

**BIOFILTRACION APLICADA A LA REMOCION DE SULFURO DE HIDROGENO
(H₂S) GENERADO EN AGUAS RESIDUALES DE ORIGEN DOMESTICO**

ANTONIO JOSE ALVAREZ MANCILLA

**UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
SANTA MARTA, D.T.C.H.
2014**

**BIOFILTRACION APLICADA A LA REMOCION DE SULFURO DE HIDROGENO
(H₂S) GENERADO EN AGUAS RESIDUALES DE ORIGEN DOMESTICO**

ANTONIO JOSE ALVAREZ MANCILLA

**Trabajo de Investigación presentado como requisito parcial para optar al
título de:**

INGENIERO AMBIENTAL Y SANITARIO

Director (a)

**YINIVA CAMARGO CAICEDO
Ingeniera Quimica, Msc.**

**UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
SANTA MARTA, D.T.C.H.
2014**

Nota de aceptación

Evaluador

Santa Marta, 12 de marzo de 2014

A Dios por Guiarme y darme fuerzas para seguir este camino,
A mi Madre, por ser mi Ejemplo, mi Apoyo y Esforzarse en ver este
Logro hecho realidad,
A mi Padre (Q.E.P.D.) que a pesar de no estar presente físicamente
sé que lo está de manera espiritual,
A mi Abuelo Augusto (Q.E.P.D.) quien siempre estuvo ahí para
darme fuerzas y salir adelante, y a mi Familia por ser lo mejor
que he tenido en mi vida!

Antonio José Álvarez Mancilla
Ingeniero Ambiental y Sanitario

AGRADECIMIENTOS

A la Ingeniera Yiniva Camargo Caicedo, por proponer la idea de investigación y su consecuente respaldo como directora del proyecto.

Al programa de Semilleros de Investigación de la Universidad del Magdalena, por su apoyo en la financiación del proyecto en la convocatoria 2009.

A METROAGUA S.A. E.S.P, por brindarnos el acceso a las instalaciones de la Estación Norte como escenario de trabajo y el préstamo de los equipos de medición para el desarrollo eficaz de este proyecto de investigación.

A los Ingenieros Jorge Corrales, Ana Diazgranados y Jhonny Castillo, por su colaboración y apoyo en la logística del proyecto.

Al Ingeniero Andrés Vélez Pereira, por su colaboración permanente en el análisis estadístico.

Al Ingeniero Luis Naranjo Sarmiento, por su apoyo incondicional en la construcción de los Biofiltros.

A la Ingeniera Sandra Balaguera Rincones, a Juan Manuel Sánchez, y Luis Eduardo Sánchez, por su apoyo incondicional en las labores de campo y la ejecución del proyecto.

CONTENIDO

RESUMEN	12
1. INTRODUCCION	13
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
2.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	14
2.2. JUSTIFICACIÓN	19
3. MARCO TEÓRICO	22
3.1. LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	22
3.2. LEGISLACIÓN	23
3.3. GENERACIÓN DE OLORES OFENSIVOS	24
3.4. LA BIOFILTRACIÓN	25
3.6. CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL BIOFILTRO	30
3.6.1. Material de Soporte	30
3.6.2. Humedad	31
3.6.3. Microorganismos	31
4. ESTADO DEL ARTE	32
5. OBJETIVOS	37
5.1. OBJETIVO GENERAL	37
5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	37
6. METODOLOGIA	38
6.1. CONDICIONES CLIMÁTICAS DE LA CIUDAD DE SANTA MARTA	39
6.1.1. Climatología	39
6.1.1.1. <i>Temperatura</i>	39
6.1.1.2. <i>Humedad</i>	41
6.1.1.3. <i>Velocidad y Dirección de Vientos</i>	42
6.1.1.4. <i>Precipitación</i>	42
6.2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ALCANTARILLADO DE LA CIUDAD DE SANTA MARTA	43
6.2.1. Estaciones de Bombeo	44

6.3. LOCALIZACIÓN DE LOS BIOFILTROS _____	46
6.4. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE LOS BIOFILTROS _____	47
6.5. TOMA DE MUESTRAS _____	49
6.6. CONDICIONES DE OPERACIÓN _____	50
6.6.1. Características del Biofiltro _____	50
6.6.2. Parámetros de Operación _____	50
7. DATOS _____	51
7.1. VARIABLES DE OPERACIÓN TOMADAS EN LAS HORAS DE MUESTREO _____	51
7.1.1. Temperatura, Humedad Relativa y pH _____	51
7.2. CONCENTRACIÓN PROMEDIO DIARIA DE SULFURO DE HIDROGENO PRODUCIDAS EN LA ESTACIÓN NORTE _____	52
8. RESULTADOS _____	54
8.1. REPRESENTACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES _____	54
8.2. COMPARACIÓN DE LAS EFICIENCIAS DE REMOCIÓN EN CUANTO A LA TEMPERATURA _____	57
8.3. COMPARACIÓN DE LAS EFICIENCIAS DE REMOCIÓN EN CUANTO A LA HUMEDAD RELATIVA _____	58
8.5. COMPARACIÓN DE LAS EFICIENCIAS DE REMOCIÓN EN CUANTO AL pH DEL MEDIO _____	60
9. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS _____	62
9.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS. _____	62
9.1.1. Análisis de Varianza para Eficiencia _____	62
10. DISCUSIÓN DE RESULTADOS _____	66
11. CONCLUSIONES _____	69
12. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS _____	72
12. ANEXOS _____	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Variación espacial de la media anual de la Temperatura en el Magdalena	40
Figura 2. Variación Anual de la Temperatura en Santa Marta	40
Figura 3. Variación Anual de la Temperatura en Santa Marta	41
Figura 4. Promedio Anual de la Distribución espacial de la velocidad de los vientos en el Magdalena.....	42
Figura 5. Distribución espacial de la velocidad de la precipitación en el Magdalena	43
Figura 6. Variación Anual de la Precipitación en Santa Marta	43
Figura 7. Ubicación de las Estaciones de Bombeo en la Ciudad de Santa Marta.	45
Figura 8. Estación Norte.....	46
Figura 9. Ubicación de la EBAR Norte	46
Figura 10. Diseño del Biofiltro	48
Figura 11. Tanque de Veinte (20) Litros Utilizado para Almacenar Agua Residual	48
Figura 12. Bomba Elite 802.....	49
Figura 13. Monitor Multigases Portátil Protégé™	49
Figura 14. Medidor Climático KESTREL 4500	52
Figura 15. pH METER.....	52
Figura 16. Comportamiento de las concentraciones de H ₂ S generados en la estación norte.....	53
Figura 17. Comparación de valores de Concentración Promedio Diaria Entrante en el Biofiltro, entre los días 1 al 15 de operación.....	56
Figura 18. Comparación de valores de Concentración Promedio Diaria Entrante en el Biofiltro, entre los días 16 al 29 de operación.....	56
Figura 19. Gráfico de Eficiencia de Remoción Vs. Temperatura en el Biofiltro, entre los días 1 al 15 de operación.....	57
Figura 20. Gráfico de Eficiencia de Remoción Vs. Temperatura en el Biofiltro, entre los días 16 al 29 de operación.....	58

Figura 21. Gráfico de Eficiencia de Remoción Vs Humedad Relativa en el Biofiltro, entre los días 1 al 15 de operación	59
Figura 22. Gráfico de Eficiencia de Remoción Vs Humedad Relativa en el Biofiltro, entre los días 16 al 29 de operación	59
Figura 23. Gráfico de Eficiencia de Remoción pH del Medio en el Biofiltro, entre los días 1 al 15 de operación	60
Figura 24. Gráfico de Eficiencia de Remoción pH del Medio en el Biofiltros, entre los días 16 al 29 de operación.....	61
Figura 25. Sinopsis de las medias de Temperatura.....	63
Figura 26. Sinopsis de las medias de Humedad	64

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Actividades Generadoras de olores ofensivos.....	23
Tabla 2. Diversas Aplicaciones de la Biofiltración a escala global.....	34
Tabla 3. Composición Física del Bagazo de Caña de Azúcar.....	38
Tabla 4. Composición Química del Bagazo de Caña de Azúcar.....	39
Tabla 5. Condiciones de Operación del Biofiltro.....	50
Tabla 6. Análisis de Varianza para Eficiencia - Suma de Cuadrados Tipo III.....	62
Tabla 7. Prueba de Rangos múltiples con Método: 95% LSD, Aplicada a la Eficiencia por Temperatura.....	63
Tabla 8. Diferencias significativas entre los Intervalos de Temperatura	63
Tabla 9. Prueba de Rangos múltiples con Método: 95% LSD, Aplicada a la Eficiencia por Humedad Relativa	64
Tabla 10. Diferencias significativas entre los Intervalos de Humedad Relativa	65

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Formato de Toma de Datos en Campo	79
Anexo 2. Datos de Concentraciones horarias producidas en la estación norte.....	82
Anexo 3. Datos de Temperatura, Humedad Relativa y pH del Agua Residual al Momento de la Toma de Muestras.	84
Anexo 4. Concentraciones de Sulfuro de Hidrogeno en la Entrada y Salida del Biofiltro.	88
Anexo 5. Carga (C), Capacidad de Remoción (CR) y Eficiencia de Remoción (ER) en el Biofiltro.....	92
Anexo 6. Concentraciones de Sulfuro de Hidrogeno tomadas en muestras de aire ambiente (Biofiltro Blanco)	96
Anexo 7. Registro Fotográfico	100

RESUMEN

Los sistemas de bombeo y/o tratamiento de aguas residuales, generan olores ofensivos, debido a los altos contenidos de compuestos azufrados presentes en las aguas residuales, lo que puede causar molestias a las comunidades cercanas a estos lugares. A partir de esta problemática se planteó la necesidad de experimentar la implementación de un sistema eficiente y económico para el tratamiento y eliminación de los compuestos generadores de olores.

En este sentido, se diseñó un Biofiltro que fue dispuesto en la estación de bombeo de aguas residuales norte (EBAR), ubicada en el sector norte de la ciudad de Santa Marta, en el que se presentan las mayores concentraciones de sulfuro de hidrogeno de la ciudad. Los datos colectados fueron analizados mediante estadística descriptiva los cuales arrojaron las condiciones óptimas para la operación de estos sistemas.

Al finalizar la fase de operación y análisis de resultados, se observaron eficiencias de remoción hasta del 100%, llegando a la conclusión que la biofiltración es una tecnología eficiente para la eliminación de sulfuro de hidrogeno en el aire.

Palabras clave: Olores Ofensivos, Sulfuro de Hidrogeno, Biofiltración, Eficiencia de Remoción, Aguas Residuales.

1. INTRODUCCION

Los problemas de contaminación son un reto para el hombre moderno, debido a que la generación de sustancias durante los procesos que éste realiza, deterioran los sistemas y es cuando debe actuar desarrollando tecnologías que ayuden a mitigar y/o eliminar el daño causado al ambiente.

En el ámbito industrial se requieren tecnologías económicas y eficaces que ayuden a disminuir la carga de contaminantes generados en sus procesos, para esto existen tratamientos físicos, químicos y biológicos que ayudan a eliminar y/o disminuir estas cargas.

Dentro de estos tratamientos, la biofiltración es una de las tecnologías más utilizadas para la eliminación y/o reducción de las cargas contaminantes generadas en los procesos industriales, dado que esta presenta ventajas de operación, además de ser una tecnología económica, ya que los materiales que componen estos sistemas son fáciles de obtener, por ser en su mayoría considerados materiales de desecho (en el caso de los usados para la construcción del lecho filtrante).

A partir de la puesta en marcha de la resolución 1541 de 2013, es necesario desarrollar tecnologías óptimas para el tratamiento de olores ofensivos, dado que estos generan desagrado y afectan la calidad de vida de la población, teniendo en cuenta que pueden provocar molestias respiratorias e incomodidad a los habitantes cercanos a las fuentes generadoras de los compuestos olorosos.

Este trabajo, buscó aplicar una tecnología eficiente para el control de olores ofensivos en las estaciones de bombeo de aguas residuales de la ciudad de Santa Marta, dada su proximidad a la población, presentando concentraciones de sulfuro de hidrogeno (H_2S) que oscilan entre 1 y 500ppm en los casos más extremos.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La fuente de malos olores en sistemas de depuración, está asociada a la generación y tratamiento de residuos sólidos como el lodo biológico o químico, así como con el manejo del agua residual y con la degradación de la materia orgánica dentro de la planta de tratamiento. El manejo y control de olores en las plantas de tratamiento de aguas residuales ha adquirido gran importancia debido al crecimiento de la población, a la multiplicación de estos sistemas en el ámbito nacional y a su proximidad a residencias y centros poblados.

Uno de los compuestos que contribuye en gran medida a la generación de malos olores es el sulfuro de hidrógeno, que resulta como producto natural de la descomposición anaerobia de la materia orgánica, muy frecuentemente encontrado en drenajes y en plantas de tratamiento de aguas residuales y de lodos de desecho. Toda planta de tratamiento mal diseñada y/o mal operada, sea de tipo fisicoquímico o biológica, de tipo aerobio o anaerobio, es susceptible de generar malos olores. Sin embargo, debido al metabolismo de ciertas bacterias anaerobias (sulfato reductoras), el medio anaerobio es el más propenso a producir malos olores, sobre todo cuando en el agua residual existen altas concentraciones de sulfatos y sulfuros. La emisión de sulfuro de hidrógeno se encuentra en muchas actividades industriales como la refinación de petróleo, la fabricación de pasta, papel y el procesamiento de alimentos.

Este es uno de los principales problema asociados con el tratamiento anaerobio de sulfatos y sulfitos que contienen las aguas residuales donde se puede encontrar en el agua tratada y el biogás, causando problemas de corrosión y un olor fuerte y desagradable¹.

¹ OYARZÚN, Patricio; ARANCIBIA, Fernando; CANALES, Christian; AROCA, German. Biofiltration of high concentration of hydrogen sulphide using *Thiobacillus thioparus*. *Process Biochemistry* Vol. 39. 2003. p.165-170.

Las causas principales de la generación de olores en plantas de tratamiento pueden atribuirse al inadecuado diseño y/u operación del sistema, al almacenamiento de lodos en forma inadecuada, a la acidificación de reactores anaerobios y a las características del efluente de plantas de tratamiento anaerobia al momento de la descarga.

La generación de olores ofensivos, es generalmente uno de los principales signos de condiciones de aguas residuales sépticas producto de la actividad bacteriana anaeróbica en ausencia de oxígeno o nitrato, siendo los compuestos más fuertemente identificados el sulfuro de hidrógeno, mercaptanos, aminas y ácidos grasos volátiles.

Los problemas más comunes de generación de olores ofensivos, son causados por mezclas de compuestos altamente volátiles con bajo umbral de detección presentes en el aire en escasa concentración. Algunos sectores industriales producen gases procedentes de compuestos orgánicos volátiles y/o inorgánicos incluyendo las industrias de procesos, aromatizantes sintéticos y fábricas de pinturas, industrias de pulpa de papel, industrias farmacéuticas, refinerías, etc.²

La emisión de olores ofensivos en las plantas depuradoras de aguas residuales, representa un impacto significativo a la calidad del aire. Una mayor concientización de la población sobre sus derechos y el aumento del número de plantas depuradoras en explotación, asociadas a las presiones urbanas sobre áreas desocupadas que fuerzan la construcción de residencias y/o complejos de ocio cada vez más próximos de estas plantas, obligan a las empresas responsables a considerar este problema, buscando soluciones de forma constante para evitar conflictos con las comunidades³.

2 REVAH, Sergio; MORGAN SAGASTUME, Juan Manuel. *Methods of Odor and VOC Control*. Shareefdeen, Zarook y Singh, Ajay. *Biotechnology for Odor and AirPollution Control*. Heidelberg, Germany: Springer. 2005. p. 29-63.

3 MARIZ MEDEIROS, D.; HERNANDEZ MUÑOZ, A; HERNANDEZ LEHMANN, A; LUCAS FILHO, M. Eliminación de Compuestos Volátiles Olorosos por Electrocoagulación. *AIDIS*. Vol. 4. 2011. No. 2.

En el caso particular de plantas de tratamiento anaerobias que tratan aguas residuales con compuestos de azufre oxidados como el tiosulfato, sulfito o sulfatos tienden a reducirlos a sulfuro. Estos tipos de aguas residuales son producidos por la industria petroquímica, la del procesamiento fotográfico, la del papel y la de los ingenios azucareros.

La emisión de sulfuro de hidrógeno se encuentra en muchas actividades industriales como la fabricación de pulpa y papel, el procesamiento de alimentos y la refinación de petróleo. Este es un problema importante asociado con el tratamiento anaeróbico de aguas residuales con contenidos de sulfito y sulfato que se pueden encontrar en el agua tratada y el biogás, causando problemas de corrosión y olores ofensivos⁴.

El lecho filtrante representa una parte importante de un filtro biológico ya que los microorganismos crecen en su superficie. Entre las características van directamente ligadas a las necesidades del tratamiento, las cuales tienen una fuerte influencia en la eficiencia del sistema y el costo tanto.

- i. **El tamaño de la partícula:** dentro de este parámetro se puede incluir el diámetro de la misma, el área superficial y el volumen de la porosidad (el área específica puede variar entre 300 y 1000 m² m⁻³).⁵
- ii. **La cantidad de nutrientes:** dado que el material de soporte en la mayor parte de los casos es una fuente de carbón y energía para los microorganismos que crecen en él⁶.
- iii. **La retención de humedad:** La cual en muchas ocasiones funciona como tampón para evitar la variación del pH⁷.

4 OYARZUN *et al.* Op. Cit., p. 11

5 HERRYEGERS 2000

6 MATHUR ANIL, K; MAJUMDER, C; CHATTERJEE, Shamba. Combined removal of BTEX in air stream by using mixture of sugar cane bagasse, compost and GAC as biofilter media. *Journal of Hazardous Materials*. 2007. p. 64–74.

7 MATHUR *et al.* Ibid.

Además de presentar fuertes propiedades mecánicas, los materiales de empaque también deben mejorar las condiciones para la fijación de la biomasa y el crecimiento⁸.

Jiang *et al.*⁹, trabajaron con biofiltros a partir de residuos de carbón con los cuales daban tratamiento a corrientes de aire con concentraciones de Sulfuro de Hidrogeno mayores a las 20 ppm. Por otro lado, Rattanapan *et al.*¹⁰, reportaron concentraciones de entrada a los biofiltros, comprendidas entre los 100 ppm y 4000 ppm respectivamente, generadas en plantas depuradoras de aguas residuales.

La biofiltración es un proceso complejo que es afectado por varios factores como la oxigenación del medio, el contenido de humedad y nutrientes, el pH, la temperatura y los patrones de flujo en el medio.

Morgan *et al.*¹¹, comentan que para mejorar la tecnología del biofiltro para la reducción de Sulfuro de Hidrogeno se requiere desarrollar nuevos medios filtrantes que favorezcan la retención de humedad, que posean alta disponibilidad de nutrientes y de superficie para el soporte de los microorganismos así como el desarrollo de mejores técnicas para el control de pH, humedad y nutrientes en el medio filtrante con el objeto de incrementar su vida útil; además se debe asegurar distribución homogénea del gas a tratar en el lecho del biofiltro y cuantificar el tiempo de retención real del mismo en el lecho. Desde el punto de vista

8 COHEN, Y. Biofiltration--the treatment of fluids by microorganisms immobilized into the filter bedding material: a review. *Bioresour Technol.* 2001. May;77 (3) p.257-74.

9 JIANG, Xia; YAN, Rong; HWA TAY, Joo. Reusing H₂S-exhausted carbon as packing material for odor biofiltration. *Chemosphere.* Volumen 73. 2008. p. 698-704.

10 RATTANAPAN, Cheerawit; BOONSAWANG, Piyarat; KANTACHOTE, Duangporn. Removal of H₂S in down-flow GAC biofiltration using sulfide oxidizing bacteria from concentrated latex wastewater. *Bioresour Technol.* Vol. 100. 2009. p. 125-130

11 MORGAN SAGASTUME, Juan; REVAH MOISSEV, Sergio; NOYOLA, A. Algunas tecnologías para la eliminación de H₂S por vía fisicoquímica y microbiológica. *Revista del IMIQ*, año XLII vol. 9-12. 2001. p. 209-210.

microbiológico se sugiere orientar esfuerzos para detectar los microorganismos clave en el tratamiento del gas, sus requerimientos nutricionales y ambientales, toxicidad, etc., además de esto, la corriente de gas y la corriente de agua utilizada para humedecer la biopelícula proporcionan todos los nutrientes necesarios para el desarrollo de los microorganismos. Sin embargo, las concentraciones de contaminantes en los gases de la mayoría de los flujos de residuos pueden variar con el tiempo debido ya sea a la naturaleza inherente de los procesos que los generan o de paradas por mantenimientos del sistema o vacaciones de los operarios¹².

