

**DISEÑO, MONTAJE, PUESTA EN MARCHA Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA  
DE BIOFILTRACIÓN A ESCALA BANCO PARA LA REMOCIÓN DE VAPORES  
DE FORMALDEHIDO**

**JOHAN SEBASTIAN ARIAS RINCÓN**

**LUIS FERNANDO TOVAR BRICEÑO**

**UNIVERSIDAD LIBRE**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**BOGOTÁ D.C.**

**2008**

**DISEÑO, MONTAJE, PUESTA EN MARCHA Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA  
DE BIOFILTRACIÓN A ESCALA BANCO PARA LA REMOCIÓN DE VAPORES  
DE FORMALDEHIDO**

**JOHAN SEBASTIAN ARIAS RINCÓN**

**LUIS FERNANDO TOVAR BRICEÑO**

**PROYECTO DE GRADO No. 597-764**

**DIRECTORA:**

**MSc Ing. ASTRID DEL SOCORRO ALTAMAR CONSUEGRA**

**Ingeniera Química**

**UNIVERSIDAD LIBRE**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**BOGOTÁ D.C.**

**2008**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

\_\_\_\_\_  
**Firma del Presidente del Jurado**

\_\_\_\_\_  
**Firma del Jurado**

\_\_\_\_\_  
**Firma del Jurado**

*A Dios, quien es el que nos ilumina día a día para  
superar nuestros problemas y ver aquello por lo  
cual queremos luchar y vivir*

*"El azar no existe; Dios no juega a los dados."*

***Albert Einstein.***

*A mis Padres, que a través de sus consejos me  
permitieron salir adelante, y me dieron su apoyo  
incondicional*

***Sebastian***

*A mi Madre quien creó valores en mí para que  
alcanzara esta meta brindándome su amor y sabio  
conocimiento.*

***Fernando***

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Ingeniera Astrid Altamar, por su asesoría, apoyo y motivación en la investigación.

Al Profesor Humberto Torres Llerena, por permitirnos aprender de su gran experiencia y por el invaluable apoyo dado a este proyecto.

A Leidy y Javier por trabajar al lado de nosotros, y servir de auxiliares de investigación en el desarrollo del proyecto.

A María Fernanda Vargas, Ángela Domínguez y Germán Vásquez quienes nos permitieron desarrollar nuestro proyecto en el laboratorio, apoyándonos en todo aquello que necesitamos

A nuestras familias que nos brindaron apoyo incondicional durante el desarrollo del proyecto.

A todos aquellos que apreciaron este proyecto y aportaron con sus reflexiones y comentarios al desarrollo de éste.

## RESUMEN

En este documento se presentan los resultados obtenidos de la remoción de vapores de formaldehído usando un sistema de biofiltración de cuatro secciones, cuyo medio de soporte fue una mezcla de compost cascarilla de arroz. La investigación se realizó a escala banco en condiciones de laboratorio en donde se hizo un diseño del sistema para su posterior operación y luego se hizo el montaje del sistema de biofiltración en el laboratorio de microbiología de la Universidad Libre.

La investigación se realizó en dos etapas, la primera fue una fase de aclimatación en donde se llevó el biofiltro a condiciones óptimas para luego pasar a la fase de experimentación aplicada en donde se monitorearon variables como pH, humedad, eficiencia de remoción entre otras, para determinar la funcionalidad del reactor biológico como mecanismo de control de contaminantes gaseosos, debido a procesos de degradación por parte de microorganismos propios del compost que utilizan tales sustancias como fuente de carbono para sus procesos biológicos.

Los datos obtenidos de la experimentación muestran que se alcanzan eficiencias de remoción cercanas al 92%, ratificando que el este tipo de sistema de control es una alternativa para solucionar los problemas generados en los diferentes procesos productivos que utilizan este tipo de sustancias.

**PALABRAS CLAVES:** Biofiltración, biofiltro, formaldehído, compost, tratamiento de aire, biotecnología, compuestos orgánicos volátiles.

## ABSTRACT

This document presents the review of the data collected from the biofiltration system used for the elimination of formaldehyde. The design of the biofilter included four sections and a compost-rice bark bed. The research was done in a bench scale, at laboratory conditions. This bioreactor was placed at the Microbiology Laboratory, in the Universidad Libre.

The research was done in two steps. The first was an acclimatization period, in order to stabilize the compost-rice bark media. Subsequently, the biofilter was evaluated to measure pH, moisture, removal efficiency and others. Therefore, this variables are important to determinate the reactor's functionality as an air treatment system, using microbiological degradation processes to the pollutant substances, in where the microorganisms used this as carbon sources. The experimental data shows that removal efficiencies higher than 90% were obtained.

**KEY WORDS:** Biofiltration, biofilter, formaldehyde, compost, air treatment, biotechnology, Volatile organic compounds.

# TABLA DE CONTENIDO

<u>INTRODUCCIÓN</u> .....	21
<u>1. OBJETIVOS</u> .....	22
<u>2. JUSTIFICACIÓN</u> .....	23
<u>3. PROBLEMA</u> .....	25
<u>3.1. PLANTEAMIENTO</u> .....	25
<u>3.2. FORMULACIÓN</u> .....	26
<u>3.3. HIPÓTESIS</u> .....	27
<u>3.4. VARIABLES</u> .....	27
<u>4. DELIMITACIÓN</u> .....	29
<u>5. MARCOS DE REFERENCIA</u> .....	30
<u>5.1. ANTECEDENTES</u> .....	30
<u>5.2. MARCO TEÓRICO</u> .....	34
<u>5.2.1. BIOFILTRACIÓN</u> .....	34
<u>5.2.2. BIOFILTRO</u> .....	36
<u>5.3. MARCO CONCEPTUAL</u> .....	47
<u>5.3.1. COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES (COV)</u> .....	47
<u>5.3.2. FORMALDEHIDO</u> .....	52
<u>5.3.3. COMPOST</u> .....	59



<u>5.4. MARCO METODOLÓGICO</u> .....	62
<u>5.4.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN</u> .....	62
<u>5.4.2. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS</u> .....	62
<u>5.4.3. PROCESO METODOLÓGICO</u> .....	62
<u>6. MÉTODOS</u> .....	64
<u>6.1. Método para la determinación de formaldehído en aire:</u> .....	64
<u>6.2. Método para caracterización del medio de soporte:</u> .....	64
<u>7. RESULTADOS OBTENIDOS</u> .....	66
<u>7.1. Diseño del equipo de biofiltración a escala banco.</u> .....	66
<u>7.2. Montaje del equipo de biofiltración.</u> .....	71
<u>7.3. Puesta en marcha el equipo de biofiltración.</u> .....	75
<u>7.3.1. Toma de muestras</u> .....	75
<u>7.3.2. Experimentación</u> .....	78
<u>8. ANÁLISIS DE RESULTADOS</u> .....	86
<u>8.1. Método de análisis.</u> .....	86
<u>8.2. Condiciones de humedad.</u> .....	87
<u>8.3. Condiciones de pH.</u> .....	88
<u>8.4. Fase de aclimatación.</u> .....	89
<u>8.5. Perfil de concentración en el equipo.</u> .....	90
<u>8.6. Eficiencia de remoción:</u> .....	94
<u>9. CONCLUSIONES</u> .....	99

<a href="#">10. RECOMENDACIONES</a> .....	101
<a href="#">11. BIBLIOGRAFÍA</a> .....	102

## LISTA DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Norma ASTM E1333-96 (Re-aprobada: 2002). Método Estándar para la determinación de Concentraciones de Formaldehído en aire y tasas de emisión de productos de madera usando una cámara amplia.....	100
<b>Anexo 2.</b> Norma NIOSH 3500. Método espectrofotométrico para la determinación de Concentraciones de Formaldehído en aire mediante ácido cromotrópico.....	113
<b>Anexo 3.</b> Determinación de parámetros Físico-Químicos del Compost.....	119
<b>Anexo 4.</b> Curva de Calibración para Determinación de Concentración de Formaldehído por Método del Acido Cromotropico, Métodos NIOSH 3500 y ASTM E1333.....	122
<b>Anexo 5.</b> Datos de muestreo – Fase de Experimentación Aplicada.....	126
<b>Anexo 6.</b> Hoja de seguridad – Formaldehído.....	135
<b>Anexo 7.</b> Evaluación del Sistema. Tabla de resultados de remoción de Formaldehído.....	144
<b>Anexo 8.</b> Estudio de la eficiencia de remoción. Análisis estadístico para la evaluación por secciones en el Biofiltro.....	151

## LISTA DE TABLAS

<a href="#">Tabla 1. Variable del Problema.....</a>	27
<a href="#">Tabla 2. Muestra de algunas Investigaciones relativas a la Biofiltración de COVs..</a>	32
<a href="#">Tabla 3. Tecnologías de control existentes para COV .....</a>	49
<a href="#">Tabla 4. Datos Físico-químicos básicos de Formaldehído..</a>	53
<a href="#">Tabla 5. Datos de Toxicidad en humanos y animales.....</a>	56
<a href="#">Tabla 6. Umbrales máximos permitidos por autoridades ambientales y sanitarias en el mundo.....</a>	58
<a href="#">Tabla 7. Propiedades Físicas de las Sustancias .....</a>	69
<a href="#">Tabla 8. Balance de materia.....</a>	69
<a href="#">Tabla 9. Parámetros de Diseño sistema de Biofiltración.....</a>	71

## LISTA DE FIGURAS

<a href="#">Figura 1. Capacidad de Eliminación típica vs Curva de Carga</a> .....	45
<a href="#">Figura 2. Limites de Aplicación según Delhoménie et al. (2005)</a> .....	48
<a href="#">Figura 3. Esquema del sistema de biofiltración a escala Banco. Fuente: Autores.</a> .....	68
<a href="#">Figura 4. Montaje del Biofiltro.</a> .....	73
<a href="#">Figura 5. Vista del humidificador y Burbujeador de Formaldehido.</a> .....	74
<a href="#">Figura 6. Sistema de Biofiltración de Formaldehido, Montaje Definitivo</a> .....	74
<a href="#">Figura 7. Muestreadores de Formaldehido.</a> .....	76
<a href="#">Figura 8. Curva de calibración para determinar la masa de formaldehido.</a> .....	78
<a href="#">Figura 9. Comportamiento del Sistema de Biofiltración durante la aclimatación.</a> .....	79
<a href="#">Figura 10. Concentraciones de entrada y salida monitoreadas en la fase de experimentación aplicada.</a> .....	80
<a href="#">Figura 11. Comportamiento del biofiltro en las secciones inferiores</a> .....	81
<a href="#">Figura 12. Comportamiento de las secciones del Biofiltro Secciones (3 y 4)</a> .....	83
<a href="#">Figura 13. Comportamiento de la Humedad durante la fase de experimentación aplicada</a> ..	84
<a href="#">Figura 14. Comportamiento del pH, durante la fase de experimentación aplicada.</a> .....	85
<a href="#">Figura 15. Comportamiento de la eficiencia de remoción en las diferentes secciones del biofiltro</a> .....	91
<a href="#">Figura 16. Eficiencia de remoción acumulada a la largo del biofiltro.</a> .....	93
<a href="#">Figura 17. Eficiencia de remoción en el Biofiltro.</a> .....	95
<a href="#">Figura 18. Comportamiento de la eficiencia de remoción con respecto a la concentración.</a> .	96
<a href="#">Figura 19. Comportamiento de la capacidad de eliminación con respecto a la carga.</a> .....	98

## INTRODUCCIÓN

La sociedad humana, en medio de su afán por mejorar sus condiciones de vida, ha generado situaciones que ponen en peligro su misma existencia. Bien sea a través de los medios de transporte, las comunicaciones, los procesos productivos de las diferentes actividades económicas, y hasta en el mismo hogar, cada vez más el hombre está recibiendo la contaminación que él mismo genera.

