.5
	Carbonato de sodio	1.0
	Tiosulfato de sodio	0.5 - 5.0

Métodos de análisis

La concentración de H_2S en gas fue medida directamente con un monitor portátil para gases Industry Scientific TML-310, (+/- 1 ppmv). El contenido de azufre se determinó por el método colorimétrico de Bartlett y Skoog [11]. El contenido de sulfatos se determinó por el método turbidimétrico, de Thomas y Cotton [11,12]. El pH se midió con un potenciómetro Schott, Methron 691. La humedad relativa del gas se determinó por carta psicrométrica, midiendo temperaturas de bulbo seco y húmedo. En los análisis colorimétricos se utilizó un espectrofotómetro SPECTRONIC GENESIS 5.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan en orden cronológico analizan los resultados obtenidos en

las diferentes corridas experimentales realizadas en la planta piloto de biofiltración, tomando como referencia resultados obtenidos en investigaciones similares.

Efecto de la carga másica sobre la eficiencia de remoción de H_2S

La carga másica de H_2S se define como la cantidad de H_2S que se introduce al sistema por unidad de tiempo por unidad de volumen del material de soporte ($g H_2S/m^3-h$). La capacidad máxima de eliminación de un material de soporte específico corresponde a la máxima cantidad de contaminante que puede degradarse a $1 m^3$ de soporte por hora, sin que se inhiba la actividad de los microorganismos presentes en él y se expresa en las mismas unidades de la carga [3,7,13]. Estos dos parámetros juegan un papel central en el diseño y operación de un sistema de biofiltración. La capacidad máxima de eliminación del bagazo de caña y de la mezcla bagazo - piedra pómez se determinaron a las condiciones óptimas de operación del sistema. Las concentraciones de H_2S se variaron entre 100 y 1800 ppmv con una caudal constante de aire de 141.6 L/min. (5.0 pie³/min). El lecho de los biofiltros se lavó periódicamente con agua para eliminar la acumulación de H_2SO_4 . Como se muestra en la Figura 2, las capacidades de eliminación ($g H_2S/m^3-h$) se graficaron contra la carga ($g H_2S/m^3-h$), y la capacidad máxima de eliminación del material de soporte se determinó cuando la curva alcanzó su valor máximo [3,13]. La capacidad de máxima de eliminación del bagazo se determinó en $100 g H_2S/m^3-h$ aproximadamente y la de la mezcla bagazo piedra pómez en $80 g H_2S/m^3-h$. Esta diferencia deja en evidencia la dependencia entre la capacidad máxima de eliminación, el material de soporte y las condiciones de operación de un Biofiltro. El hecho que el bagazo de caña haya presentado un valor mayor pudo ser que al presentar partículas de menor tamaño, éste ofrecía una mayor área superficial para la inmovilización de los microorganismos y la transferencia de masa del contaminante. Otro aspecto que pudo haber

influenciado este resultado fue la presencia de un material inorgánico en la mezcla, lo cual pudo afectar el suministro de nutrientes a los microorganismos. Finalmente, y debido a la selectividad que hacia el sulfato presenta la biodegradación del ácido sulfhídrico, durante operación continua a cargas de más de 50 g H_2S/m^3-h , la piedra pómez presente en la mezcla se deshace por la corrosión generada debido a la acumulación de ácido sulfúrico, lo que trae como resultado el deterioro del medio.