Este proyecto se encontró enmarcado en dar respuesta a la siguiente pregunta problema: ***¿La Biofiltración puede ser una tecnología apropiada para la remoción de Sulfuro de Hidrógeno generado en Aguas Residuales de origen doméstico?***

A partir de la pregunta principal, surgen los siguientes cuestionamientos secundarios:

¿Con cuales concentraciones de sulfuro de hidrogeno, el biofiltro obtendrá eficiencias de remoción optimas?

¿Qué factores influyen en el proceso de biofiltración para la remoción de sulfuro de hidrogeno?

¿Cuál es la eficiencia de remoción del sistema de biofiltración?

12 GAUDIN, F; ANDRES, Y; LE CLOIREC, P. Packing material formulation for odorous emission biofiltration. Chemosphere. 2008. p. 958-66.

2.2. JUSTIFICACIÓN

El desarrollo tecnológico nacional competitivo en este sentido generaría un impacto positivo en el plano comercial y contribuiría a la independencia tecnológica del país, teniendo en cuenta la alta demanda de tecnología para el control de olores que se espera desde la puesta en vigencia de la Resolución 1541 del 12 de Noviembre de 2013 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), la cual establece la norma de calidad de aire o nivel de inmisión en condiciones de referencia, y especifica un mayor control en las emisiones de olores a la atmósfera en el art. 5º, tabla No. 2 donde se presentan los niveles permisibles de calidad del aire o de inmisión para sustancias de olores ofensivos a condiciones de referencia (25°C y 760 mmHg)¹³.

Además de esto el Ministerio está desarrollando protocolos de monitoreo y medición, con el fin de reglamentar el tema correspondiente al seguimiento en la generación de olores ofensivos.

Existen muy pocas empresas en el ámbito internacional que ofrecen tecnologías biológicas para el control de olores en la atmósfera y el mercado ha sido cubierto en su mayor parte por sistemas de tratamiento fisicoquímico. En este sentido, se prevé una importante participación en el ámbito académico e investigativo en relación al control de olores ofensivos en América Latina y el Caribe.

La contaminación por olores es un tema de creciente preocupación como resultado de las molestias a las comunidades, que aunque evidencien escasos o nulos efectos adversos sobre la salud humana, presentan efectos secundarios relacionados con este tipo de emisiones, al afectar directamente la calidad de vida de las personas. La atmósfera se constituye en el vehículo de transmisión de las especies generadoras de olores ofensivos, siendo los procesos atmosféricos

¹³ COLOMBIA. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución 1541 de 2013.

responsables de contribuir a potenciar o disminuir la incidencia de éstos, mediante los diversos tipos de estabilidad atmosférica e inversión térmica.

Entre los métodos biológicos, la biofiltración es el método más eficiente y de bajo costo para la eliminación de gases causantes de olores ofensivos, ésta ayuda a purificar el aire, resultado de los procesos antrópicos, que de alguna manera deterioran la calidad del aire¹⁴. Esta tecnología depende de muchos factores, como por ejemplo los ambientales (temperatura, humedad relativa y el crecimiento de microorganismos). El crecimiento de los microorganismos está ligado directamente a los factores de operación, dado que, se deben garantizar las condiciones ideales para el aumento poblacional de estos y de esta manera pueda asimilar la carga contaminante entrante para su posterior remoción¹⁵.

Según Fernández¹⁶, la biofiltración ofrece algunas ventajas costo – operacionales, que la clasifican como una tecnología eficiente y de bajo costo, entre las que se tiene:

- Alto grado de eliminación para determinadas sustancias como compuestos orgánicos volátiles en general, el dióxido de azufre, el amoníaco y el sulfuro de hidrógeno.
- Bajo coste de instalación del biofiltro debido a que se construye a partir de materiales comunes y bastante disponibles (fibra de vidrio, tuberías plásticas y maderas). Los pueden construir los carpinteros, plomeros o bien excavadoras.

14 REVAH, Sergio; MORGAN SAGASTUME, Juan Manuel. *Methods of Odor and VOC Control*. Shareefdeen, Zarook y Singh, Ajay. *Biotechnology for Odor and AirPollution Control*. Heidelberg, Germany: Springer. 2005. p. 29-63.

15 CÁRDENAS GONZÁLEZ, B; REVAH MOISEEV, S; HERNÁNDEZ JIMÉNEZ, S; MARTÍNEZ SÁNCHEZ, A; GUTIÉRREZ AVEDOY, V. *Tratamiento biológico de compuestos orgánicos volátiles de fuentes fijas*. 2003. INE-SEMARNAT.

16 FERNÁNDEZ, Sergio. *Evaluación de los costes de construcción y operación de un biofiltro*. Universitat Autònoma de Barcelona. 2007.

- En función del grado de pre-tratamiento necesario para las emisiones los costos operativos serán mayoritariamente pequeños. Dichos costes se basan en costes de electricidad para el funcionamiento de la bomba humidificadora y el soplador, la aportación de pequeñas cantidades de macronutrientes y la mano de obra para supervisar el proceso.

Por otro lado, Jiménez y Villegas¹⁷, Mencionan que 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.

La principal problemática de METROAGUA S.A. E.S.P., es la ubicación de sus estaciones, debido a que estas se encuentran en su mayoría, cerca de sectores residenciales y la generación de olores en estas estaciones superan los valores máximos permisibles establecidos por la Resolución 1541/2013 del MADS. Para esto METROAGUA S.A. E.S.P., debe implementar un sistema de tratamiento, ya sea de tipo fisicoquímico o biológico, el cual le ayude a disminuir los niveles de olores ofensivos generados en sus estaciones.

17 JIMENEZ, Esteban y VILLEGAS, Ana María. Diseño de un Sistema de Biofiltración para la Remoción de Estireno. Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia, Vol.3 2005. p. 9-20.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Según el Decreto 948 de 1995¹⁸, la contaminación atmosférica, es el fenómeno de acumulación o de concentración de contaminantes en el aire. Estos contaminantes pueden ser de origen natural o antrópico, causando la alteración de la calidad del aire.

La calidad del aire es alterada por la presencia de sustancias tóxicas como son los compuestos orgánicos volátiles (COVs), hidrocarburos, óxidos de nitrógeno y compuestos azufrados, además de las partículas suspendidas derivadas del polvo y otros residuos sólidos¹⁹.

Los contaminantes en las grandes ciudades son de ambos tipos, entre otros, el monóxido de carbono (CO) que proviene de las combustiones incompletas, las partículas suspendidas menores a 10 micras (PM10), que pueden ser emitidas por fuentes industriales o formarse en el aire a partir de gases, los compuestos orgánicos volátiles (COVs), los óxidos de nitrógeno (NOx), que son el resultado de la quema de combustibles fósiles, y el ozono, que se forma de reacciones fotoquímicas entre COVs y NOx²⁰.

En la resolución 1541 de 2013, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, establece las principales actividades susceptibles a generar compuestos causantes de olores ofensivos, estas actividades se relacionan en la Tabla 1.

18 COLOMBIA, Presidencia de la Republica. Decreto 948 de 1995.

19 ESCOBAR GUERRERO, Víctor; ARELLANO GARCÍA, Luis Alberto; MENDOZA VARGAS, Edgar Eduardo; GUERRERO, Jesús Zamudio. Eliminación de Olores de una Corriente Gaseosa, Usando un Biofiltro de Lecho Esgurrado. Universidad Autónoma Metropolitana de México. 2006.

20 LOPEZ BARON, Roberto; PEREZ TEJADA ROJAS, Norma; REYES CRUZ, Maribel. Desarrollo de un Sistema de Biofiltración-Adsorción en Carbón Activado (BACA), para Eliminación de Vapores de Gasolina en estaciones de Servicio. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa. 2002.

Tabla 1. Actividades Generadoras de olores ofensivos²¹.

ACTIVIDAD	COMPUESTO
Procesamiento y conservación de carne, pesado, crustáceos y moluscos.	Azufre Total Reducido (TRS)
Fabricación de productos de la refinación de petróleo.	Sulfuro de Hidrogeno (H ₂ S) Amoniac (NH ₃)
Fabricación de pulpas (pastas) celulósicas; papel y cartón.	Azufre Total Reducido (TRS)
Curtido y recurtido de cueros; recurtido y teñido de pieles.	Sulfuro de Hidrogeno (H ₂ S) Amoniac (NH ₃)
Tratamiento y disposición de desechos no peligrosos y estaciones de transferencia.	Sulfuro de Hidrogeno (H ₂ S) Amoniac (NH ₃)
Planta de tratamiento de aguas residuales.	Sulfuro de Hidrogeno (H ₂ S)
Actividades que captan agua de cuerpos de agua receptores de vertimientos.	Sulfuro de Hidrogeno (H ₂ S)
Tratamiento térmico de subproductos animales.	Sulfuro de Hidrogeno (H ₂ S) Amoniac (NH ₃)
Unidad de producción pecuaria	Sulfuro de Hidrogeno (H ₂ S) Amoniac (NH ₃)
Otras Actividades	Sulfuro de Hidrogeno (H ₂ S) Amoniac (NH ₃)

Fuente: Resolución 1541 de 2013, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

3.2. LEGISLACIÓN

En Colombia la legislación ambiental nace con la Ley 23 de 1973, en la cual se faculta a la presidencia de la república para expedir el Código Nacional de los Recursos Naturales y de Protección al Medio Ambiente. A partir de aquí y mediante el Decreto 02 de 1982, se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979 y el Decreto – Ley 2811 de 1972 en cuanto al tema de Emisiones Atmosféricas. Finalizando en el año 2013, se aprueba la Resolución 1541 que establece los niveles permisibles de calidad del aire o de inmisión, junto con el procedimiento para la evaluación de las actividades que generan olores ofensivos.

²¹ COLOMBIA. Op. Cit. p.16.

3.3. GENERACIÓN DE OLORES OFENSIVOS

En el decreto 0948 de 1995²², se define olor ofensivo, como “el generado por sustancias o actividades industriales, que produce fastidio, aunque no cause daño a la salud humana”.

Existen diversos tipos de residuos industriales susceptibles de generar olores ofensivos debido a su composición, dentro de estos compuestos encontramos el Etil mercaptano (C_2H_5SH), Etil acrilato ($C_5H_8O_2$), Estireno (C_8H_8), Monometil amina (CH_5N), Metil mercaptano (CH_3SH), Nitrobenceno ($C_6H_5NO_2$), Propil mercaptano (C_3H_8S), Butil mercaptano ($C_4H_{10}S$), Sulfuro de dimetilo (C_2H_6S) y el Sulfuro de hidrógeno (H_2S).

En la actualidad algunas industrias están enfrentando diversos problemas debido a sus emisiones gaseosas, no sólo por el peligro que representa la toxicidad, sino debido a la emisión de malos olores generados por compuestos azufrados²³. Una de estas especies contaminantes es el sulfuro de hidrógeno o ácido sulfhídrico (H_2S), cuyo umbral de percepción es muy pequeño (0.02 - 0.13 ppmv)²⁴. Las principales actividades industriales que emiten éste compuesto son las plantas de tratamiento de aguas residuales, plantas desulfuradoras de combustibles, así como las industrias del papel y fibras sintéticas como el rayón.

Los malos olores producidos por instalaciones industriales como las petroquímicas, las productoras de papel y celulosa, plantas desulfuradoras y tratadoras de aguas, rellenos sanitarios y solventes volatilizados provenientes de talleres y comercios, constituyen una forma de contaminación atmosférica. Aunque los efectos de casi todos los compuestos sobre la salud humana sean nulos, el desagradable olor que poseen interviene en el desarrollo de la vida cotidiana de

22 COLOMBIA. Op. Cit. p.19.

23 CARDENAS *et al.*, Op. Cit. p.17.

24 MORGAN *et al.*, Op. Cit. p.14.

las personas que se encuentran cerca de la fuente de emisión. En individuos muy sensibles, pueden causar fatiga del sentido olfativo, lo que ocasiona pérdida temporal de la capacidad para detectar los compuestos causantes del mal olor²⁵.

3.4. LA BIOFILTRACIÓN

Camargo²⁶, Comenta que la biofiltración es un sistema en el cual una corriente de gas residual es pasada a través de un medio biológicamente activo bajo condiciones aeróbicas, siendo los mecanismos a los que se ven sometidos los compuestos durante la biofiltración los que se enumeran a continuación:

- 1) Transferencia de contaminantes de la fase gaseosa a la fase líquida o al medio de soporte de acuerdo con las leyes físicas. La concentración en el agua será proporcional a la de este contaminante en el aire, siendo la constante de proporcionalidad, la de Henry. En general, los biofiltros alcanzan altas ratas de remoción para compuestos que son solubles en agua y biodegradables.

- 2) Bioconversión de contaminantes a biomasa, productos finales metabólicos, o dióxido de carbono y agua. El contaminante es biodegradado en la biopelícula, en el que diferentes microorganismos crecen en la superficie del medio sólido.

Resultado de la experiencia aportada por los estudios realizados, permite afirmar que la remoción de olores ofensivos de contaminantes mediante biofiltración es más eficiente en sustancias de bajo peso molecular y compuestos orgánicos altamente solubles con estructuras de enlace simple.

25 ESCOBAR *et al.*, Op. Cit. p.19.

26 CAMARGO CAICEDO, Yiniva. Sistemas de Biofiltración: Alternativa Biológica en el Control de Olores Ofensivos. Biofiltración: Tecnología Aplicada a Contaminantes Líquidos y Gaseosos. 1 ed. GIMSA (2011). p. 19-36.

La biofiltración se define como todo proceso biológico utilizado para el control o tratamiento de compuestos volátiles orgánicos e inorgánicos presentes en la fase gaseosa y es la tecnología de tratamiento biológico de gas más utilizada. Los microorganismos son los responsables de la degradación biológica de los contaminantes volátiles contenidos en corrientes de aire residual²⁷.

Esta técnica se caracteriza por el uso de un soporte orgánico (aserrín, turba, composta, etc.) que provee los nutrientes necesarios para el crecimiento de los microorganismos, transformando el soporte orgánico en un filtro biológicamente activo. Al pasar el aire contaminado a través del lecho, los microorganismos presentes en la superficie del soporte, degradan los contaminantes²⁸. El material filtrante debe tener una buena capacidad de retención de agua, ya que los microorganismos requieren de una importante cantidad de esta para su crecimiento.

Los compuestos volátiles responsables de los malos olores en drenajes y plantas de tratamiento son resultado de la descomposición microbiológica de la materia orgánica contenida en el agua residual. Muchos de los compuestos responsables de los malos olores son perceptibles a muy bajas concentraciones, del orden de partes por billón.

La emisión de compuestos orgánicos volátiles (COVs) y compuestos inorgánicos de sustancias como el amoníaco (NH_3), sulfuro de hidrógeno (H_2S), mercaptanos de bajo peso molecular (R-SH) como metil mercaptano (CH_3SH), sulfuro de dimetilo ($(\text{CH}_3)_2\text{S}$), disulfuro de dimetilo ($(\text{CH}_3)_2\text{S}_2$), disulfuro de trimetilo ($(\text{CH}_3)_3\text{S}_2$), sulfuro de carbonilo (COS), disulfuro de carbono (CS_2), y tiofenos ($\text{C}_4\text{H}_4\text{S}$) en grandes cantidades, pueden llegar a causar molestias por la generación

27 THALASSO, F. y PINEDA, R. Biofiltración: tratamiento biológico de aire contaminado. Avance y Perspectiva. Vol 21. 2002. P. 325 – 327.

28 THALASSO, F. y PINEDA, R. Ibid.

de olores ofensivos en el ambiente, creando la necesidad del diseño de sistemas de control que garanticen un aire respirable²⁹.

La biofiltración ha sido aplicada con éxito en el tratamiento de olores ofensivos en plantas de tratamiento de aguas residuales así como en plantas de compostaje. También han sido igualmente exitoso en el tratamiento de compuestos como amoníaco, monóxido de carbono, acetona, benceno, butanol, acetato de butilo, acetato de propilenglicol monometil éter, dietilamina, disulfuro de dimetilo, etanol, hexano, etilbenceno, butilaldehido, metanol, metiletilcetona, estireno, isopropanol, metano, metilmercaptano, mono-di-triclorometano, oxido de nitrógeno, dióxidos de nitrógeno, pentano, sulfuro de dimetilo tiofenos, tolueno, tricloroetano, tetracloroetano, 2-etil-hexanol y xileno^{30 31 32 33}.

El sistema de tratamiento biológico más utilizado corresponde a la biofiltración ofreciendo como ventajas sobre otras tecnologías, el diseño simple y flexible con bajos costos de operación, el bajo costo del material del medio filtrante, los bajos consumos de agua, además de poseer una alta eficacia en la remoción de distintos contaminantes, en particular del sulfuro de hidrógeno y a la no generación de desechos como lodos, agua contaminada y emisiones de gases invernadero, resultando una excelente selección para sustancias con baja concentración de contaminantes, debido a su bajo costo energético en comparación con tecnologías competitivas como la incineración que involucra adición de combustibles³⁴.

29 CAMARGO. Op. Cit. p.22.

30 SHAREEFDEEN, Z; HERNER, B; WEBB, D; WILSON, S. Biofiltration eliminates nuisance chemical odors from industrial air streams. *Journal and Microbiol Biotechnol.* Vol. 30. 2003. p. 168–174.

31 McFARLAND, Michael; SWOPE, Tracey; PALMER Glenn. Reduction of hazardous air pollutant emissions using biofiltration. *Management of Environmental Quality.* Vol. 14 (5). 2003. p. 590-603.

32 DUMONT, E; ANDRÉS, Y; LE CLOIREC, P; GAUDIN, F. Evaluation of a new packing material for H₂S removed by biofiltration. *En: Biochemical Engineering Journal.* (2008). Vol. 42, p. 120–127.

33 Rattanapan *et al.*, Op. Cit. p.14.

34 CAMARGO. *ibid.* p.22.

La remoción de olores en biofiltros ha sido ampliamente estudiada³⁵; sin embargo, se conoce poco sobre el tratamiento biológico de COVs y compuesto como el Sulfuro de Hidrogeno. En un proyecto liderado por Water Environment Research Foundation, Cox *et al.*³⁶, utilizaron un biofiltro a escala piloto para estudiar la remoción de Sulfuro de Hidrogeno en la planta de tratamiento de aguas residuales Hyperion en Los Ángeles durante un periodo de seis meses, con el propósito de evaluar los biofiltros para la reducción de olores y emisiones de COV, demostrando una eficiencia de remoción del 98% de Sulfuro de Hidrogeno en concentraciones de entrada entre 10 y 50 ppm_v. La puesta en operación del sistema fue rápida y la remoción completa fue observada a los 20 días; siendo las concentraciones de salida por debajo de 0.05 ppm_v.

Según SEKULOV *et al.*³⁷, la biofiltración es una de las tecnologías más usadas en el mundo, dado que solo en Europa se ha experimentado el tratamiento de efluentes en más de 500 plantas de tratamiento, obteniendo eficiencias de remoción superiores al 90%

Un adecuado manejo de olores requiere de mediciones apropiadas que permitan la evaluación e identificación de las fuentes que originan los olores, su composición, magnitud y el impacto que causan a las comunidades vecinas^{38 39 40}.

35 IRANPOUR, R. Biological treatment of odor and VOCs in biofilters and biotrickling filters: literature survey of field experiences. Proc. Annual Meeting and Exhibition of the Air and Waste Management Association. AWMA, Pittsburgh, PA. Orlando, Florida. 2001. Paper 726. June 24-28.

36 COX, H., DESHUSSES, M., CONVERSE, B., SCHROEDER, E., VOSOOGHI, D., Patel, D., Moghaddem, O., Iranpour, R. Single-Stage H₂S and VOC Removal in Biotrickling Filters and Biofilters: A Comparative Study at the Hyperion Treatment Plant. 2001. Paper No. 335.

37 SEKULOV, Ivan., RUDIGER, Andreas., BARZ, Matthias. Biofiltración innovadora para el tratamiento de aguas residuales producidas por comunidades e industrias. En: Biofiltración innovadora para el tratamiento de aguas residuales. TerraViva Tec S.L. 2009. P. 1-14.

38 GOSTELOW, P; LONGHURST, P; PARSONS, S; STUETZ, R. Can you sample odours: What, where and how? Presentado en CIWEM. 2001.

39 WHITTERSPOON, J.R; SIDU, A; CASTLEBERRY, J; COLEMAN, L; REYNOLDS, K. Odour emission estimates using models and sampling odour dispersion modelling and control strategies for East Bay Municipal district's collection sewerage system and wastewater treatment Works. Water Science and Technology, Vol. 41. 2000. p. 65-71.

40 MANNING, K.; JEAUVONS, J. Odour control and planning arena. Water Science and Technology, Vol. 41. 2000. p. 1-8.

Existe una amplia gama de opciones que permiten monitorear olores que incluyen alternativas tales como, analizadores con láminas de oro (ej. Jerome 631-X), tubos de detección (ej. Tubos Drager), olfatometría, sensores electroquímicos, nariz electrónica, cromatografía de gases, etc⁴¹.