Sin embargo, utilizando las herramientas adecuadas, no solamente se podría reducir el impacto ambiental y sanitario que el hombre se causa a sí mismo y al ambiente, sino que podría llegar al punto de no generación de residuos, aunque por el momento solo sea una vana ilusión de personas que desean un futuro mejor.

Aunque este documento no se centre en este tema, si abarca la problemática generada por la contaminación atmosférica a través de un diseño, montaje y análisis de un sistema de control, mediante el uso de microorganismos que degradan de forma eficiente contaminantes orgánicos utilizados en sinnúmero de actividades económicas y procesos industriales. Mediante este documento, se busca cumplir el deseo de los autores de mitigar y disminuir en forma sustancial este problema que consume al planeta, mientras se idean mecanismos de Desarrollo Limpio que involucren el uso mínimo de tales compuestos con el fin de preservar la sostenibilidad humana y ambiental actual y futura.

## **1. OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Realizar el diseño, construcción y posterior funcionamiento a escala banco de un sistema de biofiltración con el fin de medir la eficiencia de remoción de Formaldehído, presente en una corriente de aire contaminada.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Diseñar un Sistema de Biofiltración (biofiltro, humidificadores) que permita evaluar la remoción de Compuestos orgánicos Volátiles (COV), y en especial de Formaldehído, de una corriente de aire contaminada.
- Hacer el montaje de un Sistema de Biofiltración a escala banco, según los parámetros dados en la etapa de diseño.
- Seleccionar e implementar una técnica analítica para la determinación de formaldehído.
- Establecer la eficiencia de remoción de Formaldehído en una corriente de aire mediante el uso de un Sistema de Biofiltración.

## 2. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad la problemática ambiental se ha vuelto más visible dentro de la sociedad y uno de los elementos más afectados es el aire. Las actividades industriales generan emisiones de diversas sustancias, entre las que encontramos una amplia gama de compuestos nocivos para el ambiente y el ser humano, como son los compuestos orgánicos volátiles – COV –, los cuales contribuyen –entre otros problemas ambientales– a la destrucción del ozono troposférico, el calentamiento global, y problemas asociados a la salud pública debido a su alta toxicidad.

Sin embargo, no se han desarrollado tecnologías de fácil acceso para reducir las emisiones de éstos contaminantes; y las tecnologías existentes son costosas y complejas en su diseño, implementación, operación y mantenimiento, además de generar externalidades negativas al ambiente y la sociedad. Teniendo presente lo anterior, se considera urgente desarrollar alternativas que permitan disminuir el impacto ambiental generado por los compuestos orgánicos volátiles al ambiente de una manera accesible desde diversos puntos de vista que influyen en las tomas de decisiones en proyectos de esta índole – ambiental, económico, sociocultural, etc.–

Es por ello que se considera la biofiltración como uno de los mecanismos de control de estas sustancias por sus bajos costos, simplicidad, alta eficiencia de remoción y finalmente, la no generación de residuos o subproductos indeseables durante su operación y mantenimiento. No obstante, existe muy poca información sobre las posibles experiencias sobre el uso de esta tecnología en el país con respecto a nivel industrial, así como experiencias a nivel académico – las cuales son limitadas–; de ahí subyace la importancia de realizar investigación en esta área de aplicación de la Ingeniería Ambiental a nivel académico con el fin de dejar



una base técnico–científica que permita la construcción de biofiltros a una escala mayor de la cual pueda beneficiarse la industria nacional en sus diferentes actividades económicas.

### **3. PROBLEMA**

#### **3.1. PLANTEAMIENTO**

La contaminación atmosférica se relaciona a las actividades antrópicas, aunque la naturaleza también tiene un efecto contaminante; ésta se agudiza con el aumento de la población y las actividades derivadas de la industrialización y del uso masivo de los diferentes medios de transporte. Puesto que la mayor parte de las fuentes de contaminación se producen por el uso de combustibles fósiles, tales como el carbón, petróleo, gasolina y gas natural, produce gases nocivos para el hombre y el ambiente, entre otros, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles (COV). Estos últimos son sustancias químicas orgánicas cuya base es el carbono y se evaporan a temperatura y presión ambiental generando vapores, que son emitidos por industrias como las de pintura, calzado, siderurgia, madera y en todas aquellas en donde se empleen disolventes orgánicos.

Los COV son precursores del ozono troposférico ya que como consecuencia de su reacción con los óxidos de nitrógeno presentes en la atmósfera y la luz solar, el cual es un contaminante secundario que es perjudicial para los seres humanos y las plantas, considerado como criterio de calidad de aire. Sin embargo los efectos de los COV no solo se presentan a nivel superficial, algunos de ellos son destructores del ozono estratosférico, por lo que han sido compuestos a los que el protocolo de Montreal les ha fijado la reducción de sus emisiones.

Además de los efectos de los COV al medio ambiente también se debe considerar sus consecuencias en la salud; La principal vía de entrada de estos al organismo es la inhalatoria, al producir vapores con facilidad. La otra vía de entrada es por contacto, de manera que la piel de las personas puede quedar impregnada de estas sustancias, generando efectos psiquiátricos como irritabilidad, dificultades de concentración; Problemas en el aparato respiratorio y algunos de ellos además son carcinogénicos (como el benceno).

Aun cuando el compuesto químico a utilizar dentro de este estudio no es considerado un COV, el Formaldehído, en forma libre es gaseoso a temperatura ambiente, y está reconocido como uno de los contaminantes más importantes a controlar para evaluar la calidad del aire interior. Sin embargo, por sus propiedades físicas y químicas, así como por sus efectos sobre la salud y el medio ambiente, autoridades ambientales de todo el mundo han identificado la necesidad de controlar el uso de esta sustancia, ya que muchos trabajadores se encuentran expuestos debido al uso de esta sustancia en múltiples procesos industriales – se estima que alrededor de un millón de personas en Europa están expuestas a esta sustancia –. Por lo tanto, el Formaldehído, junto con los COV, forman parte de una gran problemática que está afectando al mundo<sup>1</sup>.

Además, el formaldehído ha sido declarado por la Organización Mundial de la Salud como un agente cancerígeno. En el año 2004, un grupo de 26 científicos de 10 países, reunidos en la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC), tras evaluar el conocimiento científico existente, concluyó que existe evidencia suficiente para considerar que “el formaldehído provoca cáncer rinofaríngeo en el hombre”.

Por lo anteriormente expuesto, es necesario tomar medidas en el sentido de controlar la contaminación atmosférica en los lugares donde exista la presencia de los COV, y de manera muy especial, del formaldehído.

### **3.2. FORMULACIÓN**

Este proyecto de grado busca construir un Sistema de Biofiltración en el laboratorio de Microbiología de la Universidad, para el control de emisiones de

---

<sup>1</sup> Revista Española de Patología. 2005.

Formaldehido, realizando un diseño preliminar y una prueba posterior que permita medir su efectividad en la reducción de los contaminantes en una corriente de aire.

### 3.3. HIPÓTESIS

Para el presente documento, se definieron dos hipótesis que se validaron durante el desarrollo del proyecto. Estas hipótesis, serán objeto de discusión en los capítulos posteriores, en razón con los resultados obtenidos mediante la experimentación con el Sistema de Biofiltración.

- Al aumentar la concentración de Formaldehido dentro de la corriente de aire que alimenta el Sistema de Biofiltración, la remoción del mismo se reduce.
- Al disminuir el caudal que entra al Sistema de Biofiltración, la remoción de Formaldehido aumenta.

### 3.4. VARIABLES

A continuación se presentan las variables que se tuvieron en cuenta durante el desarrollo del proyecto de investigación, las cuales están relacionadas en la Tabla 1.

**Tabla 1. Variable del Problema.**

TIPO	VARIABLE
INDEPENDIENTES	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentración de Formaldehido a la Entrada</li> <li>• Carga Superficial Aplicada</li> <li>• Tiempo de Corrida</li> <li>• Caudal</li> <li>• Humedad del Lecho</li> </ul>
INTERVINIENTES	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pH</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"><li>• Temperatura</li></ul>
DEPENDIENTES	<ul style="list-style-type: none"><li>• Concentración de Formaldehído a la salida</li><li>• Biomasa Total</li><li>• Biomasa Activa</li><li>• Eficiencia de Remoción</li><li>• Capacidad de Eliminación</li></ul>

**Fuente: Autores**

#### **4. DELIMITACIÓN**

**Espacio:**

Laboratorio de Microbiología, Bloque D, Universidad Libre, Sede Bosque Popular.

**Temática:**

Control de la contaminación atmosférica mediante procesos biológicos.

**Tiempo:**

Noviembre 2007 – Junio 2008.

## 5. MARCOS DE REFERENCIA

A continuación se presentarán los antecedentes existentes referentes al tema de la investigación, así como el marco teórico, marco conceptual y el marco metodológico.

### 5.1. ANTECEDENTES

En los gases producidos en las operaciones de recuperación de suelos y aguas subterráneas, de procesos industriales, y de sistemas de tratamiento de aguas residuales existen contaminantes en fase vapor. En tales casos el tratamiento de los contaminantes en dicha fase es un artefacto fortuito más que un sistema diseñado ingenierilmente. Los procesos que se han diseñado para el tratamiento biológico de los contaminantes en fase vapor han sido casi enteramente del tipo de cultivo fijado a un soporte o biopelícula.

Los primeros registros que se encuentran sobre biofiltración datan de 1923 en una publicación que discute el concepto de control de emisiones olores de lodos de aguas residuales y compostaje usando lechos sólidos. (Ergas et al. 2004)

Los biofiltros se vienen utilizando desde mediados de los años cincuenta para el control de olores en plantas de tratamiento de aguas residuales, en plantas de compostaje y de procesos industriales. Los primeros sistemas biopelícula diseñados ingenierilmente fueron utilizados para controlar los olores en las plantas de tratamiento de aguas residuales. El material soporte de relleno utilizado en los primeros sistemas eran suelo, y las velocidades de filtración fueron relativamente bajas. Estos sistemas se denominaron filtros de suelo y cuando se empezaron a utilizar otros tipos de soporte o relleno se adoptó el término de biofiltros.