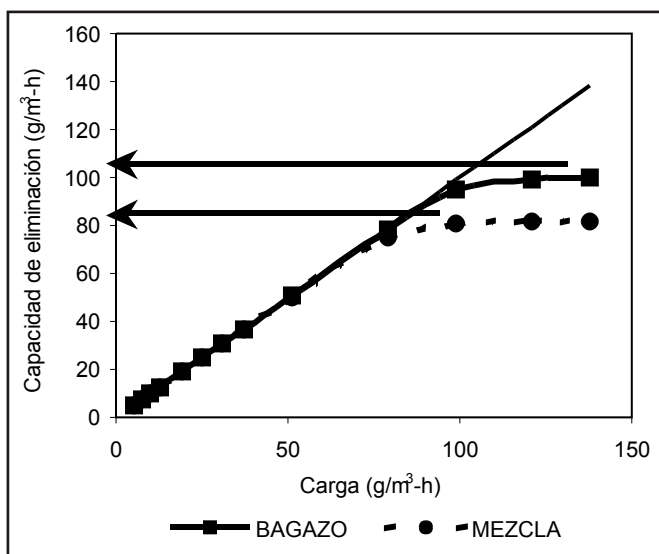


Figura 2. Determinación de la capacidad máxima de eliminación de los soportes

Efecto de la concentración sobre la eficiencia de remoción de H_2S

El efecto de la variación de la concentración de H_2S en el gas alimentado a los biofiltros sobre la eficiencia de remoción, se estudió en el rango comprendido entre las 100 y 1800 ppmv. Se observaron eficiencias de remoción mayores al 99% para todas las concentraciones probadas en el rango seleccionado. Las eficiencias no cambian siempre que la carga másica de H_2S no sobrepase el valor máximo aceptable (capacidad máxima de eliminación) para el material de soporte estudiado [3,5,7].

Efecto del contenido de humedad del material

de soporte sobre la eficiencia de remoción de H_2S

Dada la naturaleza de los biofiltros, el contenido de humedad del soporte es el parámetro de operación sobre el cual debe ejercerse un mayor control. Se analizó el efecto que se presentó sobre la eficiencia de remoción ante los cambios en el contenido de humedad de los soportes, parámetro que durante la operación continua de los biofiltros varió entre el 10 y el 70 % (p/p). Las eficiencias de remoción de H_2S mostraron consistentemente valores altos (>99%), y se observó una pequeña variación cuando el contenido de humedad de los materiales de soporte varió entre 40 y 70 % (Figura 3). Sin embargo, cuando el contenido de humedad se redujo por debajo del 40 %, la eficiencia de remoción del H_2S se redujo proporcionalmente. Cuando el contenido de humedad llegó al 10% se observó una remoción muy baja. La eficiencia de remoción obtenida cuando el material de soporte se secó probablemente se debió a la oxidación química y a la adsorción del H_2S en el material de soporte, antes que a la acción microbiana.

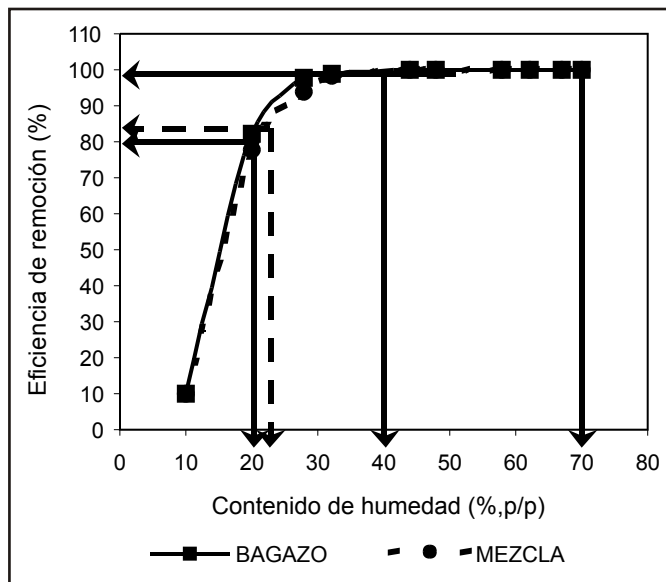


Figura 3. Efecto del contenido de humedad del material de soporte sobre la eficiencia de remoción

Cuando el contenido de humedad se redujo a 20% para el bagazo y al 22% para la mezcla

bagazo piedra - pómez la eficiencia de remoción se redujo del 99 al 82% para el bagazo y al 85% para la mezcla. Después de suministrar agua a ambos soportes para retornar el contenido de humedad al 50 % las eficiencias de remoción de ambos materiales eventualmente llegó al 99.9%, dando constancia de las propiedades hidrofílicas de los soportes.

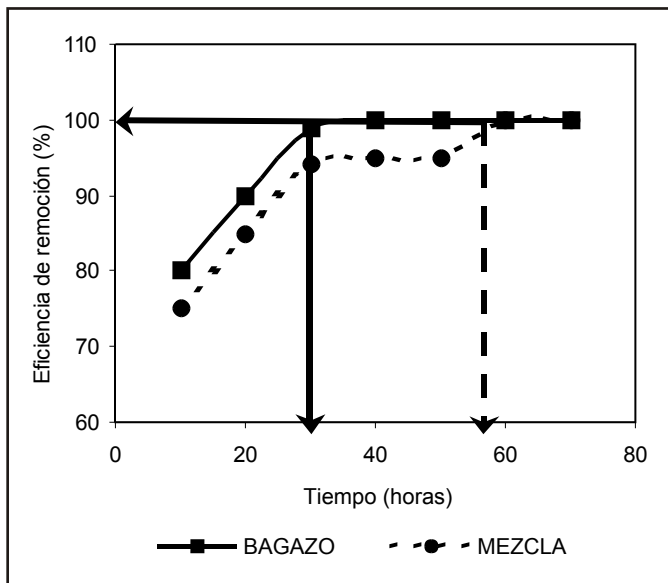


Figura 4. Tiempo requerido para que el material de soporte seco recupere su eficiencia óptima.

Como se muestra en la Figura 4, si bien la recuperación de la actividad después de rehumedecer los soportes sigue un comportamiento similar para ambos materiales, el bagazo de caña recupera completamente su eficiencia de remoción óptima (>99.9%) en 32 horas, mientras que la mezcla bagazo - piedra pómez lo hace en 60 horas. Este comportamiento pudo deberse a las diferencias estructurales entre los materiales utilizados, mostrando el bagazo una ventaja sobre la mezcla.

Efecto del tiempo de residencia sobre la eficiencia de remoción de H₂S

El efecto del tiempo de residencia sobre la eliminación del H₂S se estudió variando el caudal de gas que fluía a través de los biofiltros. La investigación se realizó a cargas de H₂S entre 5 y

50 g/m³-h para garantizar que durante los experimentos no se sobrepasará la capacidad máxima de eliminación de H₂S. Como se muestra en la Figura 5, no hay un efecto aparente sobre la eficiencia de remoción cuando se operan los biofiltros con tiempos de residencia del gas mayores a 35 segundos. Cuando se redujo el tiempo de residencia a 20 segundos la eficiencia de remoción disminuyó en un 4 %.

En la literatura se reporta que el ácido sulfhídrico puede metabolizarse por un cultivo puro de *T. denitrificans* en 1 o 2 segundos [2,5,14]. Esta observación sugiere que la reducción en la eficiencia de remoción, a tiempos de residencia cortos, pudo deberse a que estos no eran suficientes para que se llevara a cabo por completo el proceso de transferencia del contaminante desde el aire hacia la biopelícula, haciendo que éste saliera del biofiltro sin tratamiento, lo cual no necesariamente implica que la biodegradación no tuviera lugar.

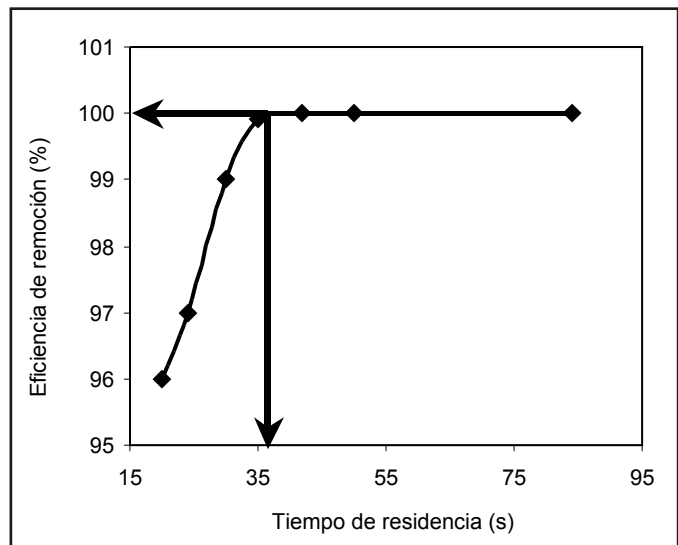


Figura 5. Efecto del tiempo de residencia sobre eficiencia de remoción.

Efecto de la acidez del material de soporte sobre la eficiencia de remoción de H₂S

La eficiencia de remoción de H₂S fue altamente dependiente del pH cuando su valor fue inferior a

3.0, pero fue prácticamente independiente a valores mayores (Figura 6). La remoción de H_2S máxima se obtuvo cuando el pH de ambos soportes fue mayor de 3.0 (99.9%). Sin embargo, y dependiendo de las especies presentes, las bacterias capaces de oxidar el azufre pueden vivir en ambientes que tengan un rango de pH amplio (1 a 8) [2,3,7,14]. También hay que tener en cuenta que a valores de pH altos se presentan con mayor énfasis una serie de fenómenos físico - químicos que hacen que se incremente la eficiencia de remoción del H_2S , tales como la oxidación química, la absorción y adsorción en la biopelícula y el soporte[3].

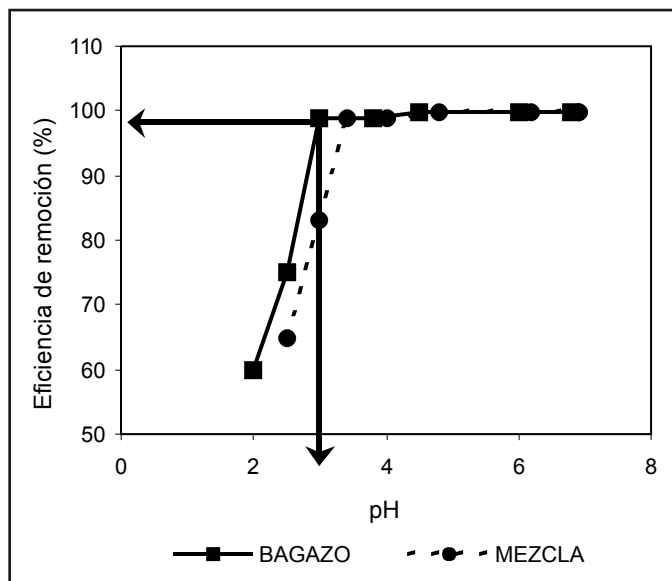


Figura 6. Efecto del pH sobre la eficiencia de remoción

Efecto del contenido de sulfatos en el material de soporte sobre la eficiencia de remoción de H_2S

El efecto del contenido de sulfatos sobre las eficiencias de remoción se determinó permitiendo la acumulación en el material de soporte del sulfato producido en la oxidación biológica del H_2S . El sistema operó a una carga másica de H_2S de $21 \text{ g/m}^3\text{-h}$ (Figura 7).

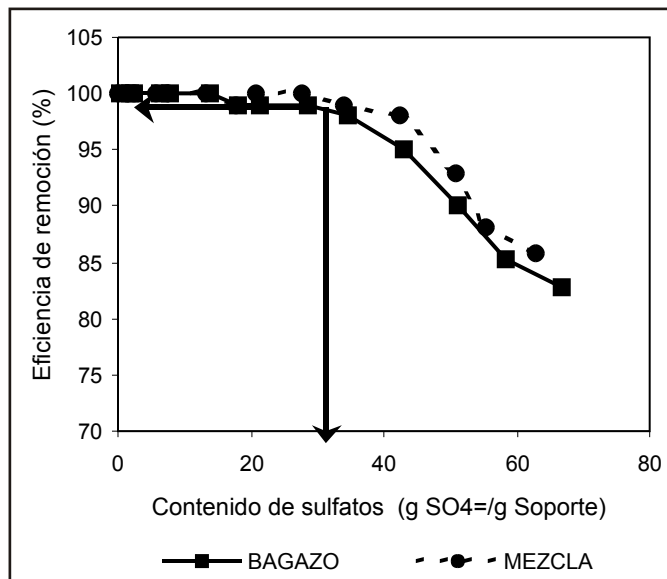


Figura 7. Efecto del contenido de sulfatos sobre la eficiencia de remoción

No se observó ningún efecto cuando el contenido de sulfato de los materiales de soporte fue menor de $30 \text{ mg SO}_4^-/\text{g}$ de soporte seco. Sin embargo, se observó un efecto inhibitorio significativo cuando se tuvieron contenidos de sulfatos mayores a este valor. Este resultado sugiere que cuando el contenido de sulfatos llegó a $30 \text{ g SO}_4^-/\text{g}$ se alcanzó un nivel crítico para el ambiente microbiológico [3,18]. Por encima de este nivel, probablemente los sulfatos presentaron un nivel tóxico y la actividad de los microorganismos se redujo considerablemente. Esta observación es muy importante para el control de las emisiones de H_2S mediante la biofiltración; ya que el sulfato es el producto final del proceso de tratamiento del H_2S por biofiltración, puede acumularse en el material de soporte sino se toma otra acción. La acumulación de sulfatos puede alcanzar fácilmente un nivel que puede reducir la función biológica del biofiltro, especialmente a cargas de H_2S altas. Afortunadamente esta situación puede revertirse lavando periódicamente el lecho con agua, a la vez que se remueven las partículas finas acumuladas en el lecho, lo que permite prolongar la vida útil del soporte.

Evolución Microbiana

En la Figura 8 se muestra la tendencia lineal de crecimiento poblacional que presentaron, durante las primeras 24 semanas de operación de los biofiltros, los diferentes grupos tróficos presentes en los biofiltros piloto. En términos generales se observó una tendencia a la disminución de los heterótrofos [2], mohos y levaduras en ambos soportes, y de las B50 acidófilas (B50A) y neutrófilas (B50N) en el

bagazo, comportamiento que pudo deberse a la acidificación y/o acumulación de sulfatos y/o a la carencia de nutrientes. El hecho que en la mezcla de bagazo y piedra pómez las B50A y B50N hayan presentado una tendencia al crecimiento, refleja que este material presenta ventajas para el establecimiento de la población gracias a su mayor porosidad, capacidad de adsorción y capacidad reguladora de pH [10].

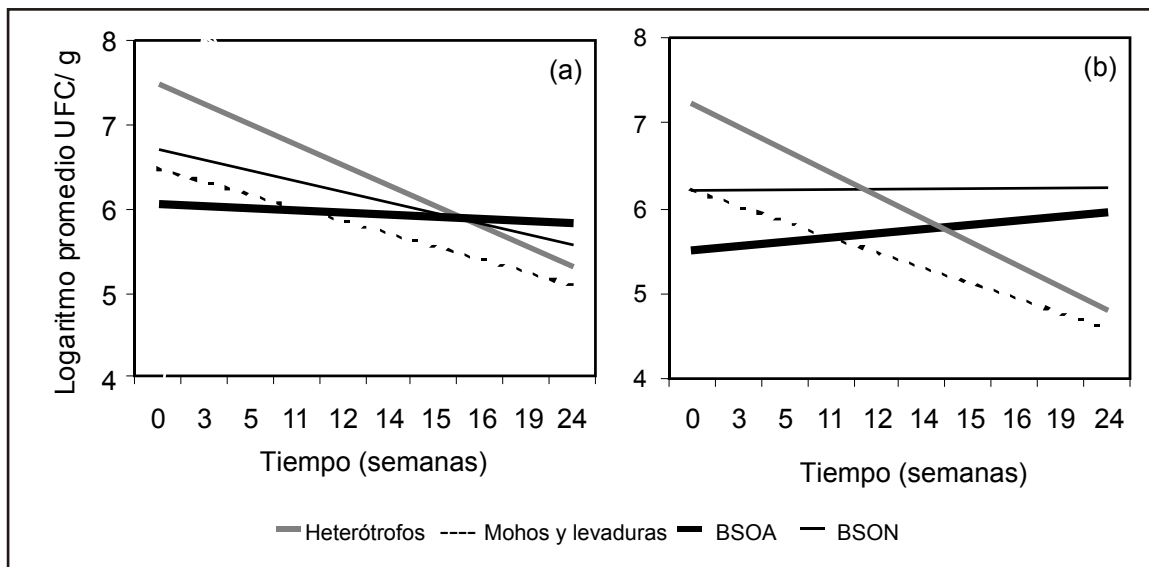


Figura 8. Logaritmo de recuentos microbiológicos promedio en biofiltro con soporte de bagazo (a) y mezcla (b) a través del tiempo

Eficiencias de remoción para los diferentes materiales de soporte

El bagazo y la mezcla bagazo - piedra pómez se estudiaron individualmente en cada una de las torres empacadas del sistema y se utilizaron continuamente durante 15 y 20 meses. Desde los primeros días de operación con ambos materiales se obtuvieron altas eficiencias de remoción (>99 %). Este comportamiento es el resultado de la inoculación de los soportes y las características específicas de estos, las cuales permitieron el establecimiento y desarrollo de las especies microbianas capaces de degradar el H_2S , además de las posibles interacciones químicas y físicas que pudieron tener lugar entre el soporte y el H_2S .

4. CONCLUSIONES

- ☑ El bagazo de caña y su mezcla con piedra pómez demostraron su viabilidad para ser utilizados como materiales de soporte en un biofiltro.
- ☑ La capacidad máxima de eliminación es específica del material de soporte y las condiciones de operación.
- ☑ Para tener consistentemente altas eficiencias de remoción los biofiltros deben operarse por debajo de su capacidad de eliminación máxima.
- ☑ Las condiciones de operación óptimas recomendadas para garantizar el control de las emisiones de H_2S utilizando un sistema de

biofiltración con bagazo y piedra pómez como materiales de soporte, son las siguientes:

- pH del material de soporte: > 3.0
- Contenido de humedad del soporte: 50 ± 20 %
- Contenido de sulfatos del material de soporte: < 30.0 mg/g
- Tiempo de residencia: > 20 segundos

5. BIBLIOGRAFÍA

1. BARTLET, J. K.; Skoog, D. A. 1954. *Colorimetric determination of elemental sulfur in hydrocarbons*, *Analytical Chemistry* 26(6):1008-1011
2. BHON, H. 1992. *Consider biofiltration for descontaminating gases*. *Chemical Engineering Progress*, abril, pp. 34-40.
3. CARLSON, D.A., Leiser C. P. 1966. *Soil beds for the control of sewage odors*. *J. Water Pollution control Fed*, Vol. 38 (5), pp 829-840.
4. DE CASTRO, A.; Allen, D.; Fulthorpe, R. 1996. *Characterization of the microbial population during biofiltration and the influence of the inoculum source*. *Proceedings of the 1996 Conference on Biofiltration*. Reynolds Group, Tustin. p 164.
5. DEGORCE-DUMAS, J.R.; Kowal, S.; Cloirec, P.L. 1997. *Microbiological oxidation of hydrogen sulphide in a biofilter*. *Can. J. Microbiol.*, 43, 264 271.
6. DEVINNY, J.; Deshusses, M.; Webster, T. 1999. *Biofiltration for air pollution control*. Lewis Publishers. cap. 9, pp. 211-250; cap. 5, p. 81-110.
7. HARRISON, A.P. 1984. *The acidophilic Thiobacilli and other acidophilic bacteria that share their habitat*. *Ann. Rev. Microbiol.* 38, 265 - 292.
8. LIZAMA, H. M.; Sankey, B.M. 1993. *Conversion of hydrogen sulphide by acidophilic bacteria*. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, pp 438 - 441.
9. MADIGAN, M. T.; Martinko, J.M; Parker. J. 1999. *Brock: Biology of microorganisms*. 5 ed. Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs. NJ. p 703.
10. OTTENGRAFF, S. P.; et al. 1986. *Biological elimination of volatile xenobiotic compounds in biofilters*. *Bioproc. Eng.* 1: 61-69.
11. SHEEN, R.T.; Kahler, H.L. y Ross, E.M. 1955. *Turbidimetric determination of sulfate in water*, *Ind. Eng. Chem. Anal. Ed.* 7:4, 262.
12. SINGHAL V, et al. 1998. *Biofiltration: an innovative air pollution control technology for H₂S emissions*. Departamento de Ingeniería y Tecnología Química Universidad de Punjab. Chandigarh. India.
13. SUBLETTE, K.; Sylvester, N.D. 1987. *Oxidation of hydrogen sulfide by Thiobacillus denitrificans: Desulfurization of natural gas*. *Biotechnol. and Bioengin.* XXIX, 249 257.
14. SUCROMILES S. A. *Laguna de Oxidación Anaerobica*, *Planta de Control Ambiental*. Palmira, Valle. 1997
15. THOMAS, J.F. y Cotton, J.E. 1954. *A turbidimetric sulfate determination*, *Water & Sewage Works*, 101:426.
16. TORRES-CARDONA, M. et al. 1993. *Biological process for the elimination of sulphur compounds present in gas mixtures*. United States Patent, Number 5,236,677. Aug. 17.
17. YANG Y.; Allen E.R. 1994. *Biofiltration control of Hydrogen Sulfide*. 1. Design and operational parameters. *Air and Waste* 44: 863 - 868.
18. YANG, Y.; Allen, E. 1992. *Biofiltration on air pollution control technologies for hydrogen sulphide emissions*. *Industrial environmental chemistry*. Plenum Press. New york , p. 273-287.