Las unidades de control biológico más comúnmente utilizadas se basan en tecnologías conocidas como biofiltros y biolavadores. Dichos sistemas se caracterizan por la utilización de microorganismos, siendo de este modo alternativas naturales y ambientalmente amigables⁴².

En los biofiltros el aire contaminado pasa a través de un suelo húmedo o lecho de empaque que contiene los microorganismos. Estos crecen en la superficie y las grietas del soporte, formando una biopelícula. La actividad de la biopelícula es determinada por su densidad microbiana y las condiciones ambientales, como la temperatura, disponibilidad de nutrientes, pH y humedad. La humedad de la biopelícula es uno de los pasos críticos para mantener una correcta ejecución, debido a que la actividad biológica depende en gran medida la actividad de agua.

El calor generado por la reacción biológica y la humedad del aire entrante determina la tasa de pérdida de agua y los requisitos para la restauración del agua⁴³. El aumento de las tasas de secado se alcanza con aire seco y la capacidad de eliminación es alta. Para mantener el rendimiento, el aire es por lo general pre-humedecido, y los biofiltros se rocían con agua intermitentemente. Para reducir los costos de ventilación, por lo general tienen una alta fracción de huecos para limitar la caída de presión. Los soportes pueden ser

41 NELSON, P. y LÓPEZ, A. Control de olores en Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas. XV Congreso de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. AIDIS-Chile. 2003.

42 O'MALLEY, D. Best Available Technique for Odour Control. Presentado en Conferencia Nacional CIWEM, Hertfordshire. 2002.

43 MORALES, Marcia; HERNÁNDEZ, Sergio; CORNABE, Thomas; REVAH, Sergio y AURIA, Richard. Effect of Drying on Biofilter Performance: Modeling and Experimental Approach. Environmental Science & Technology. Vol. 37, No. 5. 2003. pp. 985-992.

tanto naturales bioactivos o inertes. Ramirez⁴⁴, estableció que algunos compuestos naturales pueden ser usados en los proceso de biofiltración (turba seca, roca volcánica, alginato de calcio, compost, entre otros).

Los apoyos naturales pueden degradarse con el tiempo y perder la estructura y capacidad de retención de agua, induciendo la canalización y la pérdida de rendimiento⁴⁵. En algunos casos, remezclar el apoyo con materiales frescos y nutrientes, permite recuperar la actividad⁴⁶, pero al final tendrá que ser reemplazado. Con el mantenimiento adecuado, el apoyo puede ser utilizado durante varios años.

3.6. CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL BIOFILTRO

3.6.1. Material de Soporte

En los biofiltros el soporte más utilizado es el compost y la turba, aunque algunos autores añaden otros materiales como bagazo de caña y/o astillas de madera para intentar evitar los fenómenos de compactación del lecho^{47 48}. El carbón activo como soporte ha demostrado tener un buen comportamiento, realizándose en los últimos años muchos estudios^{49 50 51}; el uso de este tipo de soporte permite la

44 RAMIREZ MUÑOZ, Martin., Viabilidad de un proceso para la eliminación conjunta de H₂S y NH₃ contenido en efluentes gaseosos. Universidad de Cadiz. 2007.

45 MORGAN SAGASTUME, JM; NOYOLA, A; REVAH, S. Changes in physical properties of a compost biofilter treating hydrogen sulfide. J Air Waste Manag Assoc. 2003 pp.1011-21.

46 AURIA, R; FRÈRE, G; ACUÑA, M; REVAH, S. Influence of mixing and wáter addition on the removal rate of toluene vapors in biofilter. Biotechnology Bioingeneriy. 2000. Pp. 448-455.

47 LI, H; MIHELICIC, J; CRITTENDEN, J; ANDERSON, K. Field measurements and modeling of two-stage biofilter that treats odorous sulfur air emissions. J Environmental. 2003. p.129.

48 JONES, K; MARTINEZ, A; MAROO, K. Kinetic evaluation of H₂S and NH₃ biofiltration for two media used for wastewater lift station emissions. J Air & Waste Manage. 2004. pp.24-35.

49 DUAN, Huiqi; KOE, Lawrence; YAN, Rong; CHEN. Treatment of H₂S using a horizontal biotrickling filter based on biological activated carbon: reactor setup and performance evaluation. Microbiol. Biotechnol. 2005. p.143-149

50 DUAN, Huiqi; KOE, Lawrence; YAN, Rong; CHEN, Xiaoge. Biological treatment of H₂S using pellet activated carbon as a carrier of microorganisms in a biofilter. WATER RESEARCH, Vol. 40. 2006. p.2629 – 2636.

51 Duan, H., Yan, R., Koe, L.C.C., Wang, X., Combined effect of adsorption and biodegradation of biological activated carbon on H₂S biotrickling filtration. Chemosphere. 2007. p.1684-1691.

combinación de la eliminación por absorción física y por degradación biológica, de forma que se pueden conseguir buenos resultados en aquellos efluentes en los que se presenten picos de concentración, ya que se elimina por absorción física siendo luego degradado por el microorganismo.

3.6.2. Humedad

Un biofiltro, generalmente usa materiales orgánicos húmedos para absorber y degradar compuestos olorosos. El material, fresco y humedecido, procesa el aire que se inyecta al lecho filtrante. Estos materiales son mantenidos a humedad adecuada para que tenga lugar el desarrollo microbiano (>70%)⁵².

3.6.3. Microorganismos

Existen bacterias procariotas azufre oxidantes tanto en condiciones alcalinas, neutras como ácidas. Las bacterias aerobias azufre oxidantes pertenecen a géneros como *Acidianus*, *Acidithiobacillus*, *Aquaspirillum*, *Aquifex*, *Bacillus*, *Beggiota*, *Methylobacterium*, *Paracoccus*, *Pseudomonas*, *Starkeya*, *Sulfolobus*, *Thermithiobacillus*, *Thiobacillus* y *Xanthobacter*, muchas de ellas termófilas. Las bacterias anaerobias azufre oxidantes son comúnmente neutrófilas y mesófilas, de géneros como *Allochromatium*, *Chlorobium*, *Rhodobacter*, *Rhodopseudomonas*, *Rhodovulum* y *Thiocapsa*⁵³.

Estas bacterias en la mayoría de los casos, toman como fuente de energía y carbón, el compuesto a degradar, pero se debe tener en cuenta que un cambio drástico en las condiciones del sistema podrían eliminarlas del mismo, causando reducción en las eficiencias de remoción.

52 EMISON. www.emison.com. Tomado el 28 de enero de 2014.

53 FRIEDRICH, C; ROTHER, D; BARDISCHEWSKY, F; OUENTMEIER, A; FISCHER, J. Oxidation of Reduced Inorganic Sulfur Compounds by Bacteria: Emergence of a Common Mechanism?. *Applied and Environmental Microbiology*. 2001. p.2873-2882.

4. ESTADO DEL ARTE

Actualmente la biofiltración es una tecnología atractiva para el tratamiento y control de olores ofensivos generados en aguas residuales. Hoy, existen centros de investigación dedicados al estudio de estos sistemas, los cuales van desde el material utilizado como lecho de soporte, hasta los microorganismos utilizados para la eliminación de los compuestos causantes de éstos.

El uso de la biofiltración se remonta al año de 1923, cuando se propone su uso para remover el H₂S emitido en el tratamiento de aguas residuales. Desde los años cincuenta se han estado registrando patentes de éste tipo de tecnologías, inicialmente en Europa y más específicamente en Alemania donde en 1955 se realizó la primera instalación de éste tipo para tratar olores de baja concentración. En 1959, se instaló el primer biofiltro en Núremberg Alemania, constituido por un lecho de tierra, su función fue tratar los olores provenientes de una planta de tratamiento de agua. A partir de 1960 la investigación en éste campo se intensificó en Alemania Occidental y EUA. En los años setenta la biofiltración se empezó a usar extensamente en Alemania. A partir de los años ochenta la biofiltración se comienza a usar en países como Holanda y Alemania para tratar compuestos orgánicos volátiles (COVs) y otras sustancias tóxicas emitidas por instalaciones industriales. A partir de 1990 su uso se intensifica en Europa no así en el continente americano, donde el número de biofiltros no ha crecido de forma tan acelerada como en el viejo continente, sin embargo la frecuencia de su utilización sigue aumentando cada año⁵⁴.

En los últimos años, se han escrito y publicado una gran variedad de artículos y trabajos extensos que recopilan el trabajo de grupos de investigación a nivel mundial. Estos documentos contienen información extensa y variada sobre

⁵⁴ ESCOBAR *et al.*, Op. Cit. p.19.

biofiltración, algunos ejemplos, son artículos que contienen los parámetros que tienen una influencia directa sobre el desempeño de los biofiltros⁵⁵.

En la actualidad, algunas industrias están enfrentando diversos problemas debido a sus emisiones gaseosas, no sólo por el peligro que representa la toxicidad, sino debido a la emisión de malos olores generados por compuestos azufrados⁵⁶, dentro de estas industrias encontramos las pecuarias, curtiembres y plantas de beneficio animal o mataderos. Una de estas especies contaminantes es el sulfuro de hidrógeno o ácido sulfhídrico (H₂S), cuyo umbral de percepción es muy pequeño (0.02 - 0.13 ppmv)⁵⁷. Las principales actividades industriales que emiten éste compuesto son las plantas de tratamiento de aguas residuales, plantas desulfuradoras de combustibles, así como las industrias del papel y fibras sintéticas como el rayón.

Sin embargo, Duan *et al.*⁵⁸, usaron varias concentraciones de H₂S (hasta 125 µg/m³), para poder determinar el rendimiento óptimo en la columna. En una puesta en marcha rápida (de unos días) observaron que para la eliminación de H₂S en el biofiltro con una carga volumétrica de 1600m³·m⁻³·hora⁻¹ (a una concentración de 87ppmv de entrada de H₂S), la capacidad de eliminación de la tasa de alcoholemia (181 gH₂S·m³/h) logró una eficiencia de remoción (RE) del 94%. Pero con una concentración de entrada se mantuvo de 30 µg/m³, la eliminación de H₂S alta llegaba al 99%, con un tiempo de retención de gas (GRT) tan bajo como 2 s.

Por otro lado, Camargo⁵⁹ cita algunos estudios realizados en diversos escenarios a nivel mundial, en los cuales se han obtenido diferentes tasas de remoción, y en

55 VEIGA, Kennes. Parameters affecting performance and modeling of biofilters treating alkylbenzene-polluted air. *Appl Microbiol Biotechnol.* Vol. 55. 2001. 254-258.

56 CARDENAS. Op. Cit. p.17.

57 MORGAN *et al.* Op. Cit. p.14.

58 DUAN *et al.* Op. Cit. p.27.

59 CAMARGO. Op. Cit. p.22.

algunos casos muchas de ellas alcanzan una eficiencia de hasta el 99.99% (Tabla 2).

Tabla 2. Diversas Aplicaciones de la Biofiltración a escala global.

País	Sistema	Contaminante	Carga Máscica / Concentración	Medio de Soporte	Eficiencia	
España	Laboratorio	Sulfuro de hidrógeno	10-40 g/m ³ h	Residuos de Agricultura	90%	
USA	Laboratorio	Sulfuro de hidrógeno	10-50 mg/m ³	Compost	> 99%	
		Disulfuro de carbono	0.02-0.03 mg/m ³		32-36%	
		Dimetil Sulfuro	0.02-0.03 mg/m ³		0-21%	
	Laboratorio	Metil etil cetona	184 ppm	Compost	> 99,9%	
		184 ppm	95,70%			
Canadá	Matadero	Amonio	5.20 mg/m ³	Madera	99.9%	
		Metil Mercaptano	0.66 mg/m ³		70.7%	
		Sulfuro de hidrógeno	107 mg/m ³		96.6%	
		Etil amina	1.20 mg/m ³		99.9%	
		Dimetil Sulfuro	77.25 mg/m ³		99.9%	
	Laboratorio	Sulfuro de hidrógeno	40 ppm	Sintético (recubierto con núcleo mineral hidrofílico)	99.9%	
	Estación de Bombeo de Aguas Residuales	Sulfuro de hidrógeno	80 ppm	Sintético	99.9%	
	Industria tableros de circuito impreso (escala piloto)	Acetato de propilenglicol monometil eter	170 ppm	Madera y otros medio sintético inorgánico	99%	
	Chile	Laboratorio	Sulfuro de hidrógeno	355 ppm	Turba Magallanica	> 99.9 %
	Colombia	Piloto	Sulfuro de hidrógeno	---	Bagazo de Caña	> 99%
Corea	Piloto	Limoneno	364 g/m ³ h	Espuma de poliuretano reticulada	90%	
		α-pineno	321 g/m ³ h			
		Alcohol isobutílico	375 g/m ³ h			
Singapur	Laboratorio	Sulfuro de hidrógeno	30 ppm	Carbón Activado Biológico	> 99%	
Francia	Laboratorio	Sulfuro de hidrógeno	10 g/m ³ h	UP20 (contiene CH ₄ N ₂ O, H ₃ PO ₄ , CaCO ₃ y cubierta orgánica)	93%	
				Corteza de pino	69%	
				Pozzolan (Roca Volcánica)	74%	
Tailandia	Laboratorio	Sulfuro de hidrógeno	200-4000 ppm	carbón Activado granular	95%	

Sin embargo Rivera⁶⁰, desarrolló un sistema de biofiltración comercial para el tratamiento de efluentes gaseosos provenientes de Estaciones Depuradoras de

60 RIVERA GONZALEZ, Antonio Daniel. Diseño de un sistema de eliminación por Biofiltración de H₂S y NH₃ de efluentes gaseosos procedentes de una EDAR. Universidad de Cadiz. 2006.

Aguas Residuales (EDAR), en que aseguró obtener eficiencias de remoción hasta de 99% utilizando únicamente inoculo bacteriano y realizando lavado de gases con agua.

Jones *et al.*⁶¹, realizaron un estudio acerca de la inhibición del sulfato en un biofiltro, añadiendo sulfato al lecho filtrante en concentraciones de 40, 65 y 100 mgS g⁻¹ de soporte. Al añadir 100 mgS g⁻¹ de sulfato no encontraron disminución alguna en la eficiencia de remoción con pH en rangos comprendidos entre 6,8-8,5, sólo se dio el efecto inhibitorio del sulfato a pH bajos. La eficiencia disminuyó del 82,3% con un pH de 8 al 26% con un pH de 2. Estos autores comentan que el aporte de masa del sulfato de la fase líquida a la biopelícula no parece inhibir la eliminación de H₂S, debiéndose la disminución de la eficiencia a altas concentraciones de H₂S o a la precipitación de azufre; igualmente sugirieron que se podrían soportar mayores concentraciones de sulfato con una biopelícula más gruesa y robusta, desarrollada sobre un soporte con un tamaño de partícula mayor que evitase la acumulación de especies sulfuradas.

Por otro lado Datta *et al.*⁶², realizaron un estudio de eliminación de H₂S a altas temperaturas de 40, 50, 60 y 70°C, obteniendo eficiencias de remoción entre un 80-99%. Ramírez Muñoz⁶³, estudió el comportamiento de la eficiencia de remoción cuando el pH varia obteniendo eficiencias hasta de un 99% con un pH de 8,2 y de un 63% a un pH de 6,5 unidades.

Según Villen⁶⁴, Para que la biofiltración sea efectiva, los contaminantes de interés deben ser en cierto grado, biodegradables, no tóxicos y presentar cierta solubilidad. De forma general, el tratamiento biológico es efectivo y económico

61 JONES *et al.* Op. Cit. p.27.

62 DATTA, I; FULTHORPE, R; SHARMA, S; ALLEN, D. High-temperature biotrickling filtration of hydrogen sulphide. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2007. p.708-716.

63 RAMIREZ. Op. Cit. p26.

64 VILLÉN PÉREZ, Lorena. Diseño de un biofiltro. Universidad Politécnica de Cataluña. 2010.

para bajas concentraciones del contaminante, normalmente inferiores a 5×10^6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y un pH neutro.

El rango óptimo de humedad en el lecho del sistema, debe estar comprendido entre un 40 y 60%. Un bajo contenido de humedad en el lecho filtrante reduce el espesor de la biopelícula y disminuye la actividad microbiológica y, por consiguiente, la actividad del biofiltro. Por otro lado, un elevado contenido de humedad puede crear una saturación, provocando zonas anaerobias o incrementar la caída de presión⁶⁵.

La biofiltración de gases resulta una tecnología eficiente en el tratamiento de Sulfuro de Hidrogeno, como se demuestra en el trabajo realizado por Moreno *et al.*⁶⁶, donde se estudió el efecto del tipo de medio filtrante, utilizando composta bajo dos condiciones distintas en términos de adaptación para la remoción de Sulfuro de Hidrogeno: composta sin proceso de adaptación, y composta posterior a un proceso de adaptación. El sistema de biofiltración, al cabo de 14 días, presentó eficiencias de remoción inferiores al 30% a cargas de $750 \text{ gH}_2\text{S}/(\text{m}^3\text{h})$ y $2500 \text{ gH}_2\text{S}/(\text{m}^3\text{h})$; sin embargo, para cargas de $4 \text{ gH}_2\text{S}/(\text{m}^3\text{h})$ y $15 \text{ gH}_2\text{S}/(\text{m}^3\text{h})$, la composta adaptada presentó eficiencias superiores al 90% a partir del octavo día de operación, llegando al 100% para $4 \text{ gH}_2\text{S}/(\text{m}^3\text{h})$ y oscilando entre 95% y 99% para $15 \text{ gH}_2\text{S}/(\text{m}^3\text{h})$.

65 THALASSO, F. y PINEDA, R. Op. Cit. p.23.

66 MORENO, A; CRUZ, M; MORGAN, J; CABIROL, N; NOYOLA, A. Efecto de la carga y composición del medio filtrante en la eficiencia de remoción de H_2S en el arranque de Biofiltros con flujo descendente. XV Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. 2006.

5. OBJETIVOS

5.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la Biofiltración como tecnología aplicada a la remoción de Sulfuro de Hidrógeno en Aguas Residuales de origen doméstico.

5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

5.2.1. Determinar la concentración de Sulfuro de Hidrógeno en Biofiltros para la remoción de este compuesto generado en aguas residuales domésticas.

5.2.2. Establecer el comportamiento de las variables de proceso del Sistema de Biofiltración para la remoción de Sulfuro de Hidrógeno en aguas residuales domésticas.

5.2.3. Estimar la eficiencia de la Tecnología de Biofiltración aplicada a la remoción de Sulfuro de Hidrógeno en aguas residuales de origen doméstico.

6. METODOLOGIA

Para el estudio preliminar de los biofiltros, se tuvo en cuenta las características que este debía tener, debido a que ayudarían a establecer los parámetros para su montaje, desde el material utilizado como lecho filtrante, hasta los parámetros de medición y las variables analizadas.

Para escoger el material que sirvió como lecho filtrante se tuvo en cuenta los factores, para garantizar un proceso eficaz, como la cantidad de nutrientes disponibles en él, además del pH y el área superficial, el cual nos garantiza el crecimiento de microorganismos. Considerando las características que debía tener el material se seleccionó bagazo de caña de azúcar (Ver Tabla 3. Composición Física del Bagazo de Caña de Azúcar. Tabla 3 y Tabla 4) el cual fue llevado a un proceso de secado en un horno a 120°C por 24 horas y luego picado en trozos de 5 centímetros de largo.

Tabla 3. Composición Física del Bagazo de Caña de Azúcar⁶⁷.

COMPOSICIÓN FÍSICA	
Diámetro de la Partícula (cm)	1-2
pH	6.24
Contenido de Humedad (%)	48.3
Peso Húmedo (g)	180
Peso Seco (g)	121.3
Área Superficial (m ² /g)	4.146
Volumen Total de Poros (cm ³ /g)	0.0041
Diámetro Promedio de Poros (Å)	39.429
Volumen Máximo de Poros (cm ³ /g)	0.009
Diámetro Promedio de Poros (Å)	4887.11

⁶⁷ MATHUR *et al.* Op. Cit. p.13.

Tabla 4. Composición Química del Bagazo de Caña de Azúcar⁶⁸.

COMPOSICIÓN QUIMICA	
C	43.22
H	6.097
N	0.006
S	0.81
O*	43.95
Ash	5.91

$$O^* = 100 - (C + H + N + S) - \text{Ash.}$$

6.1. CONDICIONES CLIMÁTICAS DE LA CIUDAD DE SANTA MARTA

6.1.1. Climatología

Las condiciones climatológicas del área de estudio corresponden a las condiciones locales de la ciudad de Santa Marta; a continuación se presentaran el comportamiento de los parámetros de interés para este.

6.1.1.1. Temperatura

La temperatura es la medida atmosférica que indica la cantidad de energía calorífica acumulada en el aire presente en la atmosfera, esta variable influye en los metabólicos de los organismos, de manera que lo acelera. El Clima del Distrito de Santa Marta se caracteriza por tener temperaturas entre los 22 °C y los 34 °C con promedio de 28 °C; esta se encuentra entre los rangos típicos a las zonas templadas.

68 MATHUR *et al.* Op. Cit. p.13.

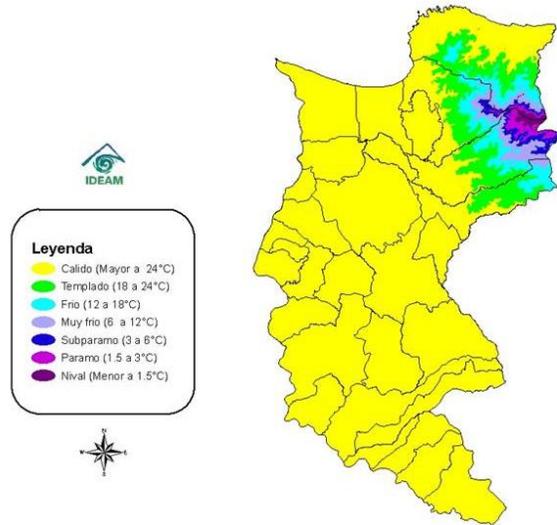


Figura 1. Variación espacial de la media anual de la Temperatura en el Magdalena⁶⁹

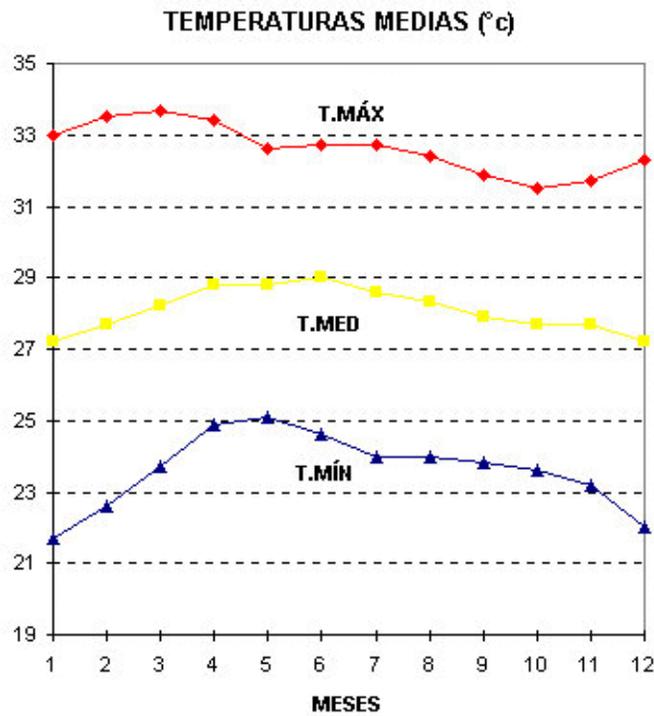


Figura 2. Variación Anual de la Temperatura en Santa Marta⁷⁰

69 COLOMBIA. Instituto de Hidrología, Meteorología y Media Ambiente (IDEAM). 2011.

70 COLOMBIA. Ibid.

6.1.1.2. Humedad

La humedad del aire indica la cantidad de vapor de agua presente en él. Depende, en parte, de la temperatura, ya que el aire caliente contiene más humedad que el frío. Esta variable influye en la concentración de sulfuro de hidrogeno presente en el aire.

La humedad relativa de la Ciudad de Santa Marta es bastante elevada y se registra en un rango que va desde el 70% hasta el 79% con un promedio de 75% (figura 3).

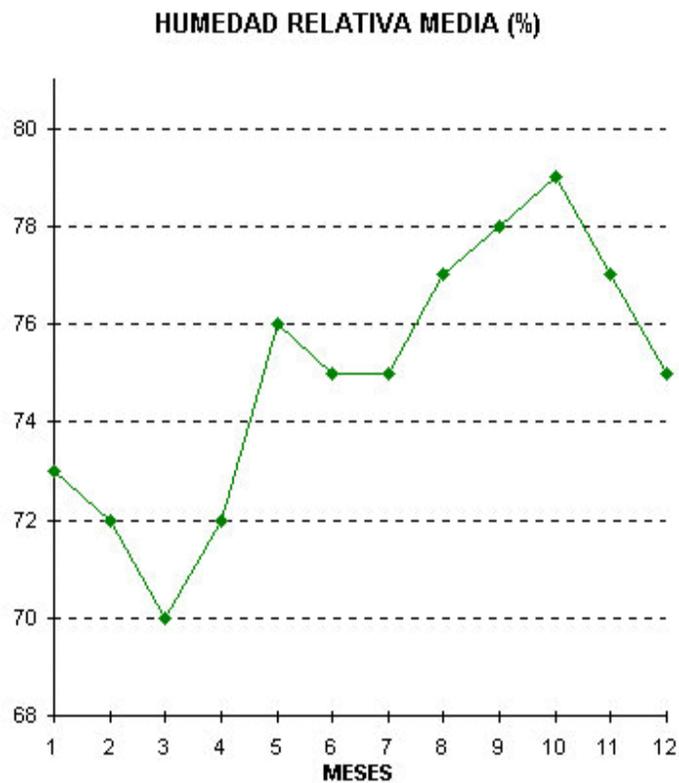


Figura 3. Variación Anual de la Temperatura en Santa Marta⁷¹

⁷¹ COLOMBIA. Op. Cit. p.37.

6.1.1.3. Velocidad y Dirección de Vientos

La velocidad y dirección de los vientos es una variable altamente influyente en los procesos de transporte y dispersión de contaminantes atmosféricos, ya que esta definirá en gran parte la trayectos y dilución de las concentraciones de los agentes contaminantes. Este influye en la dispersión de los olores en las comunidades aledañas ya que arrastre los gases generados en las estaciones de bombeo de aguas residuales. La velocidad promedio de Santa Marta es 3.0 m/s en dirección Norte.

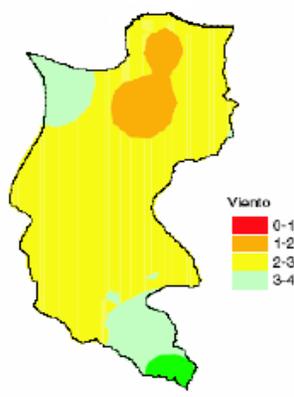


Figura 4. Promedio Anual de la Distribución espacial de la velocidad de los vientos en el Magdalena⁷²

6.1.1.4. Precipitación

La precipitación es una variable secundaria del presente estudio, esta permitirá en menor medida conocer las condiciones previas a la toma de las muestras; fundamentado en el hecho de que una mayor precipitación aumenta los niveles de agua lluvia que ingresan al sistema de alcantarillado, diluyendo las concentraciones del agua residual. La precipitación promedio del Distrito de Santa Marta es de 1500 a 2000 mm (Figura 5).

⁷² COLOMBIA. Op. Cit. p.37.

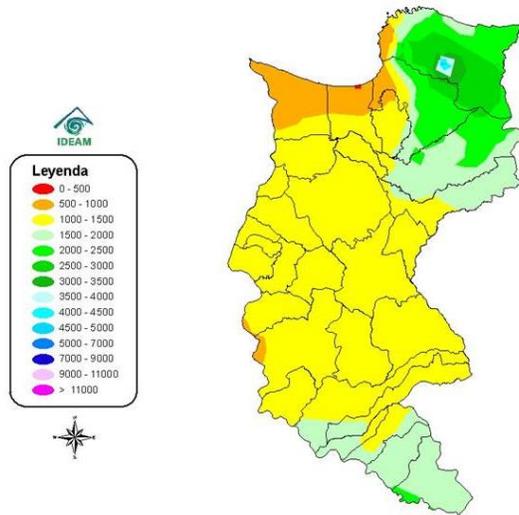


Figura 5. Distribución espacial de la velocidad de la precipitación en el Magdalena⁷³

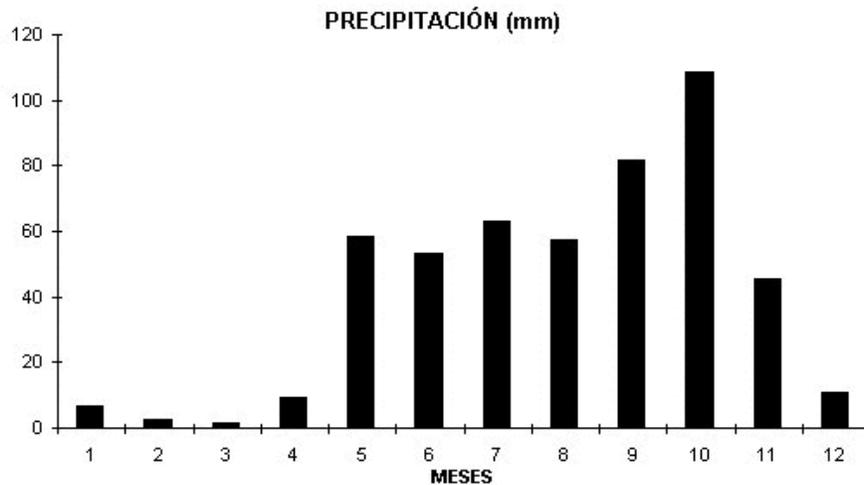


Figura 6. Variación Anual de la Precipitación en Santa Marta⁷⁴

6.2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ALCANTARILLADO DE LA CIUDAD DE SANTA MARTA

El sistema de redes de alcantarillado de la ciudad de Santa Marta, que en la actualidad tiene una cobertura del 72%, es de tipo separativo, es decir, el alcantarillado atiende únicamente a las aguas servidas. Las aguas pluviales circulan por las calles, box coulvert y canales; su operación y mantenimiento no

⁷³ COLOMBIA. Op. Cit. p.37.

⁷⁴ COLOMBIA. Op. Cit. p.37.

siendo competencia de METROAGUA S.A. E.S.P.. Debido a las condiciones topográficas de la ciudad, una gran parte de las aguas servidas son conducidas usando estaciones de bombeo hasta su disposición final⁷⁵.

El sistema está conformado por varios colectores principales (interceptores) a los cuales llegan otra serie de colectores secundarios que son los encargados del drenaje de las aguas residuales de grandes áreas, que incluyen los diferentes barrios de la ciudad.

La recolección se realiza de Oriente a Occidente, y el punto donde se reúnen todas las aguas residuales generadas en la ciudad es la Estación Norte. Desde este punto, las aguas residuales son bombeadas por medio de tres líneas de impulsión que descargan en el emisario submarino, para hacer la disposición final al mar.

6.2.1. Estaciones de Bombeo

Dentro de los componentes de un sistema de alcantarillado se encuentran las Estaciones de Bombeo de Aguas Residuales y su función principal es la de elevar el agua desde los puntos más bajos hasta los colectores ubicados en puntos altos, o hasta a los cuales el agua debe llegar para ser trasladada a los sitios de disposición final y que por razones de topografía no es posible hacer sin la ayuda de equipos de bombeo.

6.2.1.1. Estaciones de Bombeo Operadas por METROAGUA S.A. E.S.P.

Estación Norte: a esta estación llegan todas las aguas residuales provenientes del Sistema Sur (Rodadero, Gaira, Salguero) y Sistema de Santa Marta. Está constituida por un pozo húmedo y 4 equipos de bombeo que trabajan en paralelo,

75 METROAGUA. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de la Ciudad de Santa Marta. Disponible en la Url: www.metroagua.com.co. 2011.

dos con capacidad de 300l/s cada uno y dos más con capacidad de 600l/s cada uno, que impulsan el agua al mar a través del Emisario submarino.

Estación Rodadero: esta estación está ubicada en la Avenida Tamacá con calle 20. Está constituida por un pozo seco y 3 equipos de bombeo que trabajan en paralelo.

Estación Manzanares: esta estación está ubicada en la calle 30 con carrera 2. Está constituida por un pozo seco y 2 equipos de bombeo que trabajan en paralelo, con una capacidad de 200lps (Metroagua, 2011).

Adicionalmente, en la ciudad existen otras estaciones de bombeo pero mucho más pequeñas y de menor influencia en el funcionamiento del sistema, como son:

- ✓ Elevadora El Rodadero.
- ✓ Chimila, El Bosque.
- ✓ Cantilito, Timayui.
- ✓ San Pablo.

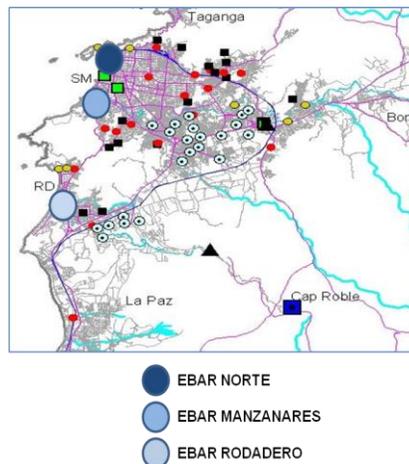


Figura 7. Ubicación de las Estaciones de Bombeo en la Ciudad de Santa Marta

6.3. LOCALIZACIÓN DE LOS BIOFILTROS

El montaje y desarrollo del proyecto se llevó a cabo en las instalaciones de la estación de bombeo de aguas residuales norte de METROAGUA S.A. E.S.P. (Figura 8), ubicada al Norte de la Ciudad de Santa Marta a $11^{\circ}14'59,42''$ N y $74^{\circ}12'45,79''$ O, donde predomina un Clima Seco Tropical con temperatura promedio de 28°C y oscilación extrema entre los 24°C y 37°C , a tan sólo 4 msnm, precipitación media anual de 362mm y con población aproximada de 447.857 habitantes para el año 2010, según el último censo del DANE, realizado en el año 2005. Esto fueron ubicados cerca a uno de los colectores de llegada de agua residual en los cuales se presenta mayor producción de sulfuro de hidrogeno.



Figura 8. Estación Norte



Figura 9. Ubicación de la EBAR Norte

6.4. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE LOS BIOFILTROS

Para el desarrollo del proyecto se utilizaron columnas de biofiltración. Para esto se tomaron columnas cilíndricas en material acrílico con dimensiones de 2 metros de altura con un diámetro interior de 8 pulgadas, en las cuales se insertó bagazo de caña picado hasta completar una altura de un metro en cada una, luego se sellaron con tapas del mismo material y diámetro, comprobando que no hubiesen fugas de aire en ellas, para esto se utilizó una solución espumosa de agua con jabón la cual fue untada en los acoples para determinar los posibles escapes, además de esto se instaló un sistema en la parte superior que a su vez estaba conectado a un tanque alimentador de agua residual con capacidad de 20 litros (Figura 11) el cual ayudó a mantener el lecho filtrante húmedo durante la operación del sistema, el flujo de agua fue controlado con un equipo de macro goteo el cual garantizó que la humidificación del lecho fuese intermitente, además de algunos acoples instalados en la parte superior e inferior que facilitaron la toma de muestras con el equipo analizador de gases, en la parte inferior de las columnas se añadió una tubería de media (1/2) pulgada con una válvula de cierre fácil, que sirvió como desagüe del agua residual utilizada para humedecer el lecho.

El principal problema de esta empresa es la ubicación de sus estaciones, debido a que estas se encuentran en su mayoría, cerca de sectores residenciales y la generación de olores en estas estaciones superan los niveles permisibles establecidos por la Resolución 1541/2013 del MAVDS. Para esto METROAGUA S.A. E.S.P., debe implementar un sistema de tratamiento, ya sea de tipo fisicoquímico o biológico, el cual le ayude a disminuir los niveles de olores ofensivos generados en sus estaciones.

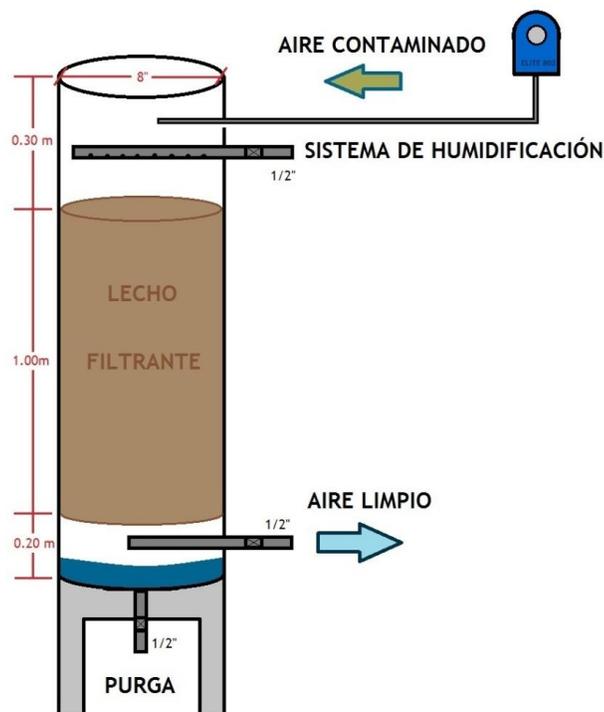


Figura 10. Diseño del Biofiltro



Figura 11. Tanque de Veinte (20) Litros Utilizado para Almacenar Agua Residual

Para el bombeo del aire contaminado con sulfuro de hidrogeno, se utilizaron unas bombas ELITE 802 (Figura 12), la cuales bombeaban un caudal de aire constante de 1,8 m³/h desde los pozos de aguas residuales hacia los biofiltros, ubicadas en cercanía de uno de los colectores de llegada de agua residual, para así garantizar una eficiente recolección de sulfuro de hidrogeno.



Figura 12. Bomba Elite 802.

6.5. TOMA DE MUESTRAS

La toma de muestras se realizó mediante un MONITOR MULTIGAS PORTÁTIL PROTÉGÉ™ (Figura 13), el cual posee cuatro sensores incluyendo uno para sulfuro de hidrógeno con un rango de medición entre 0 – 500 ppm y posee una sonda de 12 pulgadas de largo.



Figura 13. Monitor Multigases Portátil Protégé™

Estas se realizaron en las columnas acrílicas, teniendo en cuenta las concentraciones de Sulfuro de Hidrógeno en la entrada y salida del sistema.

6.6. CONDICIONES DE OPERACIÓN

Para unas óptimas condiciones de operación se debe tener en cuenta algunos parámetros relacionados con el funcionamiento del sistema, estos parámetros se relacionan en la Tabla 5.

Tabla 5. Condiciones de Operación del Biofiltro

Temperatura	Caudal	pH	Tiempo de Retención Hidráulico
30 ± 4 °C	1,83 m ³ /hora	1-3	30 segundos.

6.6.1. Características del Biofiltro

Se empacó el bagazo de caña en la columna acrílica, hasta completar un (1) metro de altura y una densidad aproximada de 0,0815 g/cm³, el lecho fue humedecido con agua residual, la cual fue tomada de los tanques de la estación, esto con el fin de mantener los nutrientes de los cuales los microorganismos están acostumbrados y así no modificar las características de sus hábitat original.

6.6.2. Parámetros de Operación

Los parámetros a tener en cuenta en un sistema de biofiltración son:

- ✓ La Capacidad de Remoción.
- ✓ La Eficiencia de Remoción.
- ✓ Carga de Contaminante.

Estos se definen como:

- ✓ **Capacidad de Remoción (CR):** es la masa de contaminante eliminado por volumen de lecho por unidad de tiempo ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$).

$$CR = \frac{\text{flujo de aire}}{\text{volumen de lecho}} (Cg \text{ entrada} - Cg \text{ salida})$$

Dónde: **Cg entrada**= Concentración del Gas en la entrada del sistema.

Cg salida= Concentración del Gas en la salida del sistema.

- ✓ **Eficiencia de Remoción (ER):** es una media porcentual a la entrada e indica el grado de conversión o remoción del compuesto contaminante, (%).

$$ER = \left(\frac{Cg \text{ entrada} - Cg \text{ salida}}{Cg \text{ entrada}} \right) \times 100$$

- ✓ **Carga:** es la masa de contaminante introducida por unidad de volumen de biofiltro a un tiempo determinado ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$).

$$Carga = \left(\frac{\text{flujo de aire}}{\text{volumen del lecho}} \right) \times Cg \text{ entrada}$$

7. DATOS

7.1. VARIABLES DE OPERACIÓN TOMADAS EN LAS HORAS DE MUESTREO

7.1.1. Temperatura, Humedad Relativa y pH

Los datos de Temperatura, Humedad Relativa y pH, fueron tomados al momento de medir las concentraciones de Sulfuro de Hidrogeno en los biofiltros, esto con el fin de comparar las eficiencias de remoción con las variables de operación.

La temperatura y humedad relativa, fueron medidas con un medidor climático KESTREL 4500 y el pH fue medido con un pH meter (Figura 14 y Figura 15).



Figura 14. Medidor Climático KESTREL 4500



Figura 15. pH METER

7.2. CONCENTRACIÓN PROMEDIO DIARIA DE SULFURO DE HIDROGENO PRODUCIDAS EN LA ESTACIÓN NORTE

Para determinar las horas de muestreo, se hizo necesario la medición horaria de los datos de concentración producidos en la estación norte, esta medición fue realizada durante dos (2) semanas, con el fin de determinar las concentraciones promedio por hora (Ver anexo 2).

En la Figura 16 se muestra el comportamiento horario de las concentraciones de Sulfuro de Hidrogeno en unidades de ppm producidos en esta estación.

PROMEDIO HORARIO DE PRODUCCION DE H₂S

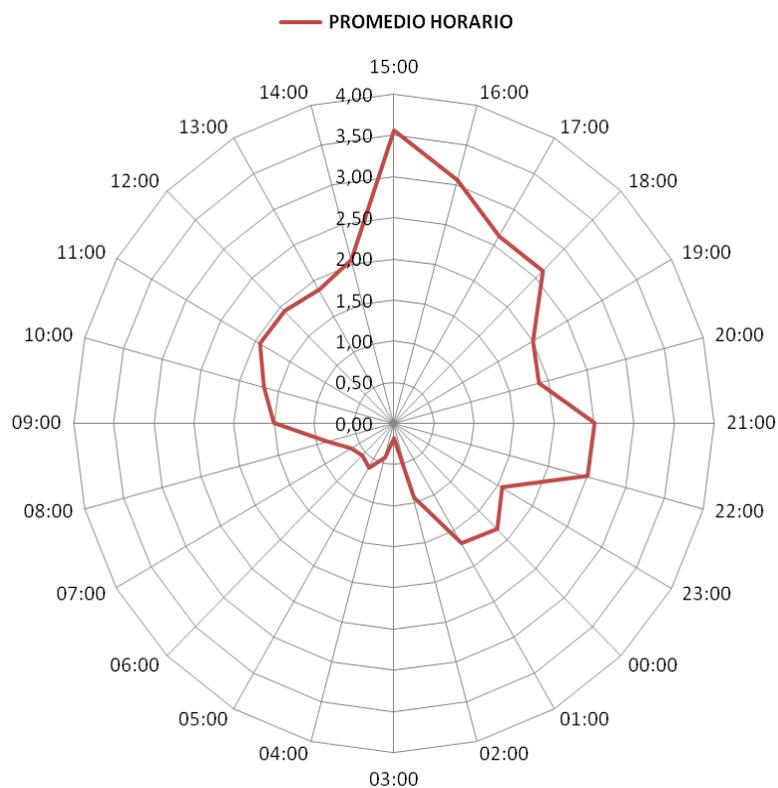


Figura 16. Comportamiento de las concentraciones de H₂S generados en la estación norte

8. RESULTADOS

8.1. REPRESENTACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES

Al realizar la toma de datos de concentraciones de sulfuro de hidrogeno con el equipo analizador de gases, el cual arroja los valores de concentración en unidades de partes por millón (ppm), y según el protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, el cual dice: *“En caso que las unidades de medición sean diferentes a $\mu\text{g}/\text{m}^3$ o mg/m^3 , y se presenten en ppm, es necesario realizar el proceso de conversión el cual se deduce a partir de la ecuación de estado del gas ideal”*.

$$P.V = n.R.T \rightarrow \frac{n}{V} = \frac{P}{R.T}$$

Donde:

P: Presión a condiciones estándar o de referencia (1 atm \approx 760 mm Hg \approx 101325 Pa \approx 101,325 KPa)

R: Constante de los gases ideales (8,314 m³.Pa/kmol.K \approx 0,082 l.atm/mol.K)

T: Temperatura a condiciones estándar o de referencia (25 °C \approx 298,15 K)

Luego reemplazando los valores de condiciones de referencia en la ecuación anterior tenemos:

$$\frac{n}{V} = \frac{P}{R.T}$$

$$\frac{1 \text{ mol } H_2S}{V} = \frac{1 \text{ atm}}{(0,082 \text{ l. atm. K}). (298K)} = \frac{1 \text{ mol}}{24,4483 \text{ l}}$$

Por lo anterior, para aquellos contaminantes que la normatividad colombiana vigente establezca sean reportados en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, es necesario realizar la respectiva conversión empleando el peso molecular de la sustancia involucrada, que para el caso del Sulfuro de Hidrogeno es de 34.0760 g/mol.

Para convertir las concentraciones de ppm a $\mu\text{g}/\text{m}^3$ se parte de la siguiente ecuación:

$$C \left[\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right] = \frac{C[\text{ppm}] \cdot PM[\text{Kg}/\text{Kmol}]}{24.45[\text{m}^3/\text{Kmol}]} 10^9 \left[\frac{\mu\text{g}}{\text{Kg}} \right]$$

Se debe tener en cuenta que todas las variables de calidad del aire utilizan microgramos por metro cubico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) como unidad de medida, exceptuando el monóxido de carbono que emplea miligramos por metro cubico (mg/m^3).

8.2. COMPARACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE SULFURO DE HIDROGENO PRODUCIDAS CON LOS VALORES DE LA NORMATIVA

Actualmente los valores de concentraciones de sulfuro de hidrogeno producidos en la estación norte superan el umbral de $7.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 17 y Figura 18), esto sugiere a METROAGUA S.A. E.S.P. tomar medidas de control y/o reducción de los niveles generados en sus estaciones los cuales causan molestias directas a los habitantes de los sectores aledaños a las estaciones, se debe tener en cuenta que los datos cuyas concentraciones son igual a cero, se dan debido a las fuertes precipitaciones presentadas al momento de la toma de muestras, lo cual altera la cantidad de gases presentes en el agua residual debido a la dilución de esta al mezclarse con el agua de lluvia.

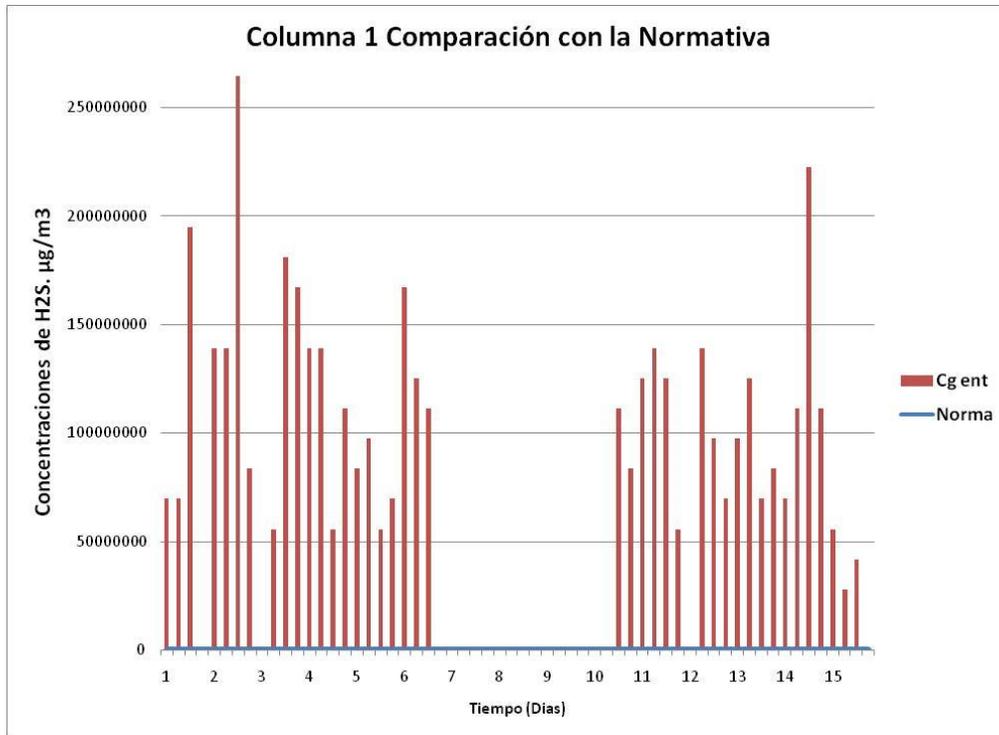


Figura 17. Comparación de valores de Concentración Promedio Diaria Entrante en el Biofiltro, entre los días 1 al 15 de operación

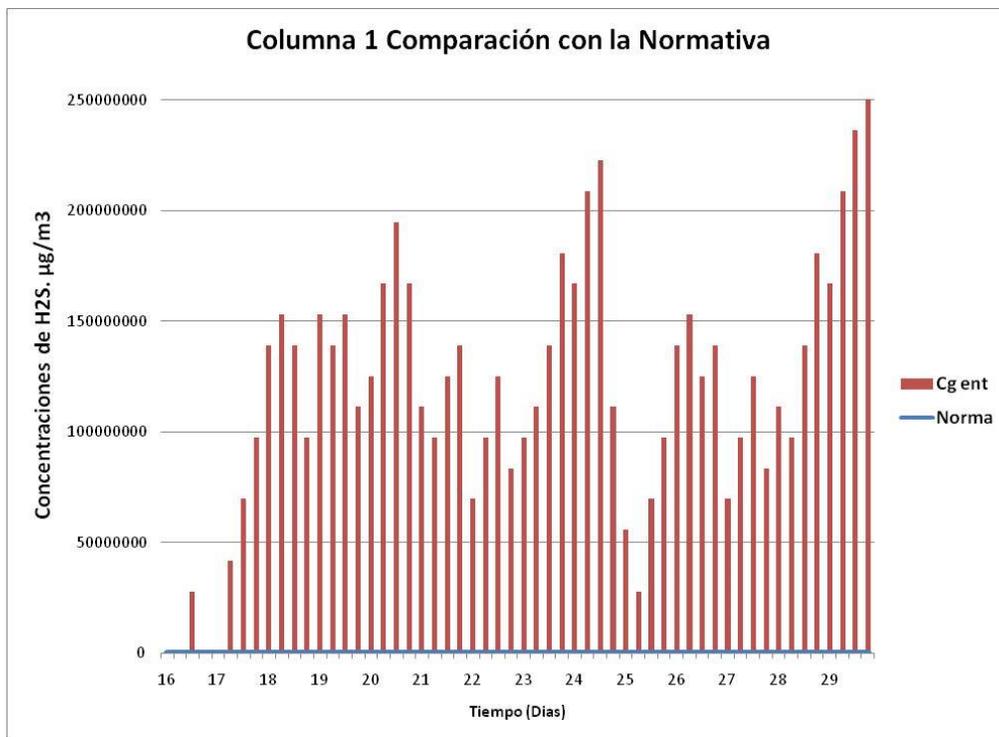


Figura 18. Comparación de valores de Concentración Promedio Diaria Entrante en el Biofiltro, entre los días 16 al 29 de operación

8.2. COMPARACIÓN DE LAS EFICIENCIAS DE REMOCIÓN EN CUANTO A LA TEMPERATURA

Se pudo determinar una tendencia de las eficiencias de remoción en cuanto a las variaciones en la temperatura, se puede observar que a temperaturas comprendidas entre 29 - 33°C se obtienen eficiencias desde un 56% hasta un 100% en algunos casos para los primeros quince (15) días (Figura 19), y para temperaturas entre los 28 – 33°C se obtienen eficiencias entre un 80 – 100% de remoción del sulfuro de hidrogeno (Figura 20).

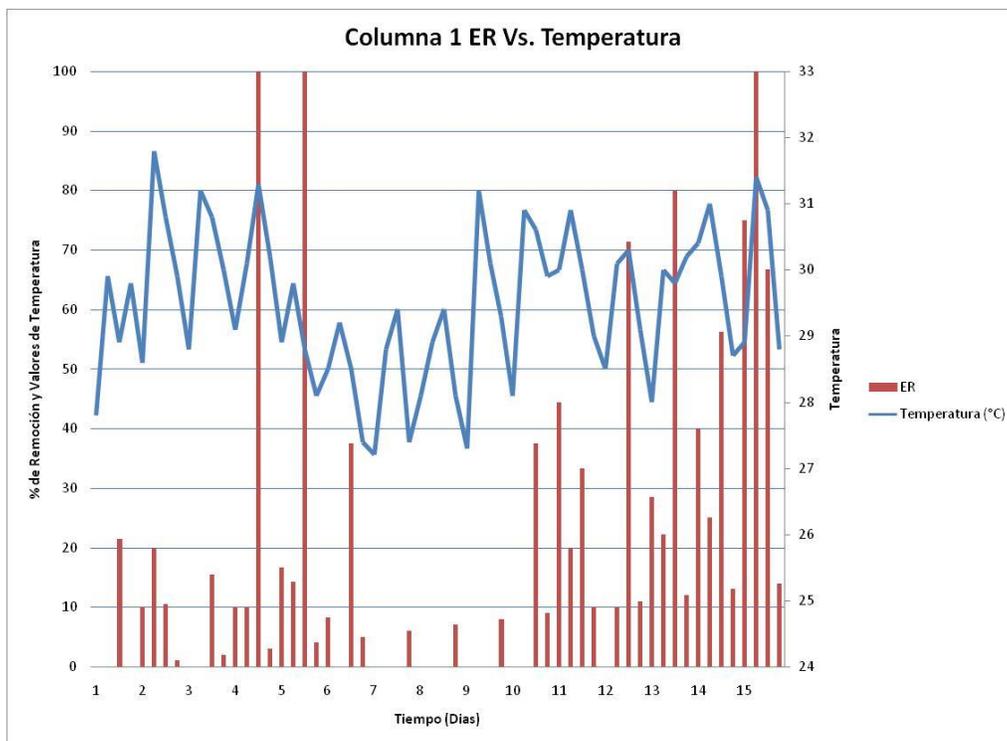


Figura 19. Gráfico de Eficiencia de Remoción Vs. Temperatura en el Biofiltro, entre los días 1 al 15 de operación

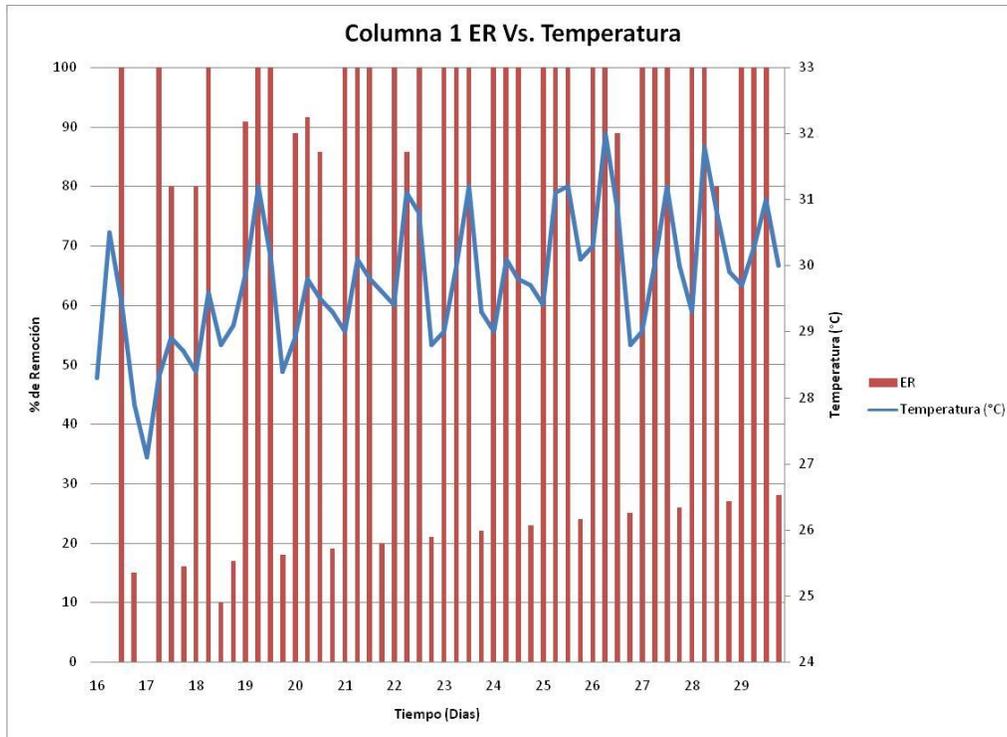


Figura 20. Gráfico de Eficiencia de Remoción Vs. Temperatura en el Biofiltro, entre los días 16 al 29 de operación

8.3. COMPARACIÓN DE LAS EFICIENCIAS DE REMOCIÓN EN CUANTO A LA HUMEDAD RELATIVA

En cuanto a los resultados obtenidos en la comparación de la eficiencia de remoción con la humedad relativa presente en el aire de la estación norte se puede apreciar claramente que existe una relación inversamente proporcional a sus valores, es decir, cuando se presentan bajos niveles de humedad en el ambiente, la eficiencia de remoción es mejor, dado a que para rangos de humedad comprendidos entre un 55 – 75% se presentan altas eficiencias las cuales pueden llegar a ser de hasta un 100%.

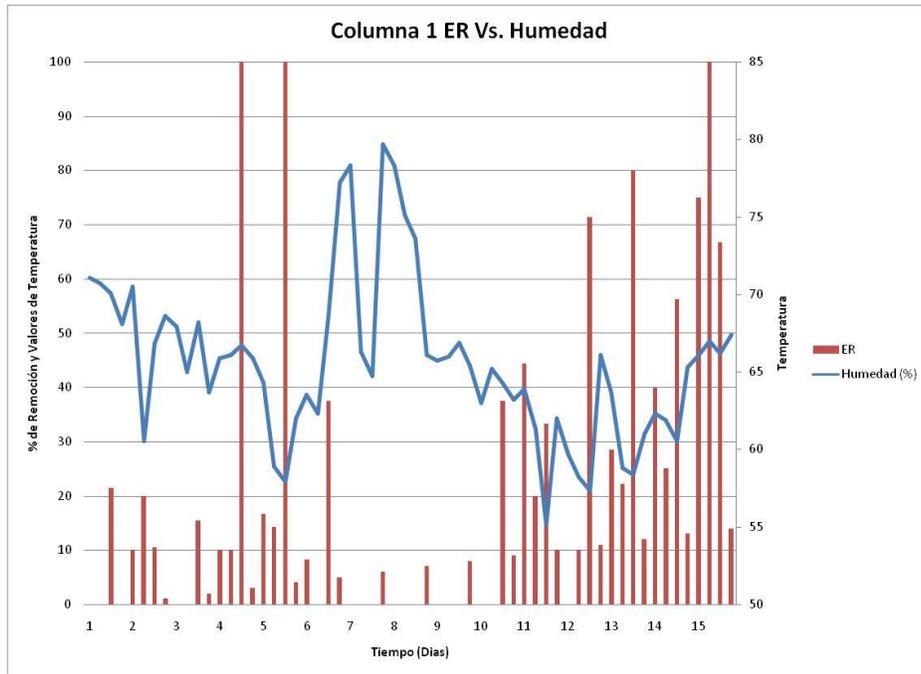


Figura 21. Gráfico de Eficiencia de Remoción Vs Humedad Relativa en el Biofiltro, entre los días 1 al 15 de operación

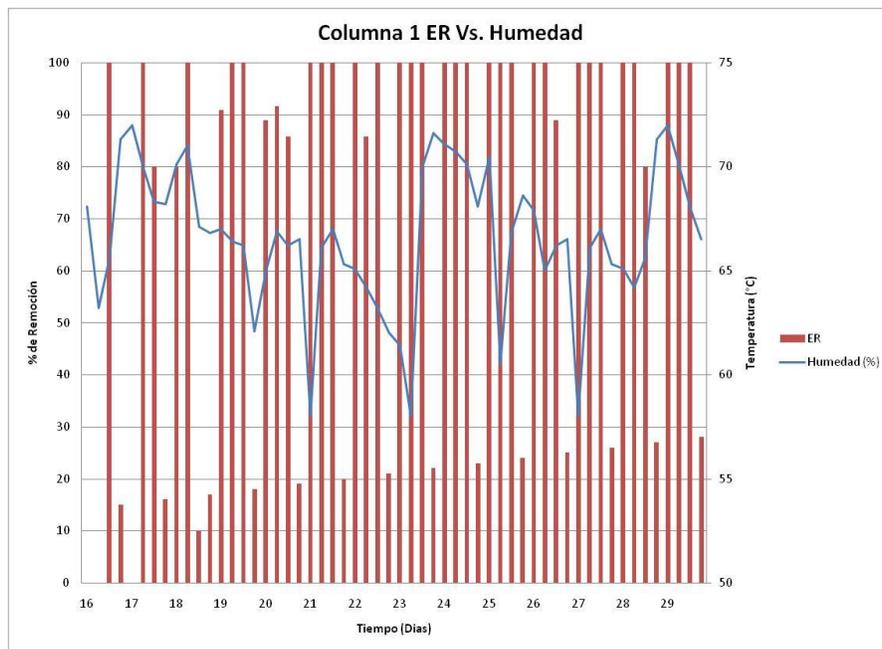


Figura 22. Gráfico de Eficiencia de Remoción Vs Humedad Relativa en el Biofiltro, entre los días 16 al 29 de operación

8.5. COMPARACIÓN DE LAS EFICIENCIAS DE REMOCIÓN EN CUANTO AL pH DEL MEDIO

Se puede observar que el pH ácido, tiene una gran influencia en el proceso de remoción del sulfuro de hidrogeno, pero se debe tener en cuenta que las mayores remociones se dieron en rangos de pH entre 2 y 3, alcanzando eficiencias entre un 60 y 100%, mientras que para pH extremadamente ácidos, en el caso de los valores comprendidos entre 1 y 2 se presentan bajas eficiencias de remoción con valores que oscilan entre 0 y 59% de remoción del sulfuro de hidrogeno.

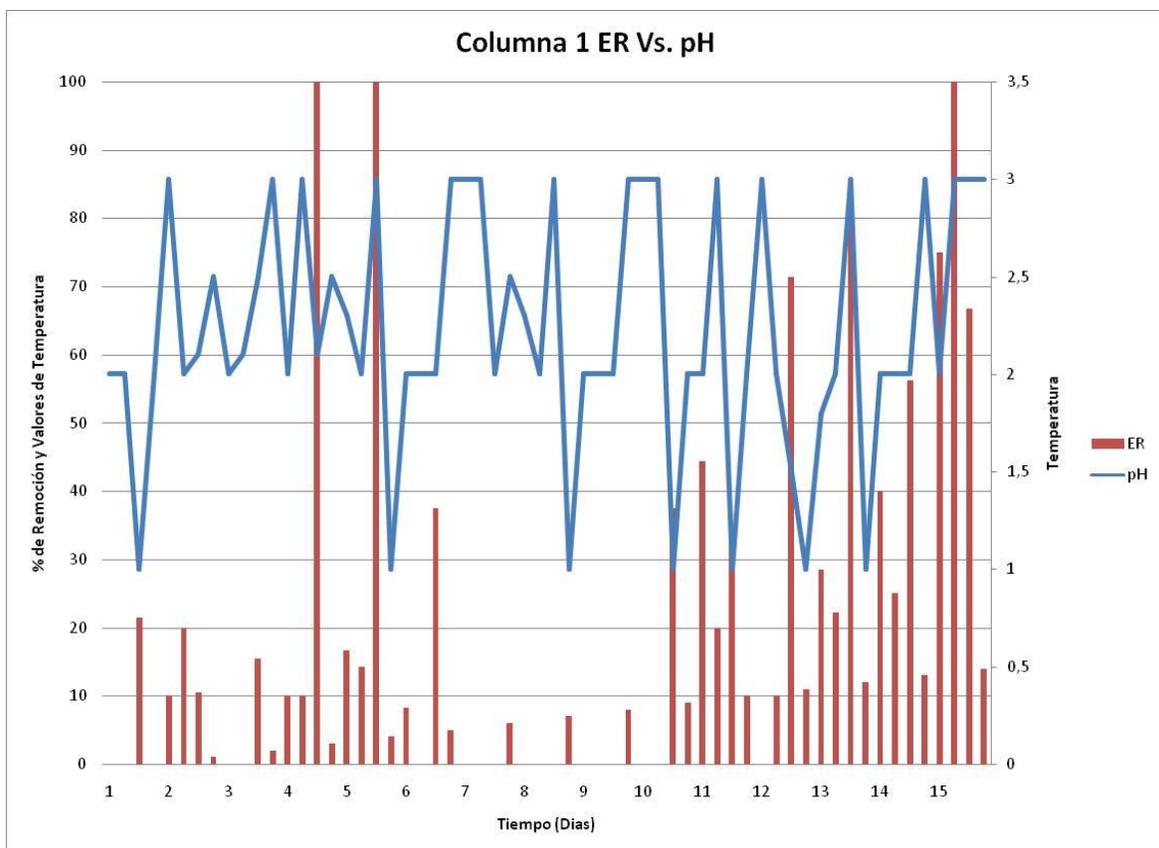


Figura 23. Gráfico de Eficiencia de Remoción pH del Medio en el Biofiltro, entre los días 1 al 15 de operación

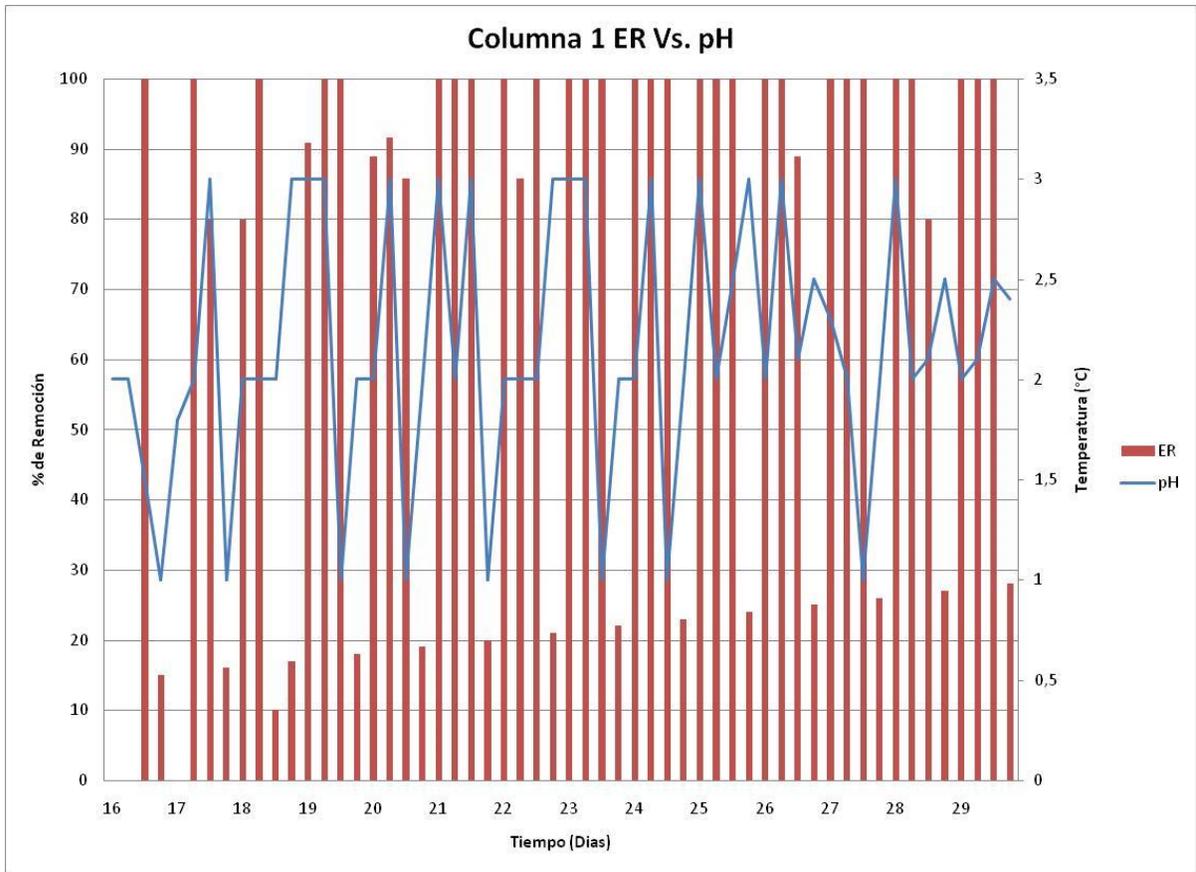


Figura 24. Gráfico de Eficiencia de Remoción pH del Medio en el Biofiltros, entre los días 16 al 29 de operación

9. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

9.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS.

9.1.1. Análisis de Varianza para Eficiencia

Tabla 6. Análisis de Varianza para Eficiencia - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos Principales					
A:Hora	0,786102	5	0,15722	0,93	0,4636
B:Humedad	0,899891	2	0,449945	2,67	0,0742
C:Temperatura	1,70159	2	0,850794	5,04	0,0081
RESIDUOS	17,8882	106	0,168757		
<hr/>					
TOTAL (CORREGIDO)	21,5407	115			

Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que la temperatura posee un valor-P menor que 0,05, indica que tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la Eficiencia de remoción con un 95,0% de nivel de confianza, esto quiere decir que la eficiencia de remoción del sistema puede estar ligada directamente a la temperatura, siendo estas directamente proporcionales.

Tabla 7. Prueba de Rangos múltiples con Método: 95% LSD, Aplicada a la Eficiencia por Temperatura

Temperatura	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
T2	42	0,300452	0,0782935	X
T3	61	0,486361	0,0757334	XX
T4	13	0,662567	0,128086	X

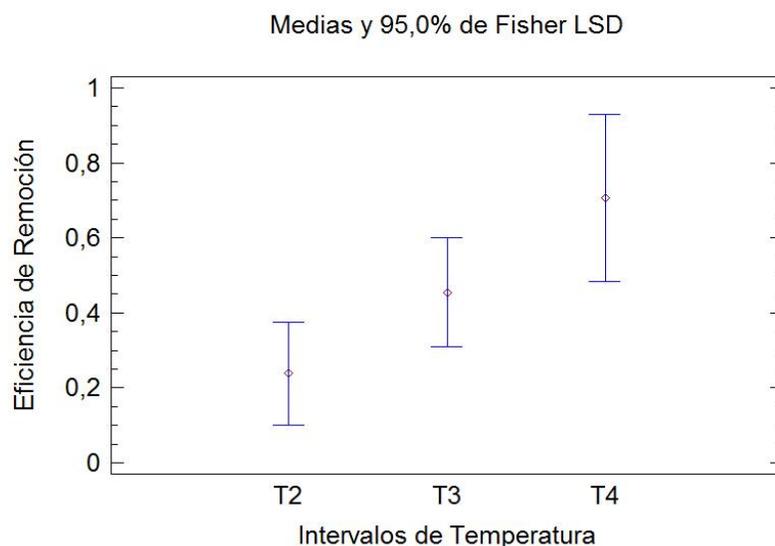


Figura 25. Sinopsis de las medias de Temperatura

Tabla 8. Diferencias significativas entre los Intervalos de Temperatura

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
T2 - T3		-0,185908	0,447779
T2 - T4	*	-0,362114	0,31948
T3 - T4		-0,176206	0,234619

* indica una diferencia significativa.

Se puede observar que existe una relación significativa entre los intervalos T2 y T4, es decir, el proceso de biofiltración obtendrá mayores eficiencias de remoción de Sulfuro de Hidrogeno cuando se presenten las temperaturas establecidas en estos intervalos.

Tabla 9. Prueba de Rangos múltiples con Método: 95% LSD, Aplicada a la Eficiencia por Humedad Relativa

Humedad	Relativa	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
H4		8	0,256768	0,153507	X
H3		94	0,593695	0,0504086	X
H2		14	0,598917	0,113509	X

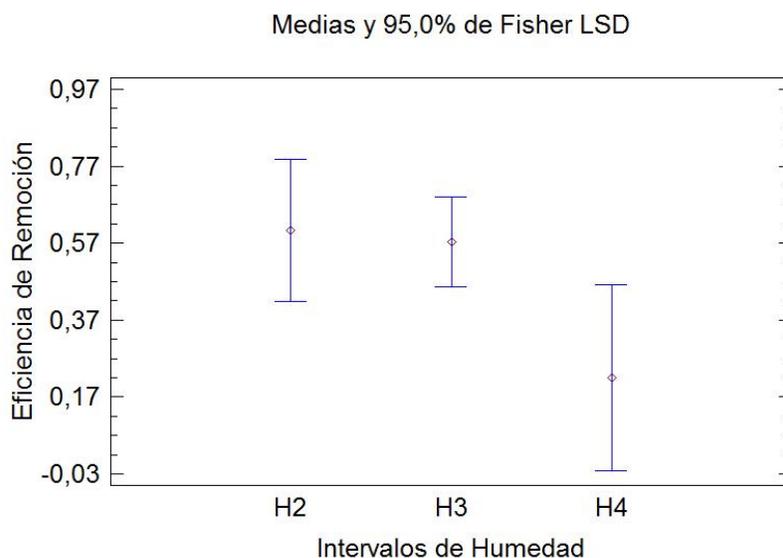


Figura 26. Sinopsis de las medias de Humedad

Tabla 10. Diferencias significativas entre los Intervalos de Humedad Relativa

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
H2 - H3		0,00522188	0,135325
H2 - H4	*	0,342149	0,270721
H3 - H4	*	0,336927	0,135396

* indica una diferencia significativa.

Para el caso de la Humedad se presentan diferencias significativas entre los intervalos H2 - H4 y H3 - H4, de esto podemos concluir que la Eficiencia de Remoción se ve ligeramente influenciada por la humedad en estos rangos, estableciendo así estos valores como rangos óptimos para la operación del sistema de biofiltración.

Cabe resaltar que durante el desarrollo de la fase experimental, la ciudad de Santa Marta se encontraba en época invernal, presentándose altas precipitaciones diarias, lo que causó en muchas ocasiones la disminución en las concentraciones de sulfuro de hidrogeno. Esto se puede ver directamente relacionado a que el sistema de alcantarillado de esta ciudad también recibe las aguas lluvias, diluyendo las aguas residuales domésticas, causando la reducción de la carga orgánica de las mismas. Este interrogante puede quedar abierto, dado que no se encontraron investigaciones que enfrentaran una problemática similar.

10. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Algunos autores han estudiado la eliminación de H₂S en biofiltros utilizando diferentes cargas contaminantes de este compuesto^{76 77}, estas cargas llegaron a ser hasta de 135 µg/m³ en las cuales lograron remociones máximas de un 94%, mientras que en este estudio se encontraron concentraciones hasta de 250354286 µg/m³ en un ambiente cerrado en las cuales se obtuvieron remociones máximas del 100%.

Thalasso y Pineda⁷⁸, determinaron que el rango óptimo de humedad en el lecho filtrante debía estar entre 40 y 60% para que el sistema de tratamiento obtuviese altas eficiencias de remoción, afirmando que este parámetro influye en el desarrollo de la actividad microbiológica disminuyendo la eficiencia de remoción del biofiltro. Pese a esto, en nuestro estudio se obtuvo que las mayores eficiencias de remoción en el sistema, se obtuvieron en rangos de humedad entre 60 y 85% después del proceso de estabilización del lecho filtrante y el crecimiento de los microorganismos.

En cuanto a los valores de pH y temperatura, se establece que los microorganismos tienen rangos en los cuales se da efectivo su crecimiento, en algunos casos se reporta el crecimiento de bacterias degradantes del H₂S en rangos de pH comprendidos entre 5 - 7 unidades.

Jones *et al.*⁷⁹, estudio el comportamiento de la eficiencia de remoción al variar el pH, estableciendo rangos de 6,8 - 8,3 unidades para una eficiencia del 82,3%, la cual disminuyó al 26% al momento de variar el pH a 2 unidades.

76 JONES *et al.* Op. Cit. p.27.

77 DUAN *et al.* Op. Cit. p.27.

78 THALASSO, F. y PINEDA, R. Op. Cit. p.23.

79 JONES *et al.* Op. Cit. p.27.

Al realizar esta prueba piloto, se comprobó el crecimiento de los microorganismos en rangos de pH establecidos entre 1 - 3 unidades, demostrando que este parámetro no influye en el desarrollo de los microorganismos y la capacidad de estos de degradar la carga contaminante en el biofiltro, dado que con un pH relativamente bajo (3 unds de pH), se puede presentar el crecimiento de bacterias acidofilas capaces de metabolizar la carga de H₂S presente en el aire a tratar. Esto se puede comprobar en una investigación similar realizada por Duan *et al.*⁸⁰

Rattanapan *et al.*⁸¹, en su estudio, compararon las condiciones de temperatura y humedad en el biofiltro, obteniendo como resultado remociones hasta del 95% con temperaturas superiores a los 28°C, mientras que la humedad no demostraba una diferencia significativa en el proceso de remoción.

Mientras que Datta *et al.*⁸², realizó pruebas de comparación en las eficiencias de remoción con diferentes temperaturas (40, 50, 60 y 70°C) con las cuales se dieron eficiencias hasta del 99%.

En este estudio se encontraron eficiencias hasta de 100% a temperaturas establecidas en un rango de 27 a 32°C, lo cual puede representar a este factor como un parámetro significativo en el desarrollo de los microorganismos capaces de reducir y/o eliminar las cargas de H₂S. Dado que en algunos estudios realizados por otros autores también se presenta una alta tasa de crecimiento de microorganismos con temperaturas cálidas (entre 28 y 40°C).

Camargo⁸³, comparó las eficiencias de remoción con el uso de diferentes materiales del lecho filtrante, mostrando que al usar un lecho compuesto por bagazo de caña para la eliminación de H₂S, se pueden obtener eficiencias de remoción superiores al 99%, lo cual demuestra que este elemento puede ser de

80 DUAN *et al.* Op. Cit. p.27.

81 RATTANAPAN *et al.*, Op. Cit. p.14.

82 DATTA *et al.* Op. Cit. p.32.

83 CAMARGO. Op. Cit. p.22.

una manera u otra fuente de energía y carbón para el crecimiento de los microorganismos.

11. CONCLUSIONES

La biofiltración para el control de olores, es una técnica que ha demostrado ser eficiente, económica y simple, tal como reportan numerosas publicaciones internacionales. Los costos de operación y mantención son bajos comparados con los que presentan el resto de las tecnologías utilizadas para la remoción de compuestos odoríferos el cual para el caso particular de las condiciones climáticas de la ciudad de Santa Marta, resulta ser uno de los métodos más efectivos para la eliminación de olores, debido a que su principal agente activo son los microorganismos que se desarrollan en el lecho.

Teniendo en cuenta los objetivos específicos, la Biofiltración demostró tratamiento y eliminación del sulfuro de hidrogeno. Los resultados muestran que es posible tratar cargas altas de H_2S y alcanzar eficiencias de remoción del 100%. Sin embargo existe un periodo de estabilización de 14 días, para alcanzar eficiencias de remoción continuas del 100%. Se espera que este sistema funcione igual para la remoción de H_2S en efluentes gaseosos con concentraciones mayores a las encontradas en los tanques donde fueron ubicados los biofiltros.

Desde el punto de vista operacional, la puesta en operación de los biofiltros fue rápida, observando el crecimiento de microorganismos a partir del segundo día, y alcanzando eficiencias de remoción variables entre un 20 y 100% los primeros 6 días, a partir de ese momento el sistema mostro un incremento en las eficiencias de remoción la cuales se estabilizaron y fueron hasta de un 100% a partir del 13 de operación, manteniendo valores oscilantes entre 80 y 100% hasta el día 29. Además se pudieron relacionar las variables de operación comparadas con las eficiencias presentadas, pudiendo estimar las capacidades de remoción del Biofiltro con las concentraciones presentadas durante la etapa de operación.

Con respecto a la elección del lecho filtrante faltaría realizar pruebas de otras configuraciones (altura del lecho) y otros materiales, que compensen sus desventajas y diferencias.

Respecto al crecimiento de microorganismos, no se pudo realizar un seguimiento de laboratorio, debido a la falta de recursos económicos implicados en la compra de medios específicos, pero se pudo observar el crecimiento de hongos sobre el bagazo de caña el cual aumentaba con el paso de los días y de esto se puede concluir que ayudaban de alguna u otra manera en el proceso de remoción del H_2S .

En cuanto al cumplimiento de los objetivos específicos, se presentan los resultados obtenidos para cada uno:

- **Determinar la concentración de Sulfuro de Hidrógeno en Biofiltros para la remoción de este compuesto generado en aguas residuales domésticas:** se logró medir y establecer las eficiencias de remoción del biofiltro, a partir de diferentes concentraciones de entrada de Sulfuro de Hidrogeno estableciendo así las eficiencias de remoción para cada una de las concentraciones presentadas.
- **Establecer el comportamiento de las variables de proceso del Sistema de Biofiltración para la remoción de Sulfuro de Hidrógeno en aguas residuales domésticas:** se compararon las eficiencias de remoción para cada una de las variables (temperatura, humedad y pH), en las cuales al realizar el análisis estadístico se pudo determinar su influencia en el proceso de remoción de Sulfuro de Hidrogeno, el cual al ser comparado con estudios anteriores demuestra que las condiciones pueden variar para diferentes sistemas, en el cual influyen estos parámetros.

- **Estimar la eficiencia de la Tecnología de Biofiltración aplicada a la remoción de Sulfuro de Hidrógeno en aguas residuales de origen doméstico:** se estimó la eficiencia de remoción del sistema, analizando cada una de las variables planteadas en el proceso, y analizando su influencia en el proceso de remoción de la carga contaminante, en las cuales se pudo obtener eficiencias hasta de un 100%.

12. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AURIA, R; FRÈRE, G; ACUÑA, M; REVAH, S. Influence of mixing and wáter addition on the removal rate of toluene vapors in biofilter. *Biotechnology Bioingenery*. 2000. pp. 448-455.

CAMARGO CAICEDO, Yiniva. *Sistemas de Biofiltración: Alternativa Biológica en el Control de Olores Ofensivos*. Biofiltración: Tecnología Aplicada a Contaminantes Líquidos y Gaseosos. 1 ed. GIMSA. 2011. p. 19-36.

CÁRDENAS GONZÁLEZ, B; REVAH MOISEEV, S; HERNÁNDEZ JIMÉNEZ, S; MARTÍNEZ SÁNCHEZ, A; GUTIÉRREZ AVEDOY, V. *Tratamiento biológico de compuestos orgánicos volátiles de fuentes fijas*. 2003. INE-SEMARNAT.

COHEN, Y. Biofiltration--the treatment of fluids by microorganisms immobilized into the filter bedding material: a review. *Bioresour Technol*. 2001. p.257-74.

COLOMBIA. Instituto de Hidrología, Meteorología y Medio Ambiente (IDEAM). 2011. Disponible en la URL: www.ideam.gov.co

COLOMBIA. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución 1541 de 2013.

COLOMBIA. Presidencia de la Republica. Decreto 948 de 1995.

COX, H., DESHUSSES, M., CONVERSE, B., SCHROEDER, E., VOSOOGHI, D., Patel, D., Moghaddem, O., Iranpour, R. Single-Stage H₂S and VOC Removal in Biotrickling Filters and Biofilters: A Comparative Study at the Hyperion Treatment Plant. 2001. Paper No. 335.

DATTA, I; FULTHORPE, R; SHARMA, S; ALLEN, D. High-temperature biotrickling filtration of hydrogen sulphide. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2007. p.708-716.

DUAN, Huiqi; KOE, Lawrence; YAN, Rong; CHEN, Xiaoge. Treatment of H₂S using a horizontal biotrickling filter based on biological activated carbon: reactor setup and performance evaluation. *Microbiol. Biotechnol.* 2005. p.143–149.

DUAN; H, KOE, L; YAN R. Treatment of H₂S using a horizontal biotrickling filter based on biological activated carbon: Reactor setup and performance evaluation. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2005. p.143-149.

DUAN, Huiqi; KOE, Lawrence; YAN, Rong; CHEN, Xiaoge. Biological treatment of H₂S using pellet activated carbon as a carrier of microorganisms in a biofilter. *WATER RESEARCH*, Vol. 40. 2006. p.2629 – 2636.

DUAN, H; YAN, R; KOE, L; WANG, X. Combined effect of adsorption and biodegradation of biological activated carbon on H₂S biotrickling filtration. *Chemosphere*. 2007. p.1684–1691.

DUMONT, E; ANDRÉS, Y; LE CLOIREC, P; GAUDIN, F. Evaluation of a new packing material for H₂S removed by biofiltration. En: *Biochemical Engineering Journal*. (2008). Vol. 42, p. 120–127.

EMISON. www.emison.com. Tomado el 28 de enero de 2013.

ESCOBAR GUERRERO, Victor; ARELLANO GARCÍA, Luis Alberto; MENDOZA VARGAS, Edgar Eduardo; GUERRERO, Jesús Zamudio. Eliminación de Olores de una Corriente Gaseosa, Usando un Biofiltro de Lecho Ecurrido. Universidad Autónoma Metropolitana de México. 2006.

FERNÁNDEZ, Sergio. Evaluación de los costes de construcción y operación de un biofiltro. Universitat Autònoma de Barcelona. 2007.

FRIEDRICH, C; ROTHER, D; BARDISCHEWSKY, F; OUEMENTMEIER, A; FISCHER, J. Oxidation of Reduced Inorganic Sulfur Compounds by Bacteria: Emergence of a Common Mechanism?. Applied and Environmental Microbiology. 2001. p.2873-2882.

GAUDIN, F; ANDRES, Y; LE CLOIREC, P. Packing material formulation for odorous emission biofiltration. Chemosphere. 2008. p. 958-66.

GOSTELOW, P; LONGHURST, P; PARSONS, S; STUETZ, R. Can you sample odours: What, where and how? Presentado en CIWEM. 2001.

IRANPOUR, R. Biological treatment of odor and VOCs in biofilters and biotrickling filters: literature survey of field experiences. Proc. Annual Meeting and Exhibition of the Air and Waste Management Association. AWMA, Pittsburgh, PA. Orlando, Florida. 2001. Paper 726. June 24-28.

JIMENEZ, Esteban; VILLEGAS, Ana María. Diseño de un Sistema de Biofiltración para la Remoción de Estireno. Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia, Vol.3 2005. p. 9-20.

JIANG, Xia; YAN, Rong; HWA TAY, Joo. Reusing H₂S-exhausted carbon as packing material for odor biofiltration. Chemosphere. Volumen 73. 2008. p. 698-704.

JONES, K; MARTINEZ, A; MAROO, K. Kinetic evaluation of H₂S and NH₃ biofiltration for two media used for wastewater lift station emissions. J Air & Waste Manage. 2004. pp.24–35.

LE CLOIREC, P; HUMEAU, P; RAMÍREZ-LÓPEZ, E. Biotreatments of odours: control and performance of biofilters and a bioscrubber. En: Water Science and Technology, Vol. 44. 2001. p. 219-226.

LI, H; MIHELIC, J; CRITTENDEN, J; ANDERSON, K. Field measurements and modeling of two-stage biofilter that treats odorous sulfur air emissions. J Environmental. 2003. p.129.

LI, H; MIHELIC, J; CRITTENDEN, J; ANDERSON, K. Field Measurements and Modeling of Two- Stage Biofilter that Treats Odorous Sulfur Air Emissions. Journal of Environmental Engineering (Reston, VA, United States). 2003. p.684-69.

LOPEZ BARON, Roberto; PEREZ TEJADA ROJAS, Norma; REYES CRUZ, Maribel. Desarrollo de un Sistema de Biofiltración-Adsorción en Carbón Activado (BACA), para Eliminación de Vapores de Gasolina en estaciones de Servicio. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa. 2002.

MCNEVIN, D. y BARFORD, J. Biofiltration as an odour abatement strategy. Biochemical Engineering Journal. Vol.5. 2000. p. 231-242.

MANNING, K.; JEAUVONS, J. Odour control and planning arena. Water Science and Technology, Vol. 41. 2000. p. 1-8.

MARIZ MEDEIROS, D.; HERNANDEZ MUÑOZ, A; HERNANDEZ LEHMANN, A; LUCAS FILHO, M. Eliminación de Compuestos Volátiles Olorosos por Electrocoagulación. AIDIS. Vol. 4. 2011. No. 2.

MATHUR ANIL, K; MAJUMDER, C; CHATTERJEE, Shamba. Combined removal of BTEX in air stream by using mixture of sugar cane bagasse, compost and GAC as biofilter media. Journal of Hazardous Materials. 2007. p. 64–74.

McFARLAND, Michael; SWOPE, Tracey; PALMER Glenn. Reduction of hazardous air pollutant emissions using biofiltration. Management of Environmental Quality. Vol. 14 (5). 2003. p. 590-603.

METROAGUA. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de la Ciudad de Santa Marta. www.metroagua.com.co. 2011.

MORALES, Marcia; HERNÁNDEZ, Sergio; CORNABE, Thomas; REVAH, Sergio y AURIA, Richard. Effect of Drying on Biofilter Performance: Modeling and Experimental Approach. Environmental Science & Technology. Vol. 37, No. 5. 2003. pp. 985-992.

MORENO, A; CRUZ, M; MORGAN, J; CABIROL, N; NOYOLA , A. Efecto de la carga y composición del medio filtrante en la eficiencia de remoción de H₂S en el arranque de Biofiltros con flujo descendente. XV Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. 2006.

MORGAN SAGASTUME, Juan; REVAH MOISSEV, Sergio; NOYOLA, A. Algunas tecnologías para la eliminación de H₂S por vía fisicoquímica y microbiológica. Revista del IMIQ, año XLII vol. 9-12. 2001. p. 209-210.

MORGAN SAGASTUME, JM; NOYOLA, A; REVAH, S. Changes in physical properties of a compost biofilter treating hydrogen sulfide. J Air Waste Manag Assoc. 2003. pp.1011-21.

NELSON, P. y LÓPEZ, A. Control de olores en Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas. XV Congreso de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. AIDIS-Chile. 2003.

O'MALLEY, D. Best Available Technique for Odour Control. Presentado en Conferencia Nacional CIWEM, Hertfordshire. 2002.

OYARZÚN, Patricio; ARANCIBIA, Fernando; CANALES, Christian; AROCA, German. Biofiltration of high concentration of hydrogen sulphide using *Thiobacillus thioparus*. *Process Biochemistry* Vol. 39. 2003. p.165-170.

RAMIREZ MUÑOZ, Martin., Viabilidad de un proceso para la eliminación conjunta de H₂S y NH₃ contenido en efluentes gaseosos. Universidad de Cadiz. 2007.

RATTANAPAN, Cheerawit; BOONSAWANG, Piyarat; KANTACHOTE, Duangporn. Removal of H₂S in down-flow GAC biofiltration using sulfide oxidizing bacteria from concentrated latex wastewater. *Bioresource Technology*, Vol. 100. 2009. p. 125–130

REVAH, Sergio; MORGAN SAGASTUME, Juan Manuel. Methods of Odor and VOC Control. Shareefdeen, Zarook y Singh, Ajay. *Biotechnology for Odor and AirPollution Control*. Heidelberg, Germany: Springer. 2005. p. 29-63.

RIVERA GONZALEZ, Antonio Daniel. Diseño de un sistema de eliminación por Biofiltración de H₂S y NH₃ de efluentes gaseosos procedentes de una EDAR. Universidad de Cadiz. 2006.

SEKULOV, Ivan., RUDIGER, Andreas., BARZ, Matthias. Biofiltración innovadora para el tratamiento de aguas residuales producidas por comunidades e industrias. En: *Biofiltración innovadora para el tratamiento de aguas residuales*. TerraViva Tec S.L. 2009. P. 1-14.

SHAREEFDEEN, Z; HERNER, B; WEBB, D; WILSON, S. Biofiltration eliminates nuisance chemical odors from industrial air streams. *Journal and Microbiol Biotechnol*. Vol. 30. 2003. p. 168–174.

THALASSO, F. y PINEDA, R. Biofiltración: tratamiento biológico de aire contaminado. *Avance y Perspectiva*. Vol 21. 2002. P. 325 – 327.

VEIGA, Kennes. Parameters affecting performance and modeling of biofilters treating alkylbenzene-polluted air. *Appl Microbiol Biotechnol*. Vol. 55. 2001. 254-258.

VILLÉN PÉREZ, Lorena. Diseño de un biofiltro. Universidad Politecnica de Cataluña. 2010.

WHITTERSPOON, J.R; SIDU, A; CASTLEBERRY, J; COLEMAN, L; REYNOLDS, K. Odour emission estimates using models and sampling odour dispersion modelling and control strategies for East Bay Municipal district's collection sewerage system and wastewater treatment Works. *Water Science and Technology*, Vol. 41. 2000. p. 65-71.

12. ANEXOS

Anexo 1. Formato de Toma de Datos en Campo



Formato de Campo Para La
Toma de Datos de Muestreo

Columna	DIA	No. Muestra	Fecha	Hora (Toma de Muestra)	Temperatura Ambiente (°C)	Humedad (%)	pH	Co (ppm)	C (ppm)

Biofiltración Aplicada a La Remoción de Sulfuro de Hidrogeno en Aguas Residuales de Origen Domestico

COORDENADAS ESTACIÓN DE BOMBEO DE A. R. NORTE: _____

DILIGENCIÓ: _____

APROBÓ: _____

Pagina _____



Formato de Campo Para La
Toma de Datos de Muestreo

HOJA DE OBSERVACIONES	No. Muestra	Fecha	Hora (Toma de Muestra)	COLUMNA	OBSERVACION

Biofiltración Aplicada a La Remoción de Sulfuro de Hidrogeno en Aguas Residuales de Origen Domestico

DILIGENCIÓ: _____

REVISÓ: _____

APROBÓ: _____

Anexo 2. Datos de Concentraciones horarias producidas en la estación norte.

HORA	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7	DIA 8	DIA 9	DIA 10	DIA 11	DIA 12	DIA 13	DIA 14	DIA 15	DIA 16	PROMEDIO HORARIO
15:00	5	4	6	0	0	0	0	0	8	0	0	0	4	6	12	12	3,56
16:00	2	2	4	0	0	0	0	0	12	0	0	0	3	5	10	11	3,06
17:00	4	0	4	0	0	0	0	0	10	0	0	0	4	4	7	9	2,63
18:00	4	0	4	0	0	0	0	0	10	0	0	0	4	6	4	10	2,63
19:00	2	0	5	0	0	4	0	0	5	0	0	0	4	5	0	7	2,00
20:00	5	0	6	0	0	6	0	0	5	0	0	0	4	0	0	4	1,88
21:00	12	9	6	0	0	5	0	0	4	0	0	0	4	0	0	0	2,50
22:00	9	8	6	0	0	6	0	0	6	0	0	0	5	0	0	0	2,50
23:00	4	5	6	0	0	0	0	0	5	0	0	0	5	0	0	0	1,56
00:00	6	2	5	0	0	0	0	6	6	0	0	0	4	0	0	0	1,81
01:00	6	4	5	0	0	0	0	4	4	0	0	0	4	0	0	0	1,69
02:00	0	5	5	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0,94
03:00	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,19
04:00	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0,44
05:00	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0,63
06:00	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0,56
07:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	6	0,63
08:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	5	5	0,88
09:00	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	4	4	4	4	6	1,50
10:00	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	5	4	6	4	4	1,69
11:00	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	6	5	4	6	6	1,94
12:00	0	0	0	0	0	0	4	4	0	0	0	4	6	5	4	4	1,94
13:00	0	0	0	0	0	0	4	4	0	0	0	5	4	5	4	4	1,88
14:00	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	6	6	5	6	2,06
PROMEDIO DIARIO	2,71	1,63	3,25	0,00	0,00	0,88	0,75	0,96	3,13	0,00	0,00	1,33	3,08	2,33	2,88	4,46	

Anexo 3. Datos de Temperatura, Humedad Relativa y pH del Agua Residual al Momento de la Toma de Muestras.

Día	Tiempo (días)	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	pH
1	10/12/2010 03:00	27,8	71,1	2
	10/12/2010 12:00	29,9	70,7	2
	10/12/2010 15:00	28,9	70,1	1
	10/12/2010 21:00	29,8	68,1	2
2	11/12/2010 03:00	28,6	70,5	3
	11/12/2010 12:00	31,8	60,5	2
	11/12/2010 15:00	30,8	66,8	2,1
	11/12/2010 21:00	29,9	68,6	2,5
3	12/12/2010 03:00	28,8	67,9	2
	12/12/2010 12:00	31,2	65,0	2,1
	12/12/2010 15:00	30,8	68,2	2,5
	12/12/2010 21:00	30,0	63,7	3
4	13/12/2010 03:00	29,1	65,9	2
	13/12/2010 12:00	30,1	66,1	3
	13/12/2010 15:00	31,3	66,7	2,1
	13/12/2010 21:00	30,2	65,9	2,5
5	14/12/2010 03:00	28,9	64,3	2,3
	14/12/2010 12:00	29,8	58,9	2
	14/12/2010 15:00	28,8	57,9	3
	14/12/2010 21:00	28,1	62,0	1
6	15/12/2010 03:00	28,5	63,5	2
	15/12/2010 12:00	29,2	62,3	2
	15/12/2010 15:00	28,5	68,6	2
	15/12/2010 21:00	27,4	77,2	3
7	16/12/2010 03:00	27,2	78,3	3
	16/12/2010 12:00	28,8	66,3	3
	16/12/2010 15:00	29,4	64,7	2
	16/12/2010 21:00	27,4	79,7	2,5
8	17/12/2010 03:00	28,1	78,3	2,3
	17/12/2010 12:00	28,9	75,1	2
	17/12/2010 15:00	29,4	73,6	3
	17/12/2010 21:00	28,1	66,1	1
9	18/12/2010 03:00	27,3	65,7	2
	18/12/2010 12:00	31,2	66,0	2
	18/12/2010 15:00	30,1	66,9	2
	18/12/2010 21:00	29,3	65,4	3
10	19/12/2010 03:00	28,1	63,0	3
	19/12/2010 12:00	30,9	65,2	3

	19/12/2010 15:00	30,6	64,3	1
	19/12/2010 21:00	29,9	63,2	2
11	20/12/2010 03:00	30,0	63,9	2
	20/12/2010 12:00	30,9	61,3	3
	20/12/2010 15:00	30,0	55,1	1
	20/12/2010 21:00	29,0	62,0	2
12	21/12/2010 03:00	28,5	59,7	3
	21/12/2010 12:00	30,1	58,2	2
	21/12/2010 15:00	30,3	57,3	1,5
	21/12/2010 21:00	29,1	66,1	1
13	22/12/2010 03:00	28	63,7	1,8
	22/12/2010 12:00	30	58,8	2
	22/12/2010 15:00	29,8	58,4	3
	22/12/2010 21:00	30,2	61,0	1
14	23/12/2010 03:00	30,4	62,3	2
	23/12/2010 12:00	31	61,9	2
	23/12/2010 15:00	29,9	60,5	2
	23/12/2010 21:00	28,7	65,3	3
15	24/12/2010 03:00	28,9	66,1	2
	24/12/2010 12:00	31,4	67,0	3
	24/12/2010 15:00	30,9	66,2	3
	24/12/2010 21:00	28,8	67,4	3
16	25/12/2010 03:00	28,3	68,1	2
	25/12/2010 12:00	30,5	63,2	2
	25/12/2010 15:00	29,4	65,6	1,5
	25/12/2010 21:00	27,9	71,3	1
17	26/12/2010 03:00	27,1	72,0	1,8
	26/12/2010 12:00	28,3	70,0	2
	26/12/2010 15:00	28,9	68,3	3
	26/12/2010 21:00	28,7	68,2	1
18	27/12/2010 03:00	28,4	70,1	2
	27/12/2010 12:00	29,6	71,0	2
	27/12/2010 15:00	28,8	67,1	2
	27/12/2010 21:00	29,1	66,8	3
19	28/12/2010 03:00	29,9	67,0	3
	28/12/2010 12:00	31,2	66,4	3
	28/12/2010 15:00	30,1	66,2	1
	28/12/2010 21:00	28,4	62,1	2
20	29/12/2010 03:00	28,9	65,0	2
	29/12/2010 12:00	29,8	66,9	3

	29/12/2010 15:00	29,5	66,2	1
	29/12/2010 21:00	29,3	66,5	2
21	30/12/2010 03:00	29,0	58,0	3
	30/12/2010 12:00	30,1	66,1	2
	30/12/2010 15:00	29,8	67,0	3
	30/12/2010 21:00	29,6	65,3	1
22	31/12/2010 03:00	29,4	65,1	2
	31/12/2010 12:00	31,1	64,2	2
	31/12/2010 15:00	30,8	63,2	2
	31/12/2010 21:00	28,8	62,0	3
23	01/01/2011 03:00	29,0	61,4	3
	01/01/2011 12:00	30,0	58,0	3
	01/01/2011 15:00	31,2	70,0	1
	01/01/2011 21:00	29,3	71,6	2
24	02/01/2011 03:00	29,0	71,1	2
	02/01/2011 12:00	30,1	70,7	3
	02/01/2011 15:00	29,8	70,1	1
	02/01/2011 21:00	29,7	68,1	2
25	03/01/2011 03:00	29,4	70,5	3
	03/01/2011 12:00	31,1	60,5	2
	03/01/2011 15:00	31,2	66,8	2,5
	03/01/2011 21:00	30,1	68,6	3
26	04/01/2011 03:00	30,3	67,9	2
	04/01/2011 12:00	32,0	65,0	3
	04/01/2011 15:00	30,8	66,2	2,1
	04/01/2011 21:00	28,8	66,5	2,5
27	05/01/2011 03:00	29,0	58,0	2,3
	05/01/2011 12:00	30,0	66,1	2
	05/01/2011 15:00	31,2	67,0	1
	05/01/2011 21:00	30,0	65,3	2
28	06/01/2011 03:00	29,3	65,1	3
	06/01/2011 12:00	31,8	64,2	2
	06/01/2011 15:00	30,8	65,6	2,1
	06/01/2011 21:00	29,9	71,3	2,5
29	07/01/2011 03:00	29,7	72,0	2
	07/01/2011 12:00	30,3	70,0	2,1
	07/01/2011 15:00	31	68	2,5
	07/01/2011 21:00	30	66,5	2,4

Anexo 4. Concentraciones de Sulfuro de Hidrogeno en la Entrada y Salida del Biofiltro.

Concentraciones en el Biofiltro.

Dia	Tiempo (dias)	CONC. PPM		CONC. µg/m3	
		Cg ent	Cg sal	Cg ent	Cg sal
1	10/12/2010 03:00	5	5	69542857	69542857
	10/12/2010 12:00	5	5	69542857	69542857
	10/12/2010 15:00	14	11	194720000	152994286
	10/12/2010 21:00	0	0	0	0
2	11/12/2010 03:00	10	9	139085714	125177143
	11/12/2010 12:00	10	8	139085714	111268571
	11/12/2010 15:00	19	17	264262857	236445714
	11/12/2010 21:00	6	5	83451429	69542857
3	12/12/2010 03:00	0	0	0	0
	12/12/2010 12:00	4	4	55634286	55634286
	12/12/2010 15:00	13	11	180811429	152994286
	12/12/2010 21:00	12	10	166902857	139085714
4	13/12/2010 03:00	10	9	139085714	125177143
	13/12/2010 12:00	10	9	139085714	125177143
	13/12/2010 15:00	4	0	55634286	0
	13/12/2010 21:00	8	7	111268571	97360000
5	14/12/2010 03:00	6	5	83451429	69542857
	14/12/2010 12:00	7	6	97360000	83451429
	14/12/2010 15:00	4	0	55634286	0
	14/12/2010 21:00	5	4	69542857	55634286
6	15/12/2010 03:00	12	11	166902857	152994286
	15/12/2010 12:00	9	9	125177143	125177143
	15/12/2010 15:00	8	5	111268571	69542857
	15/12/2010 21:00	0	0	0	0
7	16/12/2010 03:00	0	0	0	0
	16/12/2010 12:00	0	0	0	0
	16/12/2010 15:00	0	0	0	0
	16/12/2010 21:00	0	0	0	0
8	17/12/2010 03:00	0	0	0	0
	17/12/2010 12:00	0	0	0	0
	17/12/2010 15:00	0	0	0	0
	17/12/2010 21:00	0	0	0	0
9	18/12/2010 03:00	0	0	0	0
	18/12/2010 12:00	0	0	0	0
	18/12/2010 15:00	0	0	0	0
	18/12/2010 21:00	0	0	0	0

10	19/12/2010 03:00	0	0	0	0
	19/12/2010 12:00	0	0	0	0
	19/12/2010 15:00	8	5	111268571	69542857
	19/12/2010 21:00	6	4	83451429	55634286
11	20/12/2010 03:00	9	5	125177143	69542857
	20/12/2010 12:00	10	8	139085714	111268571
	20/12/2010 15:00	9	6	125177143	83451429
	20/12/2010 21:00	4	3	55634286	41725714
12	21/12/2010 03:00	0	0	0	0
	21/12/2010 12:00	10	9	139085714	125177143
	21/12/2010 15:00	7	2	97360000	27817143
	21/12/2010 21:00	5	3	69542857	41725714
13	22/12/2010 03:00	7	5	97360000	69542857
	22/12/2010 12:00	9	7	125177143	97360000
	22/12/2010 15:00	5	1	69542857	13908571
	22/12/2010 21:00	6	3	83451429	41725714
14	23/12/2010 03:00	5	3	69542857	41725714
	23/12/2010 12:00	8	6	111268571	83451429
	23/12/2010 15:00	16	7	222537143	97360000
	23/12/2010 21:00	8	2	111268571	27817143
15	24/12/2010 03:00	4	1	55634286	13908571
	24/12/2010 12:00	2	0	27817143	0
	24/12/2010 15:00	3	1	41725714	13908571
	24/12/2010 21:00	0	0	0	0
16	25/12/2010 03:00	0	0	0	0
	25/12/2010 12:00	0	0	0	0
	25/12/2010 15:00	2	0	27817143	0
	25/12/2010 21:00	0	0	0	0
17	26/12/2010 03:00	0	0	0	0
	26/12/2010 12:00	3	0	41725714	0
	26/12/2010 15:00	5	1	69542857	13908571
	26/12/2010 21:00	7	1	97360000	13908571
18	27/12/2010 03:00	10	2	139085714	27817143
	27/12/2010 12:00	11	0	152994286	0
	27/12/2010 15:00	10	9	139085714	125177143
	27/12/2010 21:00	7	0	97360000	0
19	28/12/2010 03:00	11	1	152994286	13908571
	28/12/2010 12:00	10	0	139085714	0
	28/12/2010 15:00	11	0	152994286	0
	28/12/2010 21:00	8	1	111268571	13908571

20	29/12/2010 03:00	9	1	125177143	13908571
	29/12/2010 12:00	12	1	166902857	13908571
	29/12/2010 15:00	14	2	194720000	27817143
	29/12/2010 21:00	12	1	166902857	13908571
21	30/12/2010 03:00	8	0	111268571	0
	30/12/2010 12:00	7	0	97360000	0
	30/12/2010 15:00	9	0	125177143	0
	30/12/2010 21:00	10	0	139085714	0
22	31/12/2010 03:00	5	0	69542857	0
	31/12/2010 12:00	7	1	97360000	13908571
	31/12/2010 15:00	9	0	125177143	0
	31/12/2010 21:00	6	0	83451429	0
23	01/01/2011 03:00	7	0	97360000	0
	01/01/2011 12:00	8	0	111268571	0
	01/01/2011 15:00	10	0	139085714	0
	01/01/2011 21:00	13	0	180811429	0
24	02/01/2011 03:00	12	0	166902857	0
	02/01/2011 12:00	15	0	208628571	0
	02/01/2011 15:00	16	0	222537143	0
	02/01/2011 21:00	8	0	111268571	0
25	03/01/2011 03:00	4	0	55634286	0
	03/01/2011 12:00	2	0	27817143	0
	03/01/2011 15:00	5	0	69542857	0
	03/01/2011 21:00	7	0	97360000	0
26	04/01/2011 03:00	10	0	139085714	0
	04/01/2011 12:00	11	0	152994286	0
	04/01/2011 15:00	9	1	125177143	13908571
	04/01/2011 21:00	10	1	139085714	13908571
27	05/01/2011 03:00	5	0	69542857	0
	05/01/2011 12:00	7	0	97360000	0
	05/01/2011 15:00	9	0	125177143	0
	05/01/2011 21:00	6	0	83451429	0
28	06/01/2011 03:00	8	0	111268571	0
	06/01/2011 12:00	7	0	97360000	0
	06/01/2011 15:00	10	2	139085714	27817143
	06/01/2011 21:00	13	0	180811429	0
29	07/01/2011 03:00	12	0	166902857	0
	07/01/2011 12:00	15	0	208628571	0
	07/01/2011 15:00	17	0	236445714	0
	07/01/2011 21:00	18	0	250354286	0

Anexo 5. Carga (C), Capacidad de Remoción (CR) y Eficiencia de Remoción (ER) en el Biofiltro.

Valores de C, CR y ER en el Biofiltro.

Día	Tiempo (días)	CR ($\mu\text{g}/\text{m}^3\cdot\text{h}$)	ER	C ($\mu\text{g}/\text{m}^3\cdot\text{h}$)
1	10/12/2010 03:00	0	0	5689870130
	10/12/2010 12:00	0	0	5689870130
	10/12/2010 15:00	3413922078	21	15931636364
	10/12/2010 21:00	0	0	0
2	11/12/2010 03:00	1137974026	10	11379740260
	11/12/2010 12:00	2275948052	20	11379740260
	11/12/2010 15:00	2275948052	11	21621506494
	11/12/2010 21:00	1137974026	1	6827844156
3	12/12/2010 03:00	0	0	0
	12/12/2010 12:00	0	0	4551896104
	12/12/2010 15:00	2275948052	15	14793662338
	12/12/2010 21:00	2275948052	2	13655688312
4	13/12/2010 03:00	1137974026	10	11379740260
	13/12/2010 12:00	1137974026	10	11379740260
	13/12/2010 15:00	4551896104	100	4551896104
	13/12/2010 21:00	1137974026	3	9103792208
5	14/12/2010 03:00	1137974026	17	6827844156
	14/12/2010 12:00	1137974026	14	7965818182
	14/12/2010 15:00	4551896104	100	4551896104
	14/12/2010 21:00	1137974026	4	5689870130
6	15/12/2010 03:00	1137974026	8	13655688312
	15/12/2010 12:00	0	0	10241766234
	15/12/2010 15:00	3413922078	38	9103792208
	15/12/2010 21:00	0	5	0
7	16/12/2010 03:00	0	0	0
	16/12/2010 12:00	0	0	0
	16/12/2010 15:00	0	0	0
	16/12/2010 21:00	0	6	0
8	17/12/2010 03:00	0	0	0
	17/12/2010 12:00	0	0	0
	17/12/2010 15:00	0	0	0
	17/12/2010 21:00	0	7	0
9	18/12/2010 03:00	0	0	0
	18/12/2010 12:00	0	0	0
	18/12/2010 15:00	0	0	0
	18/12/2010 21:00	0	8	0

10	19/12/2010 03:00	0	0	0
	19/12/2010 12:00	0	0	0
	19/12/2010 15:00	3413922078	38	9103792208
	19/12/2010 21:00	2275948052	9	6827844156
11	20/12/2010 03:00	4551896104	44	10241766234
	20/12/2010 12:00	2275948052	20	11379740260
	20/12/2010 15:00	3413922078	33	10241766234
	20/12/2010 21:00	1137974026	10	4551896104
12	21/12/2010 03:00	0	0	0
	21/12/2010 12:00	1137974026	10	11379740260
	21/12/2010 15:00	5689870130	71	7965818182
	21/12/2010 21:00	2275948052	11	5689870130
13	22/12/2010 03:00	2275948052	29	7965818182
	22/12/2010 12:00	2275948052	22	10241766234
	22/12/2010 15:00	4551896104	80	5689870130
	22/12/2010 21:00	3413922078	12	6827844156
14	23/12/2010 03:00	2275948052	40	5689870130
	23/12/2010 12:00	2275948052	25	9103792208
	23/12/2010 15:00	10241766234	56	18207584416
	23/12/2010 21:00	6827844156	13	9103792208
15	24/12/2010 03:00	3413922078	75	4551896104
	24/12/2010 12:00	2275948052	100	2275948052
	24/12/2010 15:00	2275948052	67	3413922078
	24/12/2010 21:00	0	14	0
16	25/12/2010 03:00	0	0	0
	25/12/2010 12:00	0	0	0
	25/12/2010 15:00	2275948052	100	2275948052
	25/12/2010 21:00	0	15	0
17	26/12/2010 03:00	0	0	0
	26/12/2010 12:00	3413922078	100	3413922078
	26/12/2010 15:00	4551896104	80	5689870130
	26/12/2010 21:00	6827844156	16	7965818182
18	27/12/2010 03:00	9103792208	80	11379740260
	27/12/2010 12:00	12517714286	100	12517714286
	27/12/2010 15:00	1137974026	10	11379740260
	27/12/2010 21:00	7965818182	17	7965818182
19	28/12/2010 03:00	11379740260	91	12517714286
	28/12/2010 12:00	11379740260	100	11379740260
	28/12/2010 15:00	12517714286	100	12517714286
	28/12/2010 21:00	7965818182	18	9103792208

20	29/12/2010 03:00	9103792208	89	10241766234
	29/12/2010 12:00	12517714286	92	13655688312
	29/12/2010 15:00	13655688312	86	15931636364
	29/12/2010 21:00	12517714286	19	13655688312
21	30/12/2010 03:00	9103792208	100	9103792208
	30/12/2010 12:00	7965818182	100	7965818182
	30/12/2010 15:00	10241766234	100	10241766234
	30/12/2010 21:00	11379740260	20	11379740260
22	31/12/2010 03:00	5689870130	100	5689870130
	31/12/2010 12:00	6827844156	86	7965818182
	31/12/2010 15:00	10241766234	100	10241766234
	31/12/2010 21:00	6827844156	21	6827844156
23	01/01/2011 03:00	7965818182	100	7965818182
	01/01/2011 12:00	9103792208	100	9103792208
	01/01/2011 15:00	11379740260	100	11379740260
	01/01/2011 21:00	14793662338	22	14793662338
24	02/01/2011 03:00	13655688312	100	13655688312
	02/01/2011 12:00	17069610390	100	17069610390
	02/01/2011 15:00	18207584416	100	18207584416
	02/01/2011 21:00	9103792208	23	9103792208
25	03/01/2011 03:00	4551896104	100	4551896104
	03/01/2011 12:00	2275948052	100	2275948052
	03/01/2011 15:00	5689870130	100	5689870130
	03/01/2011 21:00	7965818182	24	7965818182
26	04/01/2011 03:00	11379740260	100	11379740260
	04/01/2011 12:00	12517714286	100	12517714286
	04/01/2011 15:00	9103792208	89	10241766234
	04/01/2011 21:00	10241766234	25	11379740260
27	05/01/2011 03:00	5689870130	100	5689870130
	05/01/2011 12:00	7965818182	100	7965818182
	05/01/2011 15:00	10241766234	100	10241766234
	05/01/2011 21:00	6827844156	26	6827844156
28	06/01/2011 03:00	9103792208	100	9103792208
	06/01/2011 12:00	7965818182	100	7965818182
	06/01/2011 15:00	9103792208	80	11379740260
	06/01/2011 21:00	14793662338	27	14793662338
29	07/01/2011 03:00	13655688312	100	13655688312
	07/01/2011 12:00	17069610390	100	17069610390
	07/01/2011 15:00	19345558442	100	19345558442
	07/01/2011 21:00	20483532468	28	20483532468

**Anexo 6. Concentraciones de Sulfuro de Hidrogeno tomadas en muestras de
aire ambiente (Biofiltro Blanco)**

Día	Tiempo (días)	CONC. PPM		CONC. µg/m3		CR (µg/m3.h)	ER	C (µg/m3.h)
		Cg ent	Cg sal	Cg ent	Cg sal			
1	10/12/2010 03:00	0	0	0	0	0	0	0
	10/12/2010 12:00	0	0	0	0	0	0	0
	10/12/2010 15:00	0	0	0	0	0	0	0
	10/12/2010 21:00	0	0	0	0	0	0	0
2	11/12/2010 03:00	0	0	0	0	0	0	0
	11/12/2010 12:00	0	0	0	0	0	0	0
	11/12/2010 15:00	0	0	0	0	0	0	0
	11/12/2010 21:00	0	0	0	0	0	0	0
3	12/12/2010 03:00	0	0	0	0	0	0	0
	12/12/2010 12:00	0	0	0	0	0	0	0
	12/12/2010 15:00	0	0	0	0	0	0	0
	12/12/2010 21:00	0	0	0	0	0	0	0
4	13/12/2010 03:00	0	0	0	0	0	0	0
	13/12/2010 12:00	0	0	0	0	0	0	0
	13/12/2010 15:00	0	0	0	0	0	0	0
	13/12/2010 21:00	0	0	0	0	0	0	0
5	14/12/2010 03:00	0	0	0	0	0	0	0
	14/12/2010 12:00	0	0	0	0	0	0	0
	14/12/2010 15:00	0	0	0	0	0	0	0
	14/12/2010 21:00	0	0	0	0	0	0	0
6	15/12/2010 03:00	0	0	0	0	0	0	0
	15/12/2010 12:00	0	0	0	0	0	0	0
	15/12/2010 15:00	0	0	0	0	0	0	0
	15/12/2010 21:00	0	0	0	0	0	0	0
7	16/12/2010 03:00	0	0	0	0	0	0	0
	16/12/2010 12:00	0	0	0	0	0	0	0
	16/12/2010 15:00	0	0	0	0	0	0	0
	16/12/2010 21:00	0	0	0	0	0	0	0
8	17/12/2010 03:00	0	0	0	0	0	0	0
	17/12/2010 12:00	0	0	0	0	0	0	0
	17/12/2010 15:00	0	0	0	0	0	0	0
	17/12/2010 21:00	0	0	0	0	0	0	0
9	18/12/2010 03:00	0	0	0	0	0	0	0
	18/12/2010 12:00	0	0	0	0	0	0	0
	18/12/2010 15:00	0	0	0	0	0	0	0
	18/12/2010 21:00	0	0	0	0	0	0	0
10	19/12/2010 03:00	0	0	0	0	0	0	0
	19/12/2010 12:00	0	0	0	0	0	0	0

	19/12/2010 15:00	0	0	0	0	0	0	0
	19/12/2010 21:00	0	0	0	0	0	0	0
11	20/12/2010 03:00	0	0	0	0	0	0	0
	20/12/2010 12:00	0	0	0	0	0	0	0
	20/12/2010 15:00	0	0	0	0	0	0	0
	20/12/2010 21:00	0	0	0	0	0	0	0
12	21/12/2010 03:00	0	0	0	0	0	0	0
	21/12/2010 12:00	0	0	0	0	0	0	0
	21/12/2010 15:00	0	0	0	0	0	0	0
	21/12/2010 21:00	0	0	0	0	0	0	0
13	22/12/2010 03:00	0	0	0	0	0	0	0
	22/12/2010 12:00	0	0	0	0	0	0	0
	22/12/2010 15:00	0	0	0	0	0	0	0
	22/12/2010 21:00	0	0	0	0	0	0	0
14	23/12/2010 03:00	0	0	0	0	0	0	0
	23/12/2010 12:00	0	0	0	0	0	0	0
	23/12/2010 15:00	0	0	0	0	0	0	0
	23/12/2010 21:00	0	0	0	0	0	0	0
15	24/12/2010 03:00	0	0	0	0	0	0	0
	24/12/2010 12:00	0	0	0	0	0	0	0
	24/12/2010 15:00	0	0	0	0	0	0	0
	24/12/2010 21:00	0	0	0	0	0	0	0
16	25/12/2010 03:00	0	0	0	0	0	0	0
	25/12/2010 12:00	0	0	0	0	0	0	0
	25/12/2010 15:00	0	0	0	0	0	0	0
	25/12/2010 21:00	0	0	0	0	0	0	0
17	26/12/2010 03:00	0	0	0	0	0	0	0
	26/12/2010 12:00	0	0	0	0	0	0	0
	26/12/2010 15:00	0	0	0	0	0	0	0
	26/12/2010 21:00	0	0	0	0	0	0	0
18	27/12/2010 03:00	0	0	0	0	0	0	0
	27/12/2010 12:00	0	0	0	0	0	0	0
	27/12/2010 15:00	0	0	0	0	0	0	0
	27/12/2010 21:00	0	0	0	0	0	0	0
19	28/12/2010 03:00	0	0	0	0	0	0	0
	28/12/2010 12:00	0	0	0	0	0	0	0
	28/12/2010 15:00	0	0	0	0	0	0	0
	28/12/2010 21:00	0	0	0	0	0	0	0
20	29/12/2010 03:00	0	0	0	0	0	0	0

	29/12/2010 12:00	0	0	0	0	0	0	0
	29/12/2010 15:00	0	0	0	0	0	0	0
	29/12/2010 21:00	0	0	0	0	0	0	0
21	30/12/2010 03:00	0	0	0	0	0	0	0
	30/12/2010 12:00	0	0	0	0	0	0	0
	30/12/2010 15:00	0	0	0	0	0	0	0
	30/12/2010 21:00	0	0	0	0	0	0	0
22	31/12/2010 03:00	0	0	0	0	0	0	0
	31/12/2010 12:00	0	0	0	0	0	0	0
	31/12/2010 15:00	0	0	0	0	0	0	0
	31/12/2010 21:00	0	0	0	0	0	0	0
23	01/01/2011 03:00	0	0	0	0	0	0	0
	01/01/2011 12:00	0	0	0	0	0	0	0
	01/01/2011 15:00	0	0	0	0	0	0	0
	01/01/2011 21:00	0	0	0	0	0	0	0
24	02/01/2011 03:00	0	0	0	0	0	0	0
	02/01/2011 12:00	0	0	0	0	0	0	0
	02/01/2011 15:00	0	0	0	0	0	0	0
	02/01/2011 21:00	0	0	0	0	0	0	0
25	03/01/2011 03:00	0	0	0	0	0	0	0
	03/01/2011 12:00	0	0	0	0	0	0	0
	03/01/2011 15:00	0	0	0	0	0	0	0
	03/01/2011 21:00	0	0	0	0	0	0	0
26	04/01/2011 03:00	0	0	0	0	0	0	0
	04/01/2011 12:00	0	0	0	0	0	0	0
	04/01/2011 15:00	0	0	0	0	0	0	0
	04/01/2011 21:00	0	0	0	0	0	0	0
27	05/01/2011 03:00	0	0	0	0	0	0	0
	05/01/2011 12:00	0	0	0	0	0	0	0
	05/01/2011 15:00	0	0	0	0	0	0	0
	05/01/2011 21:00	0	0	0	0	0	0	0
28	06/01/2011 03:00	0	0	0	0	0	0	0
	06/01/2011 12:00	0	0	0	0	0	0	0
	06/01/2011 15:00	0	0	0	0	0	0	0
	06/01/2011 21:00	0	0	0	0	0	0	0
29	07/01/2011 03:00	0	0	0	0	0	0	0
	07/01/2011 12:00	0	0	0	0	0	0	0
	07/01/2011 15:00	0	0	0	0	0	0	0
	07/01/2011 21:00	0	0	0	0	0	0	0

Anexo 7. Registro Fotográfico