En los años setenta, el interés por la biofiltración aumentó con la imposición de una regulación más estricta en calidad de aire, inicialmente se desarrollaron

sistemas nuevos sistemas en Alemania y los Países bajos. Sin embargo, la aplicación de los procesos de biofiltración al control de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles es una tecnología innovadora que ha ido ganando aceptación en las últimas dos décadas. En la tabla 2 se presenta un resumen de estudios recientes de campo y de laboratorio sobre los sistemas de biofiltración.

En Colombia, el grupo de investigación de biofiltros de la Universidad del Valle ha venido investigando esta tecnología; buscando solucionar problemas de olores y gases contaminantes, provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales, este grupo opera desde al año 1995 en el campo del control de olores, y cuentan con una miniplanta de flujo continuo (Bench Scale) para prueba de tratamiento de gases combustibles y de aire para la remoción de olores.

Otro caso a nivel país que se conoce es el diseño de un sistema de biofiltración para la remoción de estireno, que se realizo en la escuela de Ingeniería de Antioquia en 2005. Realizado por Jiménez et al., en donde se plantea un enfoque novedoso con respecto a la salud pública. Es posible que existan otros casos a nivel país pero estos aun no se han publicado o la información es incipiente.



Tabla 2. Muestra de algunas Investigaciones relativas a la Biofiltración de COVs.

Referencia	Material de Relleno	Compuestos	Concentración Afluente (ppm <sub>v</sub> )	Tiempo de retención (min)	Eficiencia del filtro (%)
Ottengraf y Van der Oever (1983)	Compost	Tolueno Acetato de Butilo Acetato de etilo n-Butanol	73 – 1400 10 – 290 20 – 400 200	0.68 – 1.2	40 – 99
Kampbell et al. (1987)	Suelo	n-Propano - n-Butano - n-Butano	2000 (como HC <sub>tot</sub> )	15	>85
Utgikar et al. (1991)	CAG	Tolueno Diclorometano	50 – 1000 1000 – 3500	1.8	75 – 99 20 – 60
Togna & Folson (1992)	Turba	Estireno	200 – 300	0.5 – 1	90 – 95
Deshusses y Hamer (1992)	Compost y esferas de poliestireno	Metiletilcetona Metilisibutylcetona	560 – 2000	1 – 1.5	98
Leson et al. (1993)	Compost y Cortezas	Etanol Metano	500 – 2200 1000	0.2 – 0.5	50 – 90
Shareefdeen et al. (1993)	Perlita y turba	Metanol	4600	5.6	90
Peters et al (1993)	Perlita y Compost	Querosene - Gasolina	60 – 1000 Como (COT)	3	>90
Ergars et al. (1994)	Perlita y Compost	Diclorometano Tolueno	3 – 50	0.5 – 1	>96 >99
Ergars et al. (1995)	Perlita y Compost	Benceno Tolueno Xileno Diclorometano Triclorometano	– 10	0.5 – 2	83 – 95 88 – 97 88 – 93 20 – 40 20 – 40
Wright et al. (1997)	Perlita y Compost	Gasolina	100 – 1000	2	>95
Abumaizar et al. (1997)	Compost	Benceno – Tolueno -	200	0.6	≥90

Referencia	Material de Relleno	Compuestos	Concentración Afluyente (ppm <sub>v</sub> )	Tiempo de retención (min)	Eficiencia del filtro (%)
		Etilbenceno – Xileno			
Namkoong et al. (2002)	Compost	Gasolina	50-7800	10	80 – 85
Sheridan et al. (2002)	Viruta Madera	Ácido Butírico	130 – 3100	0.5 – 1	100
Vergara et al. (2005)	Compost	Tolueno	1000 – 3200	0.98	93 -95
Pagans et al. (2006)	Compost	Amoniaco y COV, simultáneamente	2000	2	94
Chun Chang et al. (2007)	Turba	Acetona - Metiletilcetona Metilisisbutilcetona	200	1.5 -2	>99

Fuente: DEVINNY et al. (1999), Compilación de los autores.

## **5.2. MARCO TEÓRICO**

### **5.2.1. BIOFILTRACIÓN**

La biofiltración es una técnica por medio de la cual un contaminante en fase gaseosa se convierte en productos de oxidación como dióxido de carbono, agua y sales inorgánicas. La biofiltración se refiere al uso de un medio biológicamente activo para remover contaminantes de una corriente de residuos. La mayor parte de la literatura se refiere a la biofiltración como un proceso que utiliza un medio biológicamente activo para remover y degradar compuestos orgánicos volátiles que causan malos olores (Epstein, 1997).

Esta técnica ha sido empleada desde los años sesenta, sin embargo durante la última década su uso ha incrementado en algunos países industrializados en el tratamiento de grandes volúmenes de corrientes de aire con bajas concentraciones de contaminante.

Los biofiltros con lecho de compost pueden ser utilizados exitosamente en la remoción de compuestos orgánicos volátiles (COV) y su capacidad de remoción de concentraciones relativamente altas de estos tipos de contaminantes los hacen adecuados para aplicarse en una amplia gama de situaciones, desde plantas de tratamiento de aguas residuales hasta las plantas procesadoras de alimentos que generan efluentes con muchos olores (Lesson y Winer, 1991).

En un proceso típico de Biofiltración se hace pasar la corriente de gas contaminado a un pre-acondicionador de la corriente donde se remueven las partículas y se humidifica el gas en caso de ser necesario. La corriente acondicionada se hace pasar de forma ascendente a través de un Biofiltro activo que consiste en un reactor de lecho empacado con un material orgánico o inerte, el cual proporciona a los microorganismos una superficie para su inmovilización y crecimiento. A medida que la corriente gaseosa

atraviesa el lecho, el contaminante se difunde de la fase gaseosa a la fase líquida o sólida que se encuentra en el lecho, y posteriormente se transfiere a los microorganismos donde es biodegradado (EPA, 1998).

La biofiltración se ha empleado con éxito para la remoción de contaminantes en residuos. Se ha utilizado una gran variedad de medios, como suelo, carbón mineral, ceniza volcánica, corteza de árbol molida o mezclas de éstos y otros materiales (Epstein, 1997). La selección del medio puede afectar el desempeño del Biofiltro, ya que este determina las condiciones ambientales para los microorganismos; sin embargo, éstos constituyen el componente más relevante en el biofiltro ya que llevan a cabo la transformación o destrucción del contaminante.

El uso de este tipo de tecnología constituye una alternativa interesante frente a las tecnologías convencionales de purificación de gases ya que a través de la Biofiltración se pueden alcanzar eficiencias cercanas al 90% en la remoción de los contaminantes del aire más comunes: adicionalmente los costos de inversión y operación resultan bajos para corrientes de aire donde la concentración de contaminante no supera las 1000 ppmv, y los requerimientos energéticos son mínimos.

La biofiltración involucra dos acciones principales (Epstein, 1997):

1. Adsorción física en las partículas de conforman el sustrato.
2. Degradación microbiológica del compuesto.

La acción microbiológica puede incluir el metabolismo, utilización u oxidación de compuestos orgánicos. El compost contiene una población endógena de bacterias, hongos y actinomicetos. También, el compost ha demostrado excelentes características de adsorción con un área superficial bastante grande, alta capacidad de intercambio y nutrientes para la población microbiana, por lo que el ambiente del compost en el biofiltro debe

mantenerse para soportar y propiciar el crecimiento máximo de los microorganismos.

### **5.2.2. BIOFILTRO**

Un biofiltro es un bioreactor de lecho fijo que posee un material de soporte (relleno), en el cual se encuentran microorganismos degradadores inmovilizados, a través del cual se hace fluir una corriente de aire contaminado. Las comunidades microbianas crecen sobre la superficie del material soporte del relleno en forma de biopelículas. Las biopelículas están compuestas por células microbianas, polisacáridos extracelulares y el agua de constitución. Ya que los microorganismos extraen todos sus nutrientes de la fase líquida debe existir alrededor de ellos una película líquida.

Según Delhómenie (2004) et al., se pueden considerar dos tipos de configuraciones de biofiltros:

- Biofiltros de diseño abierto, con flujo ascendente, instalados en el exterior porque estos requieren espacios grandes por lo tanto están expuestos a las condiciones ambientales.
- Los biofiltros de diseño cerrado necesitan volúmenes más limitados que las configuraciones abiertas, estos frecuentemente se instalan en sitio cerrados y pueden emplear flujo ascendente o descendente. (Ottengraf, 1986).

#### **5.2.2.1. PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE BIOFILTRACIÓN**

##### **Material de Relleno o Soporte**

La naturaleza del material de empaque, es un factor fundamental para el éxito en la aplicación de los biofiltros ya que este es el que proporciona el

soporte para el crecimiento microbiano. Bohn (Bohn, 1996) ha establecido una lista de características apropiadas que deben tener los materiales para el lecho filtrante, entre las más importantes se encuentran:

- Una alta área específica superficial, que es favorable para el establecimiento de la microflora y el mantenimiento y el intercambio gas/biopelícula.
- Una alta porosidad que facilite la convención del gas y promueva la distribución homogénea de los gases a lo largo del lecho.
- Una buena capacidad de retención de agua para evitar la desecación.
- Presencia y disponibilidad intrínseca de nutrientes.
- Presencia de una alta y diversa densidad de microorganismos.

En ensayos previos se han usado materiales naturales tales como suelo, compost, turba, virutas de madera y materiales sintéticos como piezas cerámicas tipo sillas Berl, anillos Pall y gránulos de tierra de diatomeas.

### **Distribución del Gas**

Los biofiltros pueden funcionar de forma ascendente o descendente. Aunque normalmente se trabaja con flujo ascendente, el funcionamiento con flujo descendente elimina el problema de retención del líquido durante la humectación por riego. Para la distribución del gas se pueden usar cuatro tipos de sistemas de distribución:

- Tuberías perforadas.
- Sistemas de cámaras de presión.
- Sistemas de bloques de Aglomerado
- Cámaras de sobrepresión o cámaras de distribución del gas (impelentes)

## Humedad

Este parámetro es de suma importancia debido a la necesidad de agua que presentan los organismos en el proceso de degradación catabólica de los gases contaminantes presentes en la corriente de aire a tratar.

Cuando hay muy poca humedad en el relleno se producen zonas secas, pérdidas de actividad microbiana y rotura del lecho. Si la humedad es demasiado alta se puede inhibir el transporte de gas y desarrollarse zonas anaerobias. Generalmente la humedad del relleno el biofiltro debe mantenerse entre el 50-65% en peso<sup>2</sup>

$$\text{Humedad} = \frac{\text{masa de agua}}{\text{masa de agua} + \text{masa de relleno seco}} \quad (1)$$

Normalmente la humedad se aporta al lecho mediante riego con agua de la superficie del lecho y mediante humectación de los gases afluentes. La humectación de los gases afluentes es esencial. La humedad del aire que entra aun biofiltro debe ser aproximadamente del 100% a la temperatura del lecho. La humedad relativa se define como la relación entre la presión parcial del vapor de agua presente en el gas y la presión de vapor del agua pura a la temperatura del gas.

$$Hr = 100 \frac{P_{H_2O}}{P_{vH_2O}} \quad (2)$$

Donde  $Hr$  = Humedad relativa en porcentaje.

$P_{H_2O}$  = Presión parcial del vapor actualmente presente en el gas.

$P_{vH_2O}$  = Presión de vapor en el agua líquida.

---

<sup>2</sup> ERGAS, Sarina. Tratamiento biológico de gases, En: Principios de biorecuperación. Madrid. Mc Graw Hill. 1999.

## **Control de pH**

Para el control de Compuestos Orgánicos Volátiles el pH del lecho deberá mantenerse en valores de pH entre 7 y 8.5. Para controlar la acidificación del lecho pueden añadirse enmiendas alcalinas de suelos agrícolas. Los materiales que tradicionalmente se usan para neutralizar suelos ácidos son hidróxidos, óxidos, carbonatos y silicatos de calcio, o de calcio magnesio. Por otra parte Yang y Allen (1994) han encontrado que el lavado periódico del biofiltro con agua destilada o con una solución de Bicarbonato de sodio elimina adecuadamente los iones hidrogeno y aumenta la vida del lecho.

## **Control de Temperatura**

La temperatura además de otros factores gobierna la velocidad de las reacciones bioquímicas. En general, al aumentar la temperatura aumenta la velocidad de la reacción hasta un valor óptimo de temperatura por encima del cual se produce una disminución en la velocidad de reacción. También se debe resaltar que un aumento desmedido en la temperatura produce la disminución en la solubilidad de algunos gases, llevando consigo a la disminución en la concentración del contaminante en la biopelícula. Atentando contra la degradabilidad y produciendo descomposición de los materiales de soporte más rápidamente.

Cada microorganismo tiene un rango óptimo de temperatura para su crecimiento. En general los microorganismos en un biofiltro son mesófilos, los cuales pueden crecer entre 15 y 45 °C y tienen un rango de crecimiento óptimo en un rango de temperatura entre 25 y 35°C.

## **Nutrientes**

Los organismos que se encuentran en el biofiltro están compuestos fundamentalmente de carbón, oxígeno, nitrógeno, hidrogeno, fósforo y azufre. Los contaminantes introducido dentro de los biofiltros son la principal



fuelle energía y carbono para la actividad microbiana. El Hidrogeno y el oxígeno se encuentran en el aire, en el medio de crecimiento y en algunos Compuestos orgánicos Volátiles. La disponibilidad de otros macronutrientes (N, P, K, S) y micronutrientes (vitaminas y metales) depende de las características del material filtrante y de la configuración del biofiltro. De hecho en materiales orgánicos como el compost poseen nutrientes esenciales para mantener la biomasa. Aunque en algunos casos, el compost puede tener deficiencias de nutrientes progresivas que llegan a ser un factor limitante para el desempeño del biofiltro. Por lo que se puede decir que en cualquier material que se utilice la adición de nutrientes va ser necesaria en algún momento de su vida útil para lograr una actividad de degradación efectiva.

### **Ecología Microbiana de La Biofiltración**

Los microorganismos son los catalizadores de la biodegradación de los contaminantes. Ellos son esenciales para la operación del proceso biológico. Durante la eliminación de COV, los microorganismos heterotróficos son predominantes, siendo predominantes las bacterias o los hongos. La inoculación del lecho depende de la naturaleza de los materiales filtrantes y del nivel de biodegradabilidad del COV. Muchos autores prefieren usar lechos que tengan ecosistemas autóctonos (Delhoménie et al., 2002).

Sin embargo, no existe documentación concerniente a microorganismos que hayan sido utilizados para degradar formaldehído, por cuanto es importante destacar que el obtener resultados sobre este tema sin duda ayudará a mejorar la comprensión acerca de los microorganismos más importantes para optimizar los biofiltros.

### 5.2.2.2. DISEÑO Y PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DE UN BIOFILTRO

El diseño y funcionamiento de los biofiltros se basa en cuatro parámetros de carga: tiempo de retención de lecho vacío, velocidad de filtración del gas, carga másica de contaminante y capacidad de eliminación.

El **tiempo de retención de lecho vacío** ( $t_r$ )\*, representa el tiempo medio teórico que una molécula de gas tardaría en pasar a través del lecho limpio.

$$t_r = \frac{V}{Q} \quad (3)$$

Donde  $V$  = Volumen del lecho del Filtro ( $m^3$ ,  $ft^3$ , etc.)

$Q$  = Caudal de gas ( $m^3h^{-1}$ ,  $ft^3s^{-1}$ , etc.)

Los valores del tiempo de retención del lecho vacío utilizados para la eliminación de Compuestos Orgánicos Volátiles varía entre 0.3 y 12 minutos correspondiendo los mayores tiempos a los compuestos menos solubles o degradables.

La **velocidad de filtración del gas**, o velocidad superficial ( $v$ )\*\* es una medida de la velocidad media del fluido a través del lecho vacío, también se conoce como carga superficial, se usa para determinar el monto de aire o contaminante que será tratado.

$$v = \frac{Q}{A} \quad (4)$$

Donde  $A$  es la superficie de la sección transversal del lecho,  $m^2$ .

---

\* También se conoce como EBRT Empty bed residence time

\*\* También se conoce como SL, Surface Loading

Al igual que la carga superficial, también se ha definido la carga volumétrica (VL), en donde ya no se relaciona con el área del lecho, sino que ahora se hace con el volumen del lecho.

$$VL = \frac{Q}{V} \quad (5)$$

El tiempo de retención de lecho vacío y la velocidad de filtración del gas se relaciona mediante la siguiente ecuación:

$$v = \frac{h}{t_r} \quad (6)$$

Donde  $h$  es la altura del lecho filtrante.

La altura del biofiltro es normalmente de alrededor de un metro, aunque se han construido biorreactores de 1.5 metros e incluso más.

La velocidad teórica del gas a través de los poros del relleno del filtro ( $v_{poro}$ ) o velocidad de Darcy, se calcula haciendo el cociente entre la velocidad de filtración del gas por la fracción de huecos  $f$  (adimensional)

$$v_{poro} = \frac{v}{f} \quad (7)$$

La **carga másica superficial** o volumétrica es la masa de contaminante que entra al biofiltro por unidad de área o volumétrica de material filtrante por unidad de tiempo, frecuentemente expresado en  $gm^2$  o  $gm^3$  de material filtrante por hora. Aunque el flujo a través del lecho filtrante permanece constante, la carga másica a lo largo del mismo disminuye cuando el contaminante está siendo removido. Sin embargo generalmente la carga másica total del sistema se define así:

Carga Másica Superficial

$$SML = \frac{Q}{A} C_{Gi} \quad (8)$$

Donde  $C_{Gi}$  es la concentración a la entrada del Biofiltro. ( $\text{gm}^3\text{h}$ ).

Carga Másica Volumétrica

$$LMV = \frac{Q}{V} C_{Gi} \quad (9)$$

La **eficiencia de remoción** y la **capacidad de eliminación** son usadas para describir el desempeño del biofiltro. La eficiencia de remoción (RE) es la fracción de contaminante removida por el filtro, expresada como porcentaje:

$$RE = \left( \frac{C_{Gi} - C_{Go}}{C_{Gi}} \right) \times 100 \quad (10)$$

Donde  $C_{Gi}$  en la concentración a la entrada ( $\text{ppmv}$ ,  $\text{gm}^{-3}$ ); Donde  $C_{Go}$  en la concentración a la salida ( $\text{ppmv}$ ,  $\text{gm}^{-3}$ ).

La capacidad de eliminación (EC) de un biofiltro es la carga eliminada de contaminante por unidad de volumen de lecho y se puede calcular de la siguiente manera:

$$EC = \left( \frac{C_{Gi} - C_{Go}}{V} \right) \times Q \quad (11)$$

Relacionando la capacidad de eliminación, la eficiencia de remoción con la carga volumétrica se llega a la siguiente expresión:

$$EC = LMV \times RE \quad (12)$$

La eficiencia de remoción es un descriptor incompleto del desempeño del biofiltro porque este varía con la concentración del contaminante, flujo de aire y el tamaño del biofiltro y únicamente refleja las condiciones específicas en las cuales este fue hecho, pero permite una comparación de los resultados de dos sistemas de biofiltración diferentes porque el volumen y el flujo son normalizados por definición. Sin embargo, la capacidad de eliminación es también una función de la concentración. La concentración efluente usada

frecuentemente usada está dada por las metas o la normatividad correspondiente.

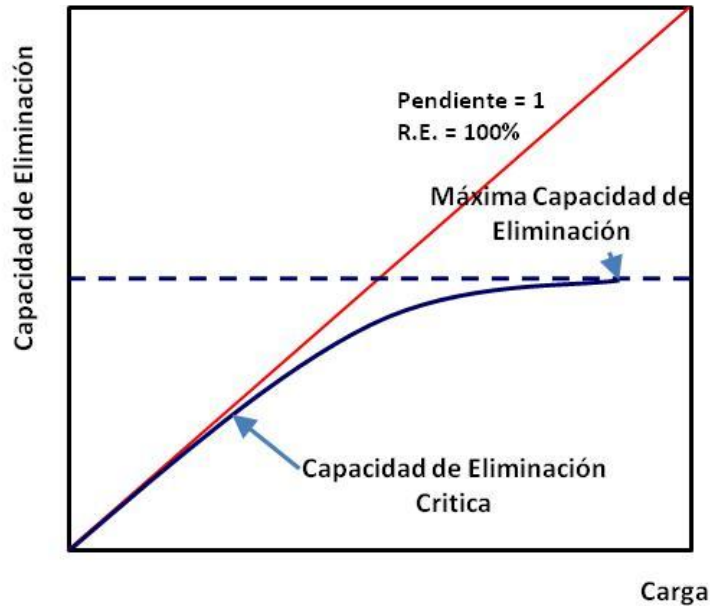
La capacidad de eliminación puede ser únicamente igual o menor que la carga másica. Bajo condiciones bajas de carga, la capacidad de eliminación es esencialmente igual a la carga y la eficiencia alcanza el 100%. Al incrementar la carga del sistema, se llega a un punto en donde la carga másica total alimentada excede la capacidad de eliminación total generando eficiencias de remoción inferiores al 100%. Este punto se conoce como carga crítica o capacidad de eliminación crítica. En la Figura 1, se puede observar como este fenómeno ocurre.

El declive en la eficiencia de remoción puede ser explicado de varias formas dependiendo sobre cual parámetro varia. Si el flujo se incrementa o el volumen disminuye, el tiempo de residencia también disminuye y el contaminante no puede tener el tiempo suficiente para difundirse dentro de la biopelícula y se oxidara con facilidad. Asimismo, si la concentración se incrementa, manteniendo el caudal y el volumen constante, la biopelícula no puede absorber este incremento y una parte del contaminante pasa por el sistema sin ser tratado.

Si se sigue aumentando la LMV se alcanza un máximo en la capacidad de eliminación, este es el máximo generalmente es independientemente de la concentración del contaminante y del tiempo de la residencia dentro de un rango razonable de condiciones de operación.

Los datos de los estudios de biofiltros piloto a menudo se representan como EC vs carga contaminante aplicada, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Capacidad de Eliminación típica vs Curva de Carga



Fuente: Devinny (1999)

### 5.2.2.3. PRUEBAS EN ESCALA BANCO

Las pruebas en escala banco son efectivas si se desarrollan sobre una corriente contaminada que sea semejante a una que exista en la industria. Estas pruebas se usan primariamente para demostrar la capacidad de eliminación y la eficiencia de remoción para un contaminante particular o un grupo de contaminantes como una función de la carga másica. Usando escala banco, las condiciones de carga se pueden alterar de dos maneras. Incrementando el caudal, incrementando la carga y disminuyendo el tiempo de residencia. El incremento en el flujo disminuye el tiempo en el cual el contaminante se difunde en la biopelícula y se degrada y puede limitar la remoción del contaminante. Alternativamente, la carga se puede incrementar por incremento de la concentración mientras se mantiene constante el tiempo de retención: en este caso las concentraciones más altas de COV dan

fuerzas conductivas más fuertes dentro de la película y cinéticas de biodegradación mayores.

Cuando se opera con cargas extremas similares, caudales altos y bajas concentraciones o caudales bajos y altas concentraciones se producen capacidades de eliminación diferente porque las diferentes fuerzas conductivas de remoción. Si las concentraciones de la corriente que se trata no experimentan cambios después de un tiempo, entonces la carga alimentada vs la capacidad de eliminación del experimento será función únicamente del incremento del caudal. Si la concentración experimenta un cambio, tanto el caudal como concentración se debe modificar para observar sus efectos para el sistema. Haciendo pruebas bajo diferentes condiciones proporcionan los datos para un modelo exitoso.

Con los resultados del experimento a escala banco se procede a hacer la curva de capacidad de eliminación vs carga, con el fin de determinar la capacidad de eliminación crítica del Sistema.

### **5.3. MARCO CONCEPTUAL**

#### **5.3.1. COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES (COV)**

Los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) se pueden definir como cualquier compuesto químico basado en enlaces o anillos de carbono (y también Hidrógeno) con una presión de vapor mayor a 2 mm de mercurio (0.27 kPa) a 25°C, excluyendo al metano (CH<sub>4</sub>). Estos componentes pueden contener Oxígeno, Nitrógeno, y otros elementos; pero específicamente excluye a componentes como el Dióxido de Carbono, Ácido Carbónico, Sales Carbonáceas, y Carburos Metálicos

El origen de los Compuestos orgánicos volátiles (COV) está ligado históricamente al desarrollo de la industria petrolera desde mediados del siglo XIX. Sin duda, ha sido hasta el siglo XX cuando el desarrollo científico y tecnológico ha llevado a una industrialización caracterizada por un crecimiento y expansión irracionales y desordenados. Esto condujo a su vez a una diversificación sorprendente de los compuestos orgánicos volátiles que desde principios del siglo XX, fueron considerados como hematotóxicos y neurotóxicos, por los pioneros de la toxicología industrial contemporánea.

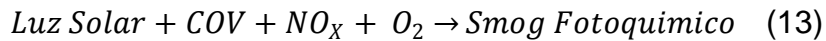
#### **Clasificación Química**

Los compuestos orgánicos volátiles tienen una estructura hidrocarbonada de 5 a 16 átomos de carbono y se encuentran en fase líquida, a diferencia de los hidrocarburos de uno a cuatro átomos de carbono que se encuentran en fase gaseosa y se usan como combustible.

Muchos de los COV emitidos a la atmósfera ocasionan problemas a la salud humana (generan náuseas, dolor de cabeza, irritación y afectan los nervios y el sistema respiratorio, contribuyen a la aparición de cáncer, etc.), y estos



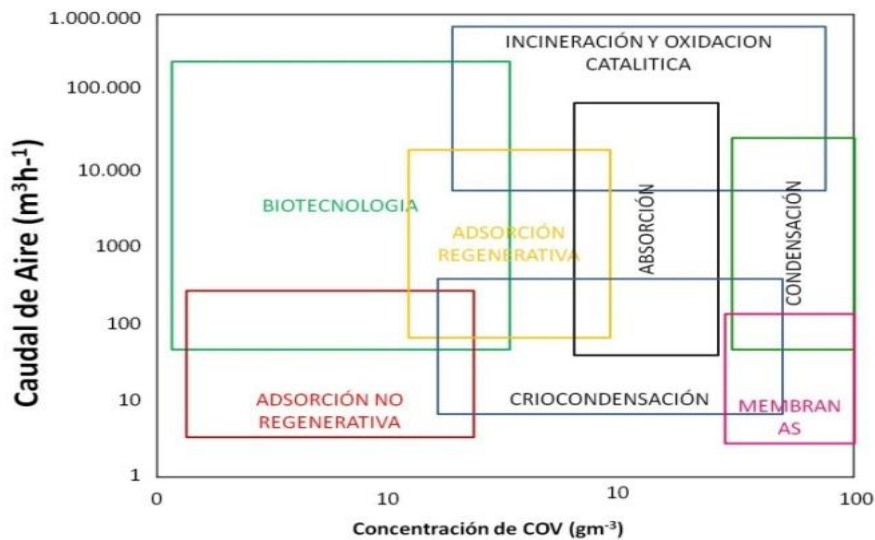
también contribuyen sustancialmente al daño de la fauna y la flora. Además de sus efectos tóxicos algunas familias de COV, como los clorofluorocarbonados (CFC's) presentan características de gases de efecto invernadero. Otros están involucrados directamente con el deterioro de la Capa de Ozono, mientras otros reaccionan con los  $NO_x$ , para producir ozono troposférico, que causa el smog urbano visible.



En la tabla 3 se presentan las soluciones que se están implementando para controlar las emisiones de los Compuestos Orgánicos Volátiles, mostrando las principales características, desarrollos y limitaciones y costos aproximados.

La aplicación de las diferentes tecnologías de control de contaminantes se hace de acuerdo al flujo de aire que se desee tratar y la concentración del COV. La figura 2 es una adaptación de acuerdo a los rangos hecha por Delhomènie et al (2005).

**Figura 2. Límites de Aplicación control de COV.**



Fuente: Delhomènie et al. (2005)

Tabla 3. Tecnologías de control existentes para COV

TECNOLOGÍA	PRINCIPIOS Y CARACTERÍSTICAS	DESARROLLOS Y LIMITACIONES	COSTOS/ (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> ) Aire
Adsorción	<ul style="list-style-type: none"> <li>Transferencia de COV a una fase solida porosa, fija o Fluidizada.</li> <li>Materiales: Carbón Activado, Zeolita y polímeros.</li> <li>Instalaciones dobles: Adsorción-Desorción.</li> <li>Temperatura de operación &lt;50-60°C, se puede presentar riesgo de Ignición</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Conversión de 90 -99%</li> <li>Es posible recuperar el COV</li> <li>Puede trabajar con diferentes caudales y tener periodos sin funcionamiento.</li> <li>Se requiere tratamiento para el adsorbente en la regeneración.</li> <li>Limitado a emisiones con concentraciones bajas a moderadas.</li> <li>Pesos moleculares del COV entre 45 y 130</li> <li>Lecho tóxico, problemas con algunos COV.</li> </ul>	Inversión: US\$15-120 Operación: US\$10-35
Oxidación Térmica (incineración)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Oxidación térmica de COV.</li> <li>Temperaturas entre 760 – 1200 °C</li> <li>Tiempo de residencia entre 0.3 – 2 s</li> <li>Concentración del COV&lt; 25% del límite de explosión.</li> <li>Requiere Oxigeno ≈ 10%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Conversión del 98 – 99.5 %.</li> <li>Es posible recuperar energía.</li> <li>Eliminación de COV halogenados o clorados con equipo adicional adecuado.</li> <li>Produce NO<sub>x</sub>, CO, HCl, dioxinas y furanos compuestos potencialmente tóxicos</li> <li>La eficiencia es baja para concentraciones pequeñas.</li> </ul>	Inversión: US\$10-450 Operación: US\$20-150 Depende de la cantidad de energía recuperada.
Oxidación Catalítica.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Incineración Catalítica.</li> <li>Temperaturas entre 300 -650 °C</li> <li>Tiempo de residencia entre 0.07 – 1 s</li> <li>Catalizadores: Metales nobles(Pt, Pd, Rh) sobre soportes (alúmina, otras cerámicas) u óxidos metálicos (Cu, Ti, Ni, Mn, etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Conversión: 90 -99%</li> <li>Consumo de energía menor que en la Incineración y menos subproductos tóxicos.</li> <li>Existen problemas al desactivar el catalizador.</li> <li>Problemas de disposición del Catalizador.</li> <li>Productos de Combustión.</li> </ul>	Catalizador Fijo Inversión: US\$20-250 Operación: US\$10-75  Catalizador

TECNOLOGÍA	PRINCIPIOS Y CARACTERÍSTICAS	DESARROLLOS Y LIMITACIONES	COSTOS/ (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> ) Aire
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tiempo de vida del catalizador 2 – 5 Años.</li> <li>Requiere Oxígeno ≈ 2%</li> </ul>		Fluidizado Inversión: US\$35-220 Operación: US\$15-90
Absorción	<ul style="list-style-type: none"> <li>Transferencia del COV a la fase líquida</li> <li>Torres de platos, de burbujas, torres empacadas, atomizadores.</li> <li>Requiere de solventes: Agua, hidrocarburos, aminas, etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Conversión del 90 -98%</li> <li>Posible recuperación del COV con tratamiento posterior.</li> <li>No es adecuada para COVs Insolubles.</li> <li>Produce aguas residuales, y fangos químicos.</li> </ul>	Inversión: US\$15-70 Operación: US\$25-120
Condensación	<ul style="list-style-type: none"> <li>Licuefacción de COVs de altos puntos de ebullición &gt; 38°C enfriamiento y/o compresión.</li> <li>Sistemas refrigerados o Criogénicos, agua (5°C), salmuera (-35°C) y nitrógeno líquido (-195°C)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Recuperación de productos.</li> <li>Se adapta bien solo a corrientes de COVs saturado.</li> <li>No elimina compuestos.</li> </ul>	Inversión: US\$10-80 Operación: US\$20-120
Membranas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Separación de mezclas de gas a través de membranas semipermeables.</li> <li>Materiales: Polímeros, cerámicas porosas.</li> <li>Compresión del flujo de gas antes de la separación por membrana.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Conversión: 50-98%</li> <li>COV son concentrados de 5-100 veces, posible valorización.</li> <li>Membranas selectivas resistentes a COV halogenados</li> <li>Presiones altas de operación.</li> <li>Se requiere la limpieza de la membrana.</li> </ul>	No hay información al respecto.
UV/oxidación fotoquímica.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Oxidación completa con oxidantes oxigenados (O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), e iniciada por radiación UV.</li> <li>Posible utilización de</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Conversión: 90-98%</li> <li>Costos energéticos moderados.</li> <li>Inadecuado para COVs halogenados.</li> <li>Sistemas Complejos.</li> </ul>	No disponible.

TECNOLOGÍA	PRINCIPIOS Y CARACTERÍSTICAS	DESARROLLOS Y LIMITACIONES	COSTOS/ (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> ) Aire
	fotocatalizadores (TiO <sub>2</sub> , Fe <sub>x</sub> O <sub>y</sub> , etc.) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Opera a temperatura Ambiente.</li> </ul>		
Biotecnología	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oxidación Biológica de COV.</li> <li>• 3 configuraciones: biofiltros, filtros percoladores y biolavadores.</li> <li>• Biocatalizadores: Microorganismos (bacteria, fungi)</li> <li>• Tiempo de Residencia de 30 – algunos minutos.</li> <li>• Tiempo de Operación 20 -40 °C</li> <li>• Tiempo de vida del Filtro: 3-5 años.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conversión del 80-95%.</li> <li>• Costos moderados de instalación y operación.</li> <li>• Bajo mantenimiento.</li> <li>• Se necesita control de parámetros biológicos.</li> <li>• Se requiere de amplias áreas para el biofiltro.</li> <li>• Problemas con la caída de presión.</li> </ul>	Inversión: US\$10-70 Operación: US\$3-10

Fuente: Delhoméie et al. (2005)

### 5.3.2. FORMALDEHIDO

El formaldehido es un gas o líquido incoloro e inflamable. A temperaturas ordinarias, el formaldehido puro es un gas incoloro que posee olor fuertemente picante y muy irritante para las mucosas de los ojos, nariz y garganta. Es un compuesto orgánico volátil (la presión de vapor del formaldehido a 20°C es de 1.4 hPa, es decir, 1,5 mm de Hg<sup>3</sup>), por lo que su evaporación es el principal mecanismo de distribución en el medio ambiente, en vapor o gas. Se produce también naturalmente en pequeñas cantidades inocuas en el cuerpo humano. Su símbolo químico es CH<sub>2</sub>O.

Se puede encontrar en estado gaseoso a presión atmosférica desde los – 19,2°C. Es un gas inflamable siendo su calor de combustión a 25°C es de 561,5 KJ/mol y su temperatura de ignición 430°C. Mezclado con el aire es explosivo, a 20°C los límites entre los que el formaldehido mezclado con el aire explota son 7% y 72% en volumen.

Este gas se polimeriza a temperaturas ordinarias, en estado puro no se polimeriza entre los 80°C y los 100°C comportándose como un gas ideal. El formaldehido es un compuesto extremadamente reactivo. Se polimeriza muy fácilmente, incluso en frío, dando polímeros insolubles que enturbian las soluciones acuosas. Para evitar este inconveniente se les añaden estabilizantes, particularmente alcohol metílico. Las soluciones acuosas que se venden en los comercios contienen entre 35 y 55% de formaldehido, pero como éste último tiende a polimerizarse, se estabilizan dichas soluciones con metanol (La adición de metanol aumenta su inflamabilidad).

El formaldehido se obtiene por oxidación del metanol, La mayoría de las reacciones de oxidación conducen a la formación de ácido fórmico, y la oxidación completa da lugar a anhídrido carbónico y agua. A pesar de su fuerte reactividad, es un compuesto relativamente estable. El calor no lo descompone sensiblemente más que por encima de 300 °C, con formación de óxido de

---

<sup>3</sup> Ficha de Datos de Seguridad de Formaldehido – Merck.

carbono e hidrógeno. Esta descomposición está favorecida por ciertos catalizadores como plata u óxidos metálicos (hierro y molibdeno).

El formaldehído gaseoso se disuelve fácilmente en agua, con la cual, reacciona para formar una mezcla en equilibrio del monohidrato disuelto, metanodiol, y una serie de hidratos polímeros de peso molecular bajo, que tienen una fórmula del tipo  $\text{HO}(\text{CH}_2\text{O})_n\text{H}$ . El gas es fácilmente soluble en alcoholes, glicoles, amidas y otros disolventes polares.

Además de las emisiones que resultan de su fabricación y uso, el formaldehído es liberado a la atmósfera por combustión incompleta y por la descomposición fotoquímica de sustancias traza orgánicas. Se libera al aire por la quema de madera, keroseno o gas natural; también proviene de los automóviles, el cigarrillo y otros productos de tabaco. Se encuentra en el aire de la casa, el lugar de trabajo y el espacio exterior, particularmente en la niebla industrial. También se encuentra en algunos alimentos.

A continuación, se presentan los datos físicos y químicos más importantes referentes al formaldehído.

**Tabla 4. Datos Físico-químicos básicos de Formaldehído.**

<i>Fórmula empírica:</i>	$\text{CH}_2\text{O}$
<i>Nombre registrado:</i>	Formaldehído, aldehído fórmico
<i>Nombre Químico:</i>	Metanal
<i>Masa molecular relativa:</i>	30,03 g
<i>Densidad:</i>	0,8153 g/cm <sup>3</sup> (líquido a -20°C)
<i>Densidad relativa del gas:</i>	1,04
<i>Punto de ebullición:</i>	-19,2°C (sustancia pura)
<i>Punto de fusión:</i>	-92,0 -118,0°C
<i>Punto de inflamación:</i>	32-61°C (solución acuosa)
<i>Temperatura de ignición:</i>	300-430°C (solución acuosa)
<i>Límites de explosividad:</i>	7-73 % V
<i>Solvólisis:</i>	En agua se disuelve por completo;
	Fácilmente soluble en éter, alcohol y otros solventes polares.
<i>Factores de conversión:</i>	1 mg/m <sup>3</sup> = 0,80 ppm
	1 ppm = 1,25 mg/m <sup>3</sup>

**Fuente: Sistema de Información Ambiental. Centro de Ciencias Ecológicas.**

### **Uso:**

El formaldehído se encuentra presente en múltiples productos y se incorpora a otros muchos en los procesos de fabricación. Se usa como sustancia preservativa de tejidos en los laboratorios clínicos y como líquido para embalsamar en los depósitos de cadáveres. También se usa como sustancia preservativa de algunos alimentos y como ingrediente antibacteriano en cosméticos, antisépticos de uso doméstico, medicamentos, líquidos de lavado de platos, ablandadores de telas, líquidos de limpieza de alfombras, lacas y productos de madera – principalmente resinas adhesivas para tableros de madera aglomerada, madera aglomerada que se utiliza en contrapisos o estanterías, la fibra de madera prensada usada en armarios y mobiliario, la madera terciada de tableros y la espuma de urea-formaldehído de paneles aislantes–.

Asimismo, se usa como sustancia preservativa en algunas pinturas, cosméticos, champús, materiales de revestimiento de papel y de telas de planchado permanente, en alfombras y en algunos materiales aislantes de espuma.

Igualmente, se usa en la industria manufacturera de otras sustancias químicas, pesticidas, fertilizantes, caucho de látex, películas fotográficas y sustancias preservativas; en el curtido del cuero; y como fungicida, germicida y desinfectante industrial, y en muchos productos como producto de descomposición o alteración de los mismos.

La combustión incompleta – especialmente si se usan calentadores de gas o de keroseno en espacios interiores cerrados, el humo de cigarrillo, la quema de madera, el kerosén y el gas natural también son fuentes de emisión de formaldehído. Además, al aspirar aire interior o exterior que lo contenga, sobre todo niebla industrial.

**Factores sanitarios:**

El formaldehído normalmente se encuentra en bajas concentraciones, en general menos de 0,06 ppm, tanto al aire libre como en lugares cerrados. En concentraciones de 0,1 ppm o más, puede producir trastornos agudos, tales como ojos llorosos, náuseas, accesos de tos, opresión en el pecho, jadeos, sarpullido, sensación de quemazón en los ojos, nariz y garganta y otros efectos irritantes. Las personas sensibles al formaldehído pueden experimentar síntomas a niveles inferiores a 0,1 ppm. La Organización Mundial de la Salud recomienda que los niveles de concentración no sean mayores de 0,05 ppm. En las mujeres, la exposición puede causar trastornos menstruales. Las personas asmáticas pueden ser más sensibles a la exposición al formaldehído.

El formaldehído irrita intensamente las mucosas, la conjuntiva, la piel y las vías respiratorias superiores, tanto en su forma gaseosa como de vapor o en aerosol. Disuelto en agua, es un tóxico protoplasmático con efecto cáustico y desnaturizador de la albúmina. Cuando se ingieren o inhalan cantidades mayores, se originan lesiones en el esófago o en la tráquea, dolores en el tracto gastrointestinal, convulsiones, vómitos, vértigo, estupor, diarrea, pérdida del conocimiento y colapso. El contacto directo de los ojos con formaldehído puede causar lesiones oculares permanentes o pérdida de la vista.

La exposición a altas concentraciones de formaldehído puede causar acumulación de líquido en los pulmones, casos graves de dificultad respiratoria, bronquitis y aceleración de los latidos del corazón. 60 mL de líquido o 650 mL de vapor por m<sup>3</sup> puede causar coma y la muerte por insuficiencia respiratoria al cabo de pocos minutos.



Las personas que se exponen de forma continua al formaldehído desarrollan el eczema<sup>4</sup> en las zonas expuestas, las personas que lo desarrollan debido al formaldehído contenido en la ropa desarrollan dermatitis siguiendo un patrón de distribución semejante al vestido, sin desarrollar eczema en las axilas y desarrollándolo con más intensidad en las zonas de presión. Cuando es debido al formaldehído contenido en los cosméticos se desarrolla dermatitis en las zonas de aplicación de los cosméticos. Una forma infrecuente es la sensibilidad al formaldehído presente en los champús en los cuales se desarrolla la dermatitis tanto en las manos como en la región retroauricular, En ocasiones se puede desarrollar dermatitis en las zonas de contacto con pieles o plásticos que contienen formaldehído.

El formaldehído ha demostrado ser cancerígeno en animales de laboratorio. Asimismo, se cita como una sustancia “prevista razonablemente como carcinógeno humano” en el Undécimo Informe sobre Carcinógenos publicado por el Programa Nacional de Toxicología de los Estados Unidos porque la exposición prolongada se ha vinculado a un mayor número de casos de cáncer de la nariz y la garganta.

A continuación se presenta una tabla de toxicidad animal y humana, lo cual es una indicación del grado de peligrosidad que representa el formaldehído.

**Tabla 5. Datos de Toxicidad en humanos y animales.**

<b>Seres humanos:</b>		
	DL <sub>mín</sub> 36 mg/kg, oral, mujer	s.UBA, 1986
	CT <sub>mín</sub> 17 mg/m <sup>3</sup> , 30 min, inhalación	s.UBA, 1986
	CT <sub>mín</sub> 8 ppm, inhalación	s.UBA, 1986
	DL <sub>mín</sub> 477 mg/kg, (sin información)	s.UBA, 1986
<b>Mamíferos:</b>		
Ratones	CL <sub>50</sub> 300 mg/m <sup>3</sup> , subcutáneo	s.OMS, 1982
Ratas	DL <sub>50</sub> 800 mg/kg, oral	s.OMS, 1982

<sup>4</sup> Afección cutánea caracterizada por vesículas rojizas y exudativas, que dan lugar a costras y escamas.

	CL <sub>50</sub> 590 mg/m <sup>3</sup> , inhalación	s.OMS, 1982
	DL <sub>50</sub> 87 mg/kg, intravenoso	s.OMS, 1982
Conejos	DL <sub>50</sub> 270 mg/kg, dérmico	s.OMS, 1982
Cobayos	DL <sub>50</sub> 260 mg/kg, oral	s.OMS, 1986
<b>Organismos acuáticos:</b>		
Pequeños crustáceos	CL <sub>0</sub> 27 mg/l,	s.UBA, 1986
	CL <sub>50</sub> 52 mg/l	s.UBA, 1986
	CL <sub>100</sub> 77 mg/l	s.UBA, 1986
Peces	CL <sub>100</sub> desde 28,4 mg/l	s.UBA, 1986
Algas	CL <sub>50</sub> desde 0,3-0,5 mg/l	s.UBA, 1986
Pulgas acuáticas	CL <sub>50</sub> 2 mg/l	s.UBA, 1986

Fuente: Sistema de Información Ambiental. Centro de Ciencias Ecológicas.

### Factores ambientales:

*Agua:* Debido a su gran solubilidad, alrededor del 99 % de todo el formaldehído que es liberado al medio ambiente se encuentra en el agua (BMJFG, 1984).

*Aire:* Alrededor del 1% del formaldehído emitido al medio ambiente llega a la atmósfera pero es rápidamente arrastrado a tierra por las precipitaciones. Debido al tiempo de persistencia relativamente corto, no es transportado a grandes distancias. Cuando el formaldehído bajo presión se expande, forma nieblas frías. Estas nieblas son más densas que el aire, se evaporan fácilmente y forman con el aire mezclas agresivas y explosivas (incluso sobre los espejos de agua).

*Suelo:* Se desconocen los efectos del formaldehído en el suelo y hasta el presente no se ha constatado bioacumulación. La infiltración en los cuerpos de agua subterráneos es de menor importancia porque el formaldehído tiende a evaporarse del suelo.

*Tiempo de vida media:* El tiempo de vida media en el aire (aire urbano en días soleados) es de 1-2 horas; cuando participan radicales OH, el período de persistencia se extiende a 12 horas.

*Degradación, productos de la descomposición:* La degradación está a cargo de microorganismos que se encuentran en el suelo y en el agua. A temperaturas superiores a los 150°C, el formaldehído se descompone formando metanol y monóxido de carbono. Debido a su corto tiempo de vida media, su estabilidad en la atmósfera es escasa (BMJFG, 1984). Al entrar en contacto con ácidos y álcalis, el formaldehído se polimeriza espontáneamente. Reacciona con agua formando polimetilenos. Con HCl forma bis(clorometil)éter, que es altamente carcinógeno y cataliza aminas secundarias, formando compuestos N-nitrosos/nitrosaminas que también son carcinógenos.

*Cadena alimentaria:* Sólo hay una ligera acumulación en la cadena alimentaria; el formaldehído se oxida rápidamente en el organismo formando ácido fórmico, que es eliminado en parte por vía urinaria.

*Efectos combinados:* El formaldehído sufre violentas reacciones de condensación con el amoníaco o con las aminas y se desproporciona con sustancias alcalinas formando metanol y ácido fórmico.

A continuación se presentan algunos umbrales dados por las autoridades ambientales a nivel mundial tanto en el aire, como también en algunos materiales que dentro de su proceso productivo utilizan el formaldehído:

**Tabla 6. Umbrales máximos permitidos por autoridades ambientales y sanitarias en el mundo.**

Medio/procedencia	País/organismo	Valor	Fuente
<i>Aire:</i>			
Los Ángeles (1961-66)	EEUU	0,005-0,16 mg/m <sup>3</sup>	s.BMJFG, 1984
Aire en calles urbanas (1977)	Suiza	0,0011-0,0012 mg/m <sup>3</sup>	s.BMJFG, 1984
Gas de escape de automóviles		35,7-52,9 mg/m <sup>3</sup>	s.BMJFG, 1984
Ambientes int. domiciliarios (1975)	Dinamarca	0,08-2,24 mg/m <sup>3</sup>	s.BMJFG, 1984
<i>Aire ambiente: (BMJFG, 1984; evaluaciones de 1975-1984)</i>			
Placas de madera aglomerada:			
Escuelas recientemente construidas		0,36-1,08 mg/m <sup>3</sup> (poca ventilación)	
Aulas y habitaciones		0,6-0,72 mg/m <sup>3</sup> (muebles)	

Medio/procedencia	País/organismo	Valor	Fuente
Casas prefabricadas		0,18-1,08 mg/m <sup>3</sup>	
Casas en EEUU		0,012-3,84 mg/m <sup>3</sup> (636 casas)	
Aislación térmica		0,24-3,48 mg/m <sup>3</sup> (43 objetos)	
Desinfección:			
Patología		<13,56 mg/m <sup>3</sup> (después de haber sido ventilado)	
Desinfección de camas		<6 mg/m <sup>3</sup>	
Desinfección por cepillado		<13,2 mg/m <sup>3</sup>	
Desinfección por rociado		<12 mg/m <sup>3</sup>	
Aire en incubadoras		18-30 mg/m <sup>3</sup>	
Alimentos y golosinas:			
Tomates		5,7-7,3mg/kg	s.OMS, 1982
Manzanas		17,3-22,3mg/kgs.OMS, 1982	
Espinacas		3,3-7,3mg/kg	s.OMS, 1982
Zanahorias		6,7-10mg/kg	s.OMS, 1982
Rábanos		3,7-4,4 mg/kg	s.OMS, 1982
Humo de cigarrillos		37,5-44,5mg/cigarrillo	s.OMS, 1982

Fuente: Sistema de Información Ambiental. Centro de Ciencias Ecológicas.

### 5.3.3. COMPOST

El compostaje es la descomposición o degradación controlada de materia orgánica por acción de diferentes microorganismos, en presencia de aire, humedad y calor. Los materiales orgánicos iniciales terminan convertidos en compost.

El compost contiene gran cantidad de ácidos orgánicos y otras sustancias relativamente estables, poco digestibles por bacterias y hongos. Ese compost resultante se encuentra relativamente estabilizado en su descomposición, es decir, ya no continúan los microorganismos con su fuerte actividad degradativa.

Se trata de un proceso, que imita un fenómeno recurrente en la naturaleza. Los restos vegetales y animales son degradados por microorganismos en procesos

aeróbicos (en presencia de aire) o anaeróbicos (sin aire). Ambos fenómenos ocurren de modo natural. El resultante es *humus*, que cumple importantes funciones en la vida del suelo.

El compost cumple importantes funciones. Permite la aireación, porque aumenta la porosidad del suelo, permitiendo la respiración de las raíces; También retiene agua entre las fibras vegetales aún presentes, haciendo más lenta su infiltración, permite una rica vida animal minúscula, que se alimenta de las fibras y acelera la mineralización, mejora la agregación de las partículas y la aireación del suelo.

El material resultante llamado compost, contiene nutrientes y oligoelementos, es un regenerador orgánico del terreno, razón por la cual se ha denominado “abono orgánico”; sus efectos sobre el suelo son:

- Suelta los terrenos compactados y compacta los demasiado sueltos.
- Favorece el abonado químico al evitar la percolación.
- Aumenta la capacidad de retención de agua por el suelo.
- Es fuente de elementos nutritivos (nutrientes más oligoelementos).
- Aumenta el contenido de materia orgánica del suelo.
- Es aséptico, libre de bacterias patógenas, semillas, huevos de ácaros y larvas, pero con intensa vida bacteriana que activa los procesos bioquímicos del suelo.
- Sus elementos nutritivos están en forma de humus, fácilmente asimilables.
- Mejora química, física y biológicamente el suelo.

Para producir compost, se crean condiciones óptimas para la vida de los microorganismos, que degradan la materia orgánica. Se trata de estimular los microorganismos que se alimentan en condiciones aeróbicas.

Los hongos y bacterias, que participan en este proceso, siempre están presentes en el ambiente. Para actuar sólo requieren de un estímulo: aire, alimento rico en carbono y nitrógeno, humedad y temperatura moderada.

## **5.4. MARCO METODOLÓGICO**

### **5.4.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN**

La investigación que se pretende realizar con este proyecto de grado tiene un enfoque cuantitativo, de tal forma que se podrán establecer relaciones causa efecto entre las diferentes variables de estudio, enmarcándose en el Contexto de una investigación Experimental.

### **5.4.2. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

Para el desarrollo de la investigación se utilizaron diferentes tipos de información, los cuales se exponen a continuación:

- Información Primaria: Se hizo un registro de los datos recolectados mediante la puesta en marcha del sistema de biofiltración. Además, se realizó la medición de contaminante en la corriente de entrada y salida del biofiltro, esto con el fin de calcular la eficiencia, y otros factores relevantes dentro de la investigación.
- Información Secundaria: Se realizó una recolección de literatura científica especializada, en donde se encuentran experiencias previas de diseños de diferentes sistemas de biofiltración que permiten estructurar la metodología para el diseño, construcción y puesta en marcha de biofiltros a escala banco.

### **5.4.3. PROCESO METODOLÓGICO**

Se diseñó un equipo de biofiltración a escala banco (Bench Scale) que permitió la remoción de Compuestos Orgánicos Volátiles – en especial, del compuesto Formaldehído – de una corriente de aire contaminada. Este diseño se realizó mediante sistemas matemáticos y de acuerdo a la literatura científica especializada.

Asimismo, se hizo el montaje del equipo de biofiltración en el laboratorio de Microbiología, así como el montaje de la corriente de aire que entra al equipo de biofiltración y el montaje de sistemas de seguridad para que existan condiciones apropiadas para el desarrollo de la investigación.

Finalmente, se puso en marcha el equipo de biofiltración y se realizaron las mediciones de la eficiencia y para medir el comportamiento del biofiltro y cada una de sus partes, realizando mediciones de las características físicas, químicas y biológicas.



## 6. MÉTODOS

Con el fin de hacer la determinación de la capacidad de remoción del Sistema de Biofiltración, así como de los distintos análisis realizados para caracterizar el medio de soporte, medición de caudales de aire, entre otros, a continuación se citan los métodos realizados, siendo los más importantes incorporados a este documento en los anexos que acompañan a este documento.

### 6.1. Método para la determinación de formaldehído en aire:

- ASTM E1333-96 (Re-aprobada: 2002). Método Estándar para la determinación de Concentraciones de Formaldehído en aire y tasas de emisión de productos de madera usando una cámara amplia. Véase Anexo 1.
- NIOSH 3500. Método espectrofotométrico para la determinación de Concentraciones de Formaldehído en aire mediante ácido cromotrópico. Véase Anexo 2.

### 6.2. Método para caracterización del medio de soporte:

Con estos métodos se determinaron las características físicas y químicas del medio de soporte que será utilizado en el sistema de biofiltración. Entre las características a determinar se encuentran:

- Contenido de humedad mediante el método gravimétrico (según la NTC 1495 - Suelos. Ensayo para determinar el contenido de humedad de suelos y rocas, con base en la masa). Véase Anexo 3.
- Determinación de pH (mediante el método potenciométrico, según la NTC 5264 - Calidad del suelo. determinacion del pH). Véase Anexo 3.

- Contenido de Materia Orgánica (MO, según el procedimiento descrito por la NTC 1886 - Suelos. Determinación de humedad, cenizas y materia organica). Véase Anexo 3.

Cabe resaltar que se usó la información correspondiente a la caracterización química del compost, presentada por la empresa Fercon, la cual comercializa el tipo de compost utilizado en el proyecto de grado.

Con respecto a la muestra microbiológica, ésta fue enviada a un laboratorio con el fin de hacer el análisis respectivo. Entre los métodos realizados por el laboratorio, se presentan los siguientes<sup>5</sup>:

- Método de dilución y siembra en placa en superficie para conteo de células viables de bacterias, hongos y actinomicetes, en condiciones de aerobiosis y anaerobiosis.
- Tinción de Gram, siembra en medio selectivo para Pseudomonas - cetrimide -, incubación en agar nutritivo a 41 grados centígrados, pruebas bioquímicas tradicionales

---

<sup>5</sup> Información suministrada por el laboratorio Agroambiente 2015 EAT.

## 7. RESULTADOS OBTENIDOS

De acuerdo con el proceso metodológico, planteado en el numeral 6.4.3., se presenta a continuación las actividades y procedimientos desarrollados dentro del proyecto de grado. Debido a esto y con el ánimo de mejorar la comprensión de lo realizado así como sus resultados y posterior análisis, tanto este numeral, como los siguientes serán presentados de la misma manera.

### **7.1. Diseño del equipo de biofiltración a escala banco.**

En esta etapa se siguieron las recomendaciones dadas por Altamar (2007), y Delhoménie (2005), quienes dicen que el diseño y funcionamiento de los biofiltros se basa en cuatro parámetros de carga: tiempo de retención de lecho vacío, velocidad de filtración del gas, carga másica de contaminante y capacidad de eliminación.

Con base en lo anterior se tomó como principal criterio de diseño el tiempo de residencia, ya que este será el que permanezca el contaminante en el filtro y durante el cual se retirará este del aire, experiencias previas mostraban tiempos de residencia desde 0.3 a 12 minutos, pero ninguna de ellas se refería al contaminante a retirar en el proyecto que fue formaldehído, Por lo tanto siguiendo el criterio de Piciooreanu et al. (1999), tiempos de residencia entre 10 -1000 segundos permiten la difusión adecuada de contaminantes, mayores a 1000 causan sobrepoblación de microorganismos induciéndolos a la muerte e inferiores a 10 no permiten que el contacto sea suficiente para realizar los procesos de transferencia propios de la biofiltración. Estudios previos en compuestos de comportamiento similar al formaldehído muestran tiempos de residencia entre 40- 200 s. Por lo que se decidió trabajar con un tiempo de residencia de 0.92 minutos (55.22s), que se encuentra dentro de los rangos establecidos, se escogió un tiempo de residencia bajo, ya que el formaldehído es un agente antibacterial que puede interferir con los microorganismos.

Para el funcionamiento del filtro era necesario impulsar la corriente de gas contaminado mediante una fuente de aire que lo suministrara constantemente, para ello se utilizó una turbina de aire para acuario, marca Yuting, que suministraba un caudal de 25 L/min. A esta turbina se le adaptó una manguera con una T de vidrio, que permitió regular el caudal de entrada al filtro, se utilizó como caudal de trabajo 6.826 L/m .

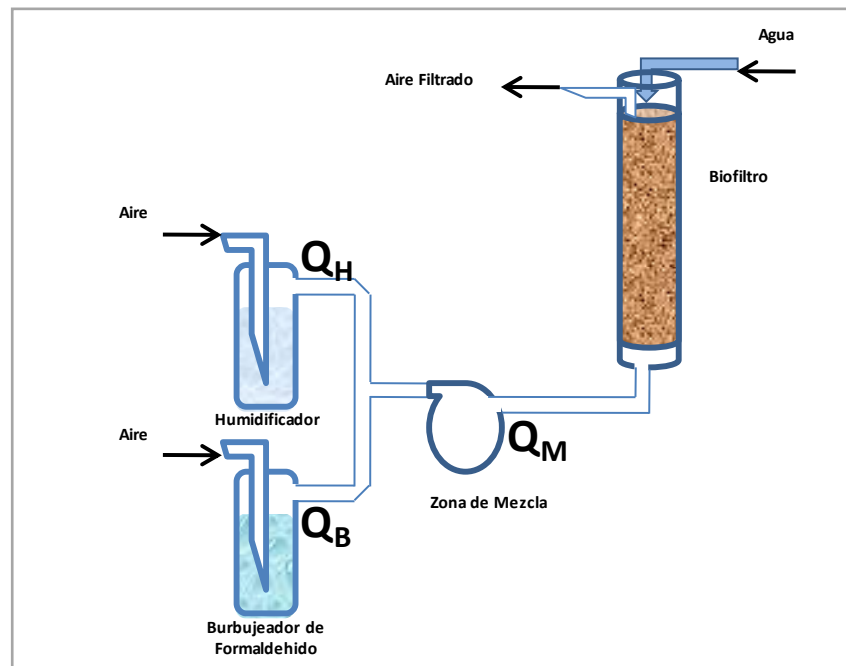
Con los datos que se presentan anteriormente se calculó el volumen necesario para el filtro ya que el tiempo de residencia es igual a la relación entre el volumen del lecho y el caudal, despejando de la relación se obtuvo el volumen del lecho 6.283 L. Se seleccionó una altura de lecho de 0.8 m , y se decidió construir cilíndricamente para poder usar tubería comercial, con ello se obtiene un diámetro de 0.1 m.

Se determinó que la concentración de entrada al filtro sería de 40 ppm de formaldehído, teniendo en cuenta que concentraciones superiores a 6 ppm son consideradas perjudiciales para la salud Los Límites de Exposición Profesional (OEL's por sus siglas en inglés) establecidos en la actualidad en Europa para prevenir efectos adversos a la salud menciona, que la mayoría de los límites de exposición profesional de formaldehído en Europa son entre 0,3 y 0,5 ppm. No se hizo con concentraciones más elevadas, ya que hubiera implicado un riesgo para la salud, puesto que en la Universidad no se cuenta con sistemas de extracción adecuados en los laboratorios. La fuente de formaldehído fue una solución acuosa de formaldehído al 37%, estabilizado con 10% de metanol, grado reactivo fabricada por Merck. Por lo tanto el Biofiltro además de eliminar vapores de formaldehído, también eliminó vapores de metanol, lo cuales no se contabilizaron, ya que no se contaba con los equipos de análisis instrumental adecuados para hacerlo.

Después de definirse la concentración de entrada se determinó el volumen de aire con el cual se debía diluir la corriente proveniente del burbujeador de formaldehído para alcanzarla, para ello se hizo un balance de materia del

contaminante asumiendo que las pérdidas son despreciables a lo largo de todo el proceso y que el agua y el solvente evaporado no modifican sustancialmente el flujo volumétrico. La figura 3 presenta un esquema del sistema de biofiltración montado, para tener una mayor claridad sobre el balance.

Figura 3. Esquema del sistema de biofiltración a escala Banco. Fuente: Autores.



Para el formaldehído se conoce su presión de vapor y con ella se calcula la concentración de formaldehído a la salida del burbujeador, asumiendo que la saturación es total. (Ecuación 14)

$$y_{CHO} = \frac{P_{sat}}{P} \quad (14)$$

Con el valor obtenido de  $y_{Formaldehído}$  se haya la fracción de aire, en  $Q_B$ , (Ecuación 15)

$$y_{aire} = 1 - y_{CHO} \quad (15)$$

Posteriormente se determinó la masa de cada componente en la corriente, que es igual a la fracción por el peso molecular sobre la densidad. Después de obtenerse estos datos, se realizó el balance global (Ecuación 16) y el balance

para formaldehído (Ecuación 17) y de ahí se estableció cual debía ser el flujo de aire en la  $Q_H$ .

$$Q_B + Q_H = Q_M \quad (16)$$

$$(y_{CHO})_B Q_B = Q_M (y_{CHO})_m \quad (17)$$

La tabla 10, presenta las propiedades de las sustancias de trabajo y la tabla 11 presenta los resultados del balance de materia.

Tabla 7. Propiedades Físicas de las Sustancias.

	Densidad g/mL	P Vapor (kPa)
<b>Formaldehído</b>	1,08	0,472
<b>Aire</b>	0,001204	-
<b>Agua</b>	1	2,337

Fuente: Autores

Tabla 8. Balance de materia. Fuente: Autores.

	$Q_B$	$Q_H$	$Q_M$
<b>Caudales (L/min)</b>	0,851	5,975	6,826
	<b>Fracciones (mL/mL aire seco)</b>		
<b>Formaldehído</b>	0,321	0,000	0,040
<b>Agua</b>	0,000	0,030	0,027
<b>Aire</b>	0,679	0,970	0,933

Fuente: Autores

Como se puede ver en la figura 3, para el Biofiltro se necesita humidificar el aire, ya que a la entrada del Biofiltro la humedad relativa debe ser mