

DISEÑO DE UN SISTEMA DE BIOFILTRACIÓN PARA LA REMOCIÓN DE ESTIRENO

ESTEBAN JIMÉNEZ*
ANA MARÍA VILLEGAS**

RESUMEN

El presente trabajo se enfocó en desarrollar un proceso para la eliminación del gas estireno, un contaminante orgánico generador de malos olores en el aire. Se construyó un sistema de biofiltración en el cual se emplearon bacterias del tipo *Pseudomonas aeruginosa* y *Escherichia coli* adheridas a un soporte de piedra pómez.

Se contaminó aire con estireno en concentraciones por encima del estándar norteamericano (TLV 40 ppm, ACGIH 2002), para simular una atmósfera laboral de alto riesgo a la salud. A fin de evaluar la eficiencia del sistema, se midieron directamente las concentraciones de estireno a la entrada y a la salida, utilizando un medidor de vapores orgánicos. Durante los primeros días se obtuvieron remociones por encima del 55%, para un promedio de 5 mediciones diarias, durante un periodo de 10 días. El sistema se fue estabilizando progresivamente durante la fase inicial, por lo que la remoción no fue la óptima. A partir del día 8 se alcanzaron remociones promedio por encima del 70% y remociones específicas superiores al 90%.

El soporte de piedra pómez demostró ser una buena alternativa, facilitando la formación de una biopelícula; la rápida saturación de sus microporos permitió garantizar la baja adsorción del compuesto orgánico en el medio (piedra pómez + microorganismos), confirmando un auténtico proceso de biodegradación.

PALABRAS CLAVE: control de olores; biofiltración; compuestos orgánicos volátiles (COV); estireno.

ABSTRACT

This work was focused on developing an elimination process of styrene, an organic compound generating complex odors in air, through the design and construction of a biofiltration system, utilizing bacteria of the *Pseudomonas aeruginosa* and *Escherichia coli* types stuck on a pumice stone support.

Air was contaminated with styrene, in concentrations above the American Standard (TLV 40 ppm, ACGIH Worldwide, 2002), to simulate a hazardous work environment to the human health. To evaluate the efficiency of the system, the contaminated inlet air as well as the outlet flow were analyzed by taking direct styrene concentrations measurements with an organic vapor meter. Initially, the results obtained from the styrene degradation were above 55%, for a five-daily-sampling average during 10 days. This percentage was a consequence of the progressive stabilization process of the system within the first days, so the removal was low. However, average removals above 70% and punctual removals above 90% were reached after the eighth day.

The pumice stone support demonstrated to be a good alternative to improve biofilm formation; the rapid micropore saturation guaranteed low adsorption of the organic compound and confirmed the elimination of styrene via biodegradation.

KEYWORDS: odor control; biofiltration; volatile organic compounds (VOC); styrene.

* Ingeniero Ambiental, EIA. Investigador/Consultor. Grupo de Investigaciones Ambientales, Universidad Pontificia Bolivariana (UPB). estebanjr@upb.edu.co

** Ingeniera Ambiental, EIA. Interventora, Oficina de Educación, Participación e Información. Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (Corantioquia). avillegas@corantioquia.gov.co

INTRODUCCIÓN

Las emisiones gaseosas constituidas por compuestos orgánicos tienen consecuencias sobre la calidad del aire, así como sobre los diferentes niveles tróficos de la biosfera.

Gran parte de los problemas asociados a este tipo de compuestos se relacionan con la generación de olores ofensivos¹ y con que, en algunos casos, lleguen a propiciar enfermedades de tipo respiratorio. Adicionalmente, generan efectos económicos negativos para actividades tales como la recreación y el turismo, incidiendo también en el valor de los inmuebles dentro de las zonas afectadas.²

El control de esta clase de emisiones cobra cada vez más importancia, debido a la creciente conciencia ambiental, que se traduce en una mayor presión de las comunidades residenciales sobre las industrias vecinas y en una tendencia a establecer una legislación ambiental cada vez más estricta.

Frente a esta problemática, la normatividad colombiana ha ido generando mecanismos de control y sanción que llevan a las fuentes generadoras a establecer sistemas para su manejo o eliminación.³ Así mismo, mecanismos adicionales como las acciones populares y de tutela implican sanciones que suponen para las empresas la necesidad de opciones tecnológicas que les permitan reducir o eliminar sus emisiones.

En el ámbito mundial, el problema de los olores se ha atacado con el uso de sistemas convencionales de depuración de aire, que incluyen por lo general tratamientos fisicoquímicos. Estas tecnologías, si bien resultan eficaces, por lo general, son costosas y generan subproductos de menor asimilación para posteriores disposiciones.⁴

Aunque existen diversas técnicas para el tratamiento de efluentes gaseosos, los sistemas biológicos, tales como los biofiltros y biolavadores, son los preferidos por sus múltiples ventajas, entre ellas una menor inversión inicial, así como menores costos de operación y la escasa generación de residuos adicionales.

La tecnología de la biofiltración proporciona un método de depuración versátil, económico, simple y eficaz, para una gran variedad de compuestos malolientes o tóxicos, en especial en aquellos casos en los que se tienen flujos altos y concentraciones bajas.⁵ Su principio consiste en la utilización de un material orgánico o inorgánico, que sirve de soporte físico y, en algunos casos, como fuente de nutrientes para una población de microorganismos. El aire contaminado atraviesa el medio o lecho y se depura, debido a la actividad biológica, arrojando subproductos inocuos y de fácil asimilación (agua y CO₂).⁶

En Colombia, el proceso de introducción de la biofiltración de gases ha sido lento y poco estudiado. Pese a su amplia difusión internacional, aún continúa

1 El Decreto 948 de 1995, en su artículo 2º, define olor ofensivo como “el olor generado por sustancias o actividades industriales, comerciales o de servicio, que produce fastidio, aunque no cause daño a la salud humana”.

2 DUPUY, A., CARRASCO, F., GNINGUE, Y. y HEITZ, M. Aspectos microbiológicos, bioquímicos, y fisicoquímicos de la biofiltración de efluentes gaseosos. En: Información Tecnológica. Vol. 9, No. 4 (1998); p. 237-245.

3 Para mayor información refiérase a la Resolución 391 del 6 de marzo de 2001 expedida por el Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente DAMA de Bogotá, en la que se establecen normas técnicas y estándares para compuestos orgánicos volátiles (COV).

4 DUPUY, A., CARRASCO, F., GNINGUE, Y. y HEITZ, M. Aspectos microbiológicos, bioquímicos, y fisicoquímicos de la biofiltración de efluentes gaseosos. En: Información Tecnológica. Vol. 9, No. 4 (1998); p. 237-245.

5 CVT AMERICA TECHNICAL BULLETIN. The application of biofiltration odor control at wastewater treatment plants : Design considerations and process description. CVT Bulletin 96-121 - Revised May 20, 1997.

6 *Ibíd.*



siendo una tecnología poco desarrollada en la industria local.

El presente trabajo desarrolló un estudio de investigación que se materializó en el diseño y construcción a escala de un sistema piloto de *biofiltración* para gases, con el que se realizaron bioensayos específicos para la remoción de estireno.

El estireno (etenilbenceno) es un químico de importancia comercial utilizado en la producción de polímeros, copolímeros y plásticos reforzados. Es un hidrocarburo aromático que se evapora a partir de los 20 °C. Irrita la piel, los ojos y el aparato respiratorio, produce náuseas y borrachera. Una exposición prolongada puede derivar en una dermatitis y afectar los pulmones y el sistema nervioso central. Es sospechoso de ser carcinógeno en animales, y se ha asociado a la generación de abortos espontáneos y malformaciones de nacimiento en niños cuyas madres han entrado en contacto con este compuesto en el ambiente laboral. Los gases procedentes de la evaporación del estireno irritan los ojos y las membranas mucosas en el ser humano. La exposición principalmente ocurre en industrias y operaciones que manejan estireno. Las fuentes industriales son las más probables causas de exposición general de la población.⁷

EXPERIMENTACIÓN

Debido a que las investigaciones en el área de biotecnología, por lo general, se desarrollan en condiciones específicas dependiendo del propósito del estudio, la evaluación piloto siempre se requiere. Esta evaluación determina si la biofiltración es la tecnología de control de la contaminación atmosférica apropiada para flujos residuales específicos. Además, los resultados que se obtienen con la experimentación definen las condiciones para proyectar un sistema a escala industrial.

Diseño del sistema de biofiltración

Los temas que se presentan a continuación incluyen, entre otros, la microbiota empleada, la selección del soporte, las concentraciones para evaluar, el método de muestreo y análisis, la construcción del sistema completo, la preparación del gas y el control de variables específicas.

Microorganismos empleados

El desarrollo experimental planteado involucra la utilización de cultivos de *Pseudomonas* y *E. coli* como fuente de microorganismos, que fueron dispuestos en un proceso de aclimatación con estireno.

Dicho proceso se desarrolló con base en un medio preparado con diluciones de estireno en agua, para generar diferentes concentraciones en medio acuoso, a las cuales fueron sometidos los microorganismos.

A fin de poder determinar la masa bacteriana y su crecimiento durante el periodo de aclimatación, se realizó un seguimiento a partir de cultivos en agar nutritivo, con base en el procedimiento de recuento en placa.

Una vez cumplido dicho proceso de aclimatación (durante un tiempo estimado de tres semanas) el paso siguiente fue realizar el cultivo en el biofiltro, es decir, la inoculación del material seleccionado como sustrato en la masa de lodos.

Material de soporte: piedra pómez

La presente investigación planteó la utilización de piedra pómez como soporte en el interior del biofiltro. La decisión de utilizarla se fundamentó en sus propiedades fisicoquímicas a las cuales se asocian importantes beneficios en términos de resistencia y

7 ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, Ginebra. Environmental Health Criteria (EHC 26, 1983) : Styrene. International Programme on Chemical Safety IPCS International, 1983.

desempeño. Por otro lado, constituye un material competitivo desde el punto de vista económico, frente a otras opciones que han sido objeto de estudios similares, incluyendo soportes de nailon, carbón activado y poliestireno.

Su utilización debía garantizar dos condiciones básicas: facilitar la accesibilidad del contaminante para que su biodegradación fuera eficaz y proporcionar una amplia superficie de inmovilización para los microorganismos.

Se determinó experimentalmente el tiempo que tarda la saturación del material, esto es, el tiempo durante el cual se adsorbe el compuesto en el medio, para establecer si durante los ensayos en efecto había ocurrido un proceso de biodegradación, en lugar de una simple retención física del compuesto.

Muestreo y análisis del gas

Para el trabajo experimental se utilizó un medidor automático de vapores orgánicos portátil Modelo 580S (intrínsecamente seguro, es decir, que se puede utilizar en presencia de materiales inflamables), fabricado por Thermo Environmental Instruments (EE. UU.) y el cual actúa bajo el principio de fotoionización (PID). Fue calibrado con isobutileno y operó a una tasa de muestreo de 300 mL/min.

Este instrumento no discrimina entre los compuestos que detecta, sin embargo, por tratarse de mediciones directas de un solo compuesto, resultó adecuado para los requerimientos analíticos.

La medición de los gases comenzó a realizarse una vez se completó la etapa de aclimatación de los microorganismos en medio acuoso y su inmovilización en la piedra pómez dentro del biofiltro.

Se midieron concentraciones de estireno durante 10 días, empezando dos semanas después de la

siembra en el medio. En forma paralela, se observó el crecimiento bacteriano a partir de cultivos provenientes del interior del biofiltro, los cuales habían sido sometidos a variaciones en la proporción de mezcla aire-estireno-vapor de agua.

Definición de concentraciones para evaluar

Se planteó preparar concentraciones en un rango entre las 100 ppm y 400 ppm, hasta 10 veces por encima de lo indicado por los TLV (40 ppm), con el fin de simular una atmósfera laboral de alto riesgo para la salud. Este rango permitió someter las bacterias a cargas elevadas en forma gradual, para generar un medio adverso o de estrés. Algunos investigadores han sugerido que la aclimatación puede ser más exitosa si se inicia con una corriente diluida, pues en este caso resulta menos “retador” para los microorganismos.⁸

Por otra parte, dado que el proceso de aclimatación se realizó en medio acuoso, se estimó que al lograr un nivel mínimo de tolerancia, es decir, un nivel en el que se observó crecimiento poblacional, disminuía la posibilidad de muerte prematura de las bacterias en el biofiltro.

Tiempo de residencia

Se estableció un tiempo de residencia no mayor a tres minutos que permitiera simular condiciones cercanas a la realidad, es decir, considerando descargas en continuo y pocas fluctuaciones, para recorrer una longitud vertical de 120 cm (longitud total de la columna del biofiltro).

Construcción del biofiltro

Se diseñó y construyó una estructura que se compone de cuatro segmentos (cilindros), cada uno

8 VAN LANGENHOVE, H. and SMET, E. Biofiltration of organic sulfur compounds. En: Proceedings of the 1996 Conference on Biofiltration (an Air Pollution Control Technology), Reynolds, Tustin, CA, 1996, p. 206.



de 30 cm de longitud, los cuales se cierran en los extremos colocando una celda o rejilla de acero inoxidable que sirve de soporte para la piedra pómez. Los cuatro segmentos se juntan formando una sola columna, con el fin de realizar el proceso en etapas y poder medir la remoción en cada tramo. Se prefirió esta disposición, pues permitía separar los módulos o cámaras del biofiltro para tomar muestras del sustrato. El diámetro interno de los cilindros es de 10 cm, con el que resulta un área de 78,54 cm²; la relación entre el volumen y el tiempo de residencia define el flujo total (1178 cm³/min).⁹

En cada una de las cuatro cámaras que componen el biofiltro, se depositó un sustrato de piedra pómez molida (diámetro de partícula entre 0,85 mm y 1,16 mm en los dos compartimientos superiores y entre 1,16 mm y 2,00 mm en los dos de la parte inferior), formando capas de 15 cm de espesor, las cuales, una vez inoculadas con los microorganismos aclimatados al estireno, formaron el lecho o material de empaque.

Para realizar la inoculación de los microorganismos en el soporte, inicialmente se hizo pasar una solución de nutrientes a lo largo del biofiltro hasta empapar la piedra pómez molida. Luego, durante dos días se recirculó en forma continua una solución que contenía la biomasa aclimatada previamente en medio acuoso. Al cabo de este tiempo, se tomaron muestras del soporte en cada compartimento para observarlos al microscopio.

En cuanto a la dirección del flujo en el biofiltro, se optó por el sentido descendente, considerando la viabilidad de esta configuración para el trata-

miento de COV, pues de acuerdo con las características del contaminante evaluado, se esperan como subproductos agua y dióxido de carbono, en lugar de sales o ácidos que pudieran deteriorar el medio y generar acumulaciones de material degradado en él; también se evita la posible fluidización del lecho.

Funcionamiento del sistema de biofiltración

La figura 1 muestra el prototipo de biofiltro construido. El aire se suministra con un compresor (1), se dirige hacia un regulador de presión de dos etapas (2), el cual permite estabilizar las fluctuaciones que induce el compresor en el flujo, de modo que se mantenga constante la presión de entrada al sistema. Enseguida el flujo se divide en dos tramos, cada uno conectado a un regulador de presión de dos salidas (3), con el fin de controlar la presión de entrada al burbujeador (5) y al humidificador (6) respectivamente. En el primero el aire se impregna con el compuesto volátil, mientras el segundo permite la saturación del flujo con agua a temperatura ambiente. El flujo se mide con un rotámetro (6) a la entrada del humidificador;¹⁰ luego se juntan ambos tramos en uno solo para lograr la dilución final y se introduce al biofiltro la mezcla aire-COV-vapor de agua (7).

Se utilizó un medidor de vapores orgánicos OVM (8) a la entrada del biofiltro y se verificaron las concentraciones de estireno por tratar. En cada una de las cámaras del biorreactor se dispusieron puntos de muestreo para verificar las concentraciones del compuesto en el aire. Los microorganismos fueron inmovilizados en un medio de piedra pómez (9).

9 LEVENSPIEL, Octave. Ingeniería de las reacciones químicas. 3 ed. México : Limusa Wiley, 2004. XVIII, 669 p.

10 La mayor proporción del flujo pasa por el humidificador y se mide con el rotámetro entre 5 y 10 L/min.

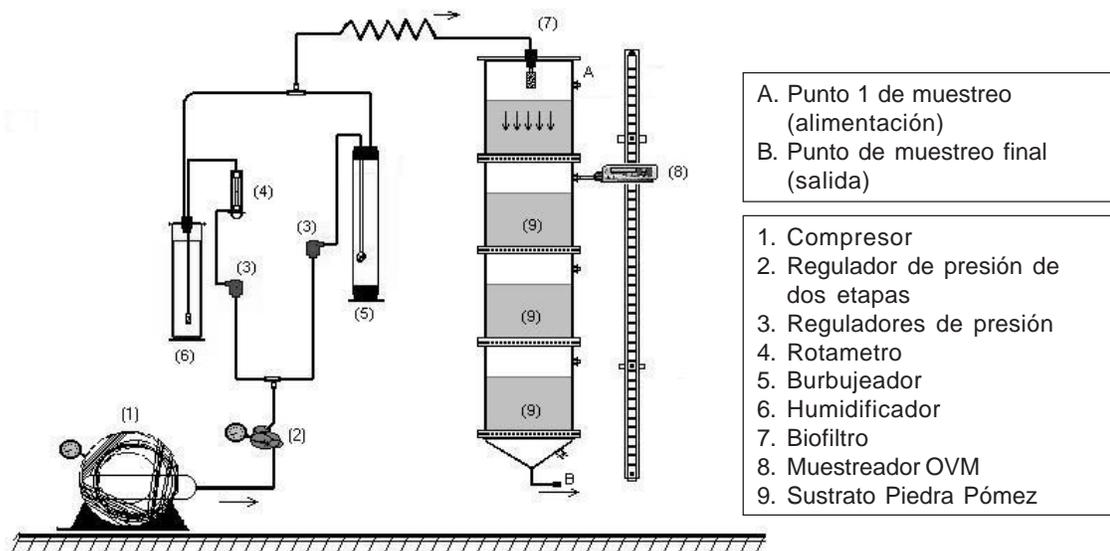


Figura 1. Sistema piloto de biofiltración para remoción de estireno

Aspectos microbiológicos

Se partió de un cultivo mixto, que incluía un grupo de bacterias del tipo *Pseudomona aeruginosa*¹¹ y un grupo de *Escherichia coli*, con la finalidad de lograr consorcios y una mayor resistencia del grupo aclimatado.¹²

El proceso de aclimatación se realizó en medio acuoso para varias diluciones de estireno (30 ppm, 90 ppm, 150 ppm y 210 ppm). Las cepas cultivadas se dispusieron en medios nutritivos, estableciendo un seguimiento durante dos semanas, tiempo durante el cual se verificó el crecimiento de la población, tomando muestras de cada una de las diluciones y realizando cultivos individuales para verificar el crecimiento de bacterias.

La piedra pómez inoculada se introdujo en el biofiltro y se dejó fluir el gas (aire-estireno-vapor de

agua), de modo que los microorganismos pudieran empezar el proceso de biodegradación en el montaje dispuesto.

Todo el proceso se realizó a temperatura ambiente (unos 22 °C); el flujo se mantuvo en un rango de humedad relativa por encima del 90%, medida con un higrómetro a la salida del humidificador, a fin de evitar la desecación del medio.

Para determinar el tiempo de saturación del soporte, se realizó un montaje similar al utilizado en los ensayos de *biofiltración*, en el que se corrió la mezcla aire-estireno y se hizo pasar a través de la piedra pómez sin bacterias, midiendo la concentración a la entrada y a la salida hasta que se ambas se igualaron. Este ensayo se efectuó en una sola cámara (30 cm de longitud) con el mismo espesor de capa de piedra pómez utilizada durante toda la investigación (15 cm).

11 La gran versatilidad metabólica de las bacterias del género *Pseudomonas*, las han hecho candidatas para el tratamiento de la contaminación ambiental producida por la acumulación de metales pesados o por la acumulación de compuestos xenobióticos.

12 La *E.coli* hace parte de un grupo más amplio conocido como Enterobacterias, que presentan un gran desempeño como degradadoras, aunque su manipulación las hace menos deseables para trabajar debido a los problemas sanitarios asociados.



Estos resultados permitieron garantizar que al momento de hacer las mediciones con el OVM, ya se había alcanzado la saturación de la piedra pómez, es decir, en el proceso se hizo pasar la mezcla gaseosa en forma continua a través del biofiltro, con el fin de garantizar un estado estacionario para la realización de cada uno de los ensayos. De este modo, los resultados de remoción obtenidos corresponden efectivamente a porcentajes de biodegradación.

Resultados

Durante el proceso de aclimatación, se identificaron las soluciones en las que se dio el mayor crecimiento de población bacteriana (90 ppm y 150 ppm), y se utilizaron para inocular la piedra pómez en el biofiltro. Si bien el alcance del proyecto no contemplaba la determinación analítica de la concentración de estireno en medio acuoso y, por lo tanto, no podía asegurarse que las bacterias degradaran totalmente este compuesto durante la fase de aclimatación, no obstante, el objetivo principal era garantizar como mínimo la resistencia al compuesto. Para ello se mantuvo un estricto control de los recipientes donde se

prepararon las soluciones para evitar la volatilización del compuesto y la solubilidad del estireno en agua para su preparación.

Por un periodo de dos semanas, se permitió a las bacterias formar una biopelícula en el montaje definitivo, haciendo pasar concentraciones bajas de estireno (5 ppm a 10 ppm), sin dosificar nutrientes (aprovechando la dosis inicial).

Durante 10 días se realizaron en promedio 5 mediciones diarias, registrando concentraciones a lo largo del biofiltro y en la salida. Se verificó la adecuada preparación de la mezcla gaseosa a la entrada del sistema por encima de los niveles definidos antes (superior a 40 ppm). Los porcentajes de degradación promedio para el estireno se presentan en la tabla 1.

La saturación de los microporos para el soporte de piedra pómez empleado a lo largo de toda la columna tardó alrededor 30 minutos, garantizando que la adsorción física del estireno en el soporte no alterara los resultados de las mediciones del gas al final del tratamiento.

Tabla 1. Porcentajes de remoción de estireno durante el periodo de muestreo

DÍA	TR (min)	CONCENTRACIÓN (ppm)					Remoción(%)	Observaciones
		P1*	P2	P3	P4	P5		
1	1,8	49,6	39,5	30,6	22,8	20,1	59,4	Primer muestreo al cabo de 2 semanas de operación
2	1,8	125,8	104,2	94,9	91,7	84,4	32,9	
3	1,3	197,1	174,8	147,1	137,7	96,2	51,2	Disminución en el TR hasta el final del proceso
4	1,3	218,3	205,2	193,1	171,2	110,0	49,6	
5	1,3	291,1	229,0	212,6	208,4	154,1	47,1	
6	1,3	343,9	293,4	272,4	244,7	177,8	48,3	Mayores concentraciones preparadas
7	1,3	132,5	118,9	104,4	89,4	84,9	35,9	
8	1,3	172,7	18,5	21,0	28,4	–	–	Adición de solución de nutrientes
9	1,3	149,2	23,9	18,1	20,4	70,4	52,9	
10	1,3	150,6	136,8	93,4	77,3	40,4	73,2	Estabilización del sistema, remoción superior al 80%

TR: Tiempo de residencia.

*P1: Punto de muestreo 1.

Tabla 2. Resultados del monitoreo durante el periodo de prueba

		CONCENTRACIÓN (ppm)						
	HORA	P1	P2	P3	P4	Salida % Rem		
DIA 1	10:30 a.m.	60	57,4	28,6	21,7	4,9	91,83	
	11:00 a.m.	45,7	53,3	44,1	28,4	3,7	91,90	
	11:30 a.m.	44,1	31,6	20,5	8,4	13,5	69,39	
	1:00 p.m.	82,4	54,2	39,6	46,2	85,4	-3,63	
	2:00 p.m.	61,1	—	—	—	10,2	83,29	
	3:00 p.m.	26,4	22,4	32,6	18,3	12,4	53,06	
	4:00 p.m.	27,5	18,0	18,4	14,0	10,7	61,14	
	PROM.	49,6	39,5	30,6	22,8	20,1	59,45	
DIA 2	9:00 a.m.	132,3	106,6	110,1	101,5	86,8	34,39	
	10:10 a.m.	163,3	163,1	160,6	158,3	145,6	10,80	
	11:10 a.m.	72,7	70,7	69,8	70,7	58,1	20,00	
	12:15 a.m.	138,6	135,2	136,0	104,5	98,7	28,82	
	3:30 p.m.	136,9	87,8	66,4	64,3	59,8	56,35	
	4:30 p.m.	120,0	90,4	52,2	73,0	64,3	46,46	
	6:00 p.m.	116,9	75,5	69,3	69,6	77,9	33,36	
	PROM.	125,8	104,2	94,9	91,7	84,4	32,88	
DIA 3	10:00 a.m.	196,6	158,4	109,9	72,4	58,3	70,35	
	11:00 a.m.	234,7	126,4	74,0	74,0	73,0	68,90	
	1:00 p.m.	195,1	178,2	155,1	158,8	84,9	56,48	
	2:30 p.m.	207,1	193,7	191,2	154,2	26,5	87,20	
	3:30 p.m.	203,1	203,9	187,6	178,3	163,1	19,73	
	4:30 p.m.	145,0	—	—	—	—	—	
	PROM.	196,9	174,4	146,6	137,0	96,2	51,13	
	DIA 4	10:10 a.m.	190,7	182,8	176,3	162,0	46,1	75,83
11:20 a.m.		178,8	174,0	168,8	152,7	122,9	31,24	
1:20 p.m.		190,7	182,2	173,1	150,1	130,8	31,45	
3:10 p.m.		196,0	193,1	186,1	182,3	140,8	28,18	
4:10 p.m.		239,2	199,9	178,3	134,0	16,9	92,93	
5:10 p.m.		314,5	299,5	275,8	246,2	202,4	35,66	
PROM.		218,3	205,2	193,1	171,2	110,0	49,63	
DIA 5		9:45 a.m.	209,4	175,4	174,4	167,5	103,8	50,46
	11:00 a.m.	322,0	278,3	260,0	255,3	205,8	36,08	
	12:00 m	342,0	233,4	203,5	202,3	152,7	55,36	
	PROM.	291,1	229,0	212,6	208,4	154,1	47,08	
DIA 6	10:00 a.m.	346,8	334,0	329,0	299,0	166,7	51,93	
	10:40 a.m.	330,5	263,0	257,0	226,3	130,7	60,45	
	12:00 m.	321,5	281,5	241,5	209,5	150,9	53,06	
	1:20 p.m.	377,5	273,3	248,7	239,3	205,5	45,56	
	6:30 p.m.	343,0	315,0	286,0	249,5	235,3	31,41	
	PROM.	343,9	293,4	272,4	244,7	177,8	48,29	
DIA 7	9:35 a.m.	133,4	111,6	85,3	62,5	61,2	54,09	
	6:30 p.m.	131,6	126,2	123,4	116,3	108,5	17,53	
	PROM.	132,5	118,9	104,4	89,4	84,9	35,93	
DIA 8	12:45 a.m.	172,7	18,5	21,0	28,4	—	—	
	12:50 p.m.	34,3	22,1	14,0	168,5	2,6	92,41	
DIA 9	3:00 p.m.	34,2	23,1	12,7	30,1	2,7	92,17	
	4:00 p.m.	213,0	—	—	—	66,9	68,59	
	5:15 p.m.	186,2	—	—	—	—	—	
	6:15 p.m.	138,6	—	—	—	96,5	30,38	
	6:45 p.m.	174,0	24,7	23,6	10,7	3,2	98,17	
	PROM.	149,2	23,9	18,1	20,4	70,4	52,85	
	DIA 10	1:30 p.m.	73,8	57,5	51,2	51,5	12,1	83,61
		4:50 p.m.	227,4	216,1	135,5	103,2	68,8	69,76
PROM.		150,6	136,8	93,4	77,3	40,4	73,15	

Día 1: QH = 4,41 L/min; TR = 1,8 minutos

Día 2: QH = 4,41 L/min; TR = 1,8 minutos

Día 3: QH = 6,35 L/min; TR = 1,3 minutos

Con respecto a la preparación de la mezcla aire-estireno, el proceso en el burbujeador se realizó a temperatura ambiente y se lograron niveles de humedad relativa superiores al 85%. Se identificó la posibilidad de un proceso de polimerización inducido por la oxidación del estireno, variable que se controló utilizando un agente inhibidor en la solución.

No se ejerció control sobre la caída de temperatura en el burbujeador. Si bien es cierto que la disminución inducida por la volatilización del estireno puede generar condiciones inhibitorias en la biodegradación, se toleró con el interés de simular condiciones cercanas a la operación en la industria. La consecuente desviación en el valor real de concentración se verificó midiendo en forma directa con el OVM en el punto 1 de muestreo.

La degradación del estireno se favoreció controlando los siguientes indicadores: flujo y presión de entrada al sistema, para garantizar la rata de volatilización del compuesto (varía en función de la presión de vapor); concentración microbiana, para verificar el crecimiento o reducción de la biomasa presente en el sustrato (para el caso particular se tomaron muestras directamente del biofiltro y se llevaron a cabo conteos de población en laboratorio); humedad relativa, que se mantuvo por encima del 85% para evitar la desecación del medio con el paso de la corriente gaseosa; tiempo de residencia, para observar el efecto en los porcentajes de remoción final (el tiempo se mantuvo entre 1 y 2 minutos, a medida que comenzó a estabilizarse el sistema después del tercer día).

Finalmente, se controló la concentración de estireno, que se fue incrementando progresivamente hasta inducir al sistema a un ambiente de estrés (niveles por encima de 350 ppm).

La tabla 1 presenta un resumen de los resultados promedio obtenidos durante el periodo de muestreo, de acuerdo con los cinco puntos de control a lo largo de la columna del biofiltro.

La tabla 2 presenta los resultados de la experimentación para cada día durante el periodo de



evaluación, identificando las concentraciones en cada compartimento y el porcentaje de remoción entre la entrada y la salida. Se aprecian las variaciones específicas y la capacidad de eliminación del sistema.

Del tercer día en adelante se mantuvieron las condiciones hasta el final.

En los primeros días se trabajó con concentraciones ligeramente variables alrededor de las 100 ppm y un tiempo de residencia de 1,8 minutos. La remoción fue positiva y se identificó un aumento gradual en los porcentajes de remoción promedio en un rango entre 32,9% y 73,2%, con el máximo al final del periodo de prueba.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En relación al trabajo experimental de aclimatación de las bacterias en medio acuoso, es importante considerar que el proceso en las soluciones de estireno evaluadas permitió garantizar que los microorganismos toleraran un amplio rango de concentraciones (30 ppm a 210 ppm). Los resultados del proceso muestran además que las bacterias estuvieron en capacidad de crecer y multiplicarse en condiciones extremas (una dosis inicial de nutrientes y altas concentraciones de estireno).

A partir de pruebas experimentales de remoción de contaminantes utilizando *Pseudomonas* y *E. coli*, se optó por someter al sistema a condiciones críticas de operación que permitieran comprobar la resistencia de las bacterias y su capacidad de sobrevivir ante una deficiencia de nutrientes.

Se registró un porcentaje de remoción relativamente alto durante el primer día. Esto sugiere que el tiempo previo de colonización de dos semanas fue suficiente para la estabilización del lecho filtrante, habiendo comenzado la biodegradación del estireno.

Sin embargo, al día siguiente se presentó una disminución en dicho porcentaje, lo que podría justi-

ficarse teniendo en cuenta el aumento en las concentraciones de entrada que se registraron para esa jornada (más del doble en relación con el día anterior). Estos resultados sugieren la posibilidad de que las bacterias, al ser sometidas a un ambiente de alto estrés, disminuyeron su actividad metabólica.

En el tercer día se aumentó de nuevo la concentración de entrada, pero en menor proporción. En este caso puede observarse una respuesta mucho más favorable, teniendo en cuenta que comienza a mejorar el desempeño, es decir, el sistema comienza a adaptarse y a recuperar el nivel de degradación registrado inicialmente. El tercer día se aumentó el caudal, con la consecuente disminución del tiempo de residencia a 1,3 minutos.

En este caso, el porcentaje de remoción no se vio afectado en forma significativa por la disminución del tiempo de contacto, de hecho se presentó un aumento inicial en el desempeño y paulatinamente se fue estabilizando al desempeño promedio que se obtuvo durante todo el periodo de muestreo.

Entre el cuarto y el sexto día, se prepararon las mayores concentraciones, alcanzando las 377 ppm. Como era de esperarse, se presentó una caída en el porcentaje de remoción, sin embargo, esta vez fue menos significativa en relación con la primera, lo que constituye un resultado positivo, considerando que permite definir un comportamiento más resistente por parte de las bacterias; en este caso el sistema logró amortiguar el efecto de las condiciones extremas y mantenerse en un nivel de remoción promedio del 48%.

En los siguientes días se disminuyeron nuevamente las concentraciones a un valor promedio de 150 ppm y se agregó una solución de nutrientes en el día 8. Los resultados de este periodo arrojaron un aumento considerable en los porcentajes de remoción, alcanzándose un máximo de 83,61% en el día 10. Este aumento puede justificarse teniendo en cuenta que se dio un estímulo adicional al proceso de biodegradación, al estabilizar la variación en las

concentraciones y suministrar una fuente de nutrientes inorgánicos.

Es de anotar que los niveles de estireno en esta última etapa se acercaron mucho a los niveles registrados en los primeros días, con la diferencia de que esta vez se lograron aumentar los porcentajes de remoción y reducir las concentraciones finales hasta valores cercanos a los límites permisibles de exposición a estireno en ambientes laborales (TLV).

El proceso de remoción a lo largo del biofiltro identificado en cada uno de los compartimentos fue relativamente uniforme y en proporciones constantes. No obstante, en los resultados de los primeros días puede observarse un par de mediciones aisladas que arrojaron porcentajes de remoción negativos, es decir, un supuesto aumento de la concentración de estireno a la salida con respecto a la de entrada.

Estos resultados podrían explicarse con base en dos posibilidades. La primera justificaría esta respuesta considerando una falla en la sensibilidad en el instrumento de medición (una situación probable), sin embargo, existe una segunda posibilidad que estima una alteración en las mediciones como consecuencia de una desorción.

Para explicar este efecto, se debe considerar que es posible que en el lecho filtrante se vayan acumulando subproductos de las reacciones bacterianas que hagan parte de la ruta metabólica de biodegradación del estireno y correspondan a compuestos volátiles que de igual forma generen vapores orgánicos adicionales. En este caso la medida arrojada por el OVM no diferencia de cuál compuesto se trata y se induce una desviación en la medida de concentración final registrada.

Existen indicadores que no se controlaron en forma continua, no obstante resultan ser variables de interés a la hora de hacer un seguimiento más estricto del sistema. Si bien no restan validez a los resultados obtenidos, es conveniente mencionarlos como propuesta para la proyección del sistema a mayor es-

cala, entre ellos: medida de presiones a la entrada del humidificador y del burbujeador, flujo de aire que ingresa en este último y caída de presión en el biofiltro.

CONCLUSIONES

Las concentraciones experimentales se establecieron teniendo como referencia los niveles máximos permisibles sugeridos por la ACGIH, contenidos en los TLV (2002); se prepararon concentraciones iniciales equivalentes a casi diez veces el valor de la norma (377,5 ppm a 400 ppm).

La degradación promedio para el estireno fue del 54%. Aunque no es un porcentaje muy alto, se recomienda continuar con ensayos a escala de laboratorio que permitan aumentar la eficiencia del sistema. Se estima que es posible mejorar significativamente los resultados con un periodo más largo de experimentación, teniendo en cuenta los valores obtenidos en la última etapa, que arrojaron remociones por encima del 80%.

Gracias a que se logró la estabilización del biofiltro con el cultivo seleccionado, necesaria para la realización de ensayos con corrientes gaseosas, se considera la piedra pómez como una buena opción de sustrato, debido a que permitió una rápida colonización, teniendo en cuenta que en otros casos este proceso puede tardarse más de un mes.

Se determinó experimentalmente que la capacidad de adsorción de este sustrato es baja (en comparación con otros materiales como el carbón activado), garantizando que la remoción del estireno tuvo lugar gracias a un proceso exclusivo de biodegradación.

Los resultados obtenidos en el proceso de *biofiltración* indican que el sistema utilizado con este tipo de emisiones es una opción válida y digna de consideración para nuestro medio. En este contexto, se ha logrado una aproximación a una tecnología para el control de la contaminación de emisiones atmosféricas que, si bien ya ha sido desarrollada con



éxito en varias aplicaciones y en forma económica en el exterior, es poco conocida en Colombia, y permite comenzar un proceso de estudio de factibilidad para la industria. Sin embargo, es conveniente un plazo más amplio para la adecuación del sistema, de modo que se alcancen reducciones por debajo de los límites permisibles de exposición.

Con relación a los aspectos microbiológicos de la biofiltración, es conveniente estudiar el comportamiento de los microorganismos en forma detallada, lo que implica hacer un seguimiento del metabolismo bacteriano frente a la biodegradación de estireno u otros compuestos de interés para la industria, así como determinar los subproductos de las reacciones microbianas.

Es importante también evaluar la posibilidad de probar otro tipo de sustratos que puedan mejorar la eficiencia del sistema, sin elevar los costos de su implementación. En este contexto, se recomienda estudiar la factibilidad de experimentar, por ejemplo, con materiales alternativos aún en estudio, como los áridos ligeros obtenidos como resultado de la valorización de lodos provenientes de plantas depuradoras de agua (biosólidos) que presentan características similares a la piedra pómez.

BIBLIOGRAFÍA

- ACUÑA, Maria Elena et al. Microbiological and kinetic aspects of a biofilter for the remotion of toluene from waste gases. En: *Biotechnology and Bioengineering*. Vol. 63, No. 2 (Apr. 1999); p. 175-184.
- CHUNG, Ying-Chien; HUANG, Chihpin and TSENG, Ching-Ping. Biodegradation of hydrogen sulfide by a laboratory-scale immobilized *Pseudomonas putida* CH11 biofilter. En: *Biotechnol. Prog.* Vol. 12, No. 6; p. 773-778.
- COX, H. H. J., HOUTMAN, J. H. M., DODDEMA, H. J., and HARDER, W. Enrichment of fungi and degradation of styrene in biofilters. *Biotechnol. Lett.*, 1993.
- COX, H. H. J. et al. Performance of a styrene-degrading biofilter containing the yeast *Exophiala jeanselmei*. En: *Biotechnology and Bioengineering*. Vol. 53, No. 3 (Feb. 1997); p. 259-265.
- CVT AMERICA TECHNICAL BULLETIN. The application of biofiltration odor control at wastewater treatment plants : Design considerations and process description. CVT Bulletin 96-121, Revised May 20, 1997. 10 p.
- DESHUSSES, A. M. Biological waste air treatment in biofilters : *Current opinion in Biotechnology*. 1997.
- DEVINNY, J. S., DESHUSSES, M. A. and WEBSTER, T. S. Biofiltration for air pollution control. 1 ed. United States of America : CRC Press LLC, 1999. 299 p.
- DUPUY, A., CARRASCO, F., GUNGUE, Y. y HEITZ, M. Aspectos microbiológicos, bioquímicos y fisicoquímicos de la biofiltración de efluentes gaseosos. En: *Información Tecnológica*. Vol. 9, No. 4 (1998); p. 237-245.
- ESTADOS UNIDOS. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, U.S. EPA. Sampling and analysis of airborne pollutants. Chapter 7 : Volatile organic compound analysis : Detector selection for the analysis of VOC. Lewis Publishers, 1993. p. 103 -116.
- LIZAMA SOBERANIS, Beatriz E. et al. Degradación de xileno y estireno en aire por medio de biofiltración. Toluca, México, 1999. 6 p.
- SABO, F., SCHNEIDER, U., and MOTZ, U. Latest developments and industrial applications of biofiltration. Proceedings USC-TRG Conference on Biofiltration. Los Angeles, CA, 1996.
- TOFFEY, William E. Biofiltration, Black box or biofilm? En: *BioCycle : Compost Operator Forum*. (Jun. 1997); p. 58-63.
- VAN DURME, Gayle P.;McNAMARA and McGINLEY, Charles M. Bench-scale remotion of odor and volatile organic compounds at a composting

facility. En: Water Environment Research. Vol. 64, No. 1 (Jan. – Feb. 1992); p. 19-27.

VAN LANGENHOVE, H. and SMET, E. Biofiltration of organic sulfur compounds. En: Proceedings of the 1996 Conference on Biofiltration (an Air Pollution Control Technology), Reynolds, Tustin, CA, 1996, p. 206.

WATER ENVIRONMENT FEDERATION. Odor and volatile organic compound : Emission control for municipal and industrial wastewater treatment facilities. Specialty conference of the WEF, session 4 Biofilter. USA, April 24-27, 1994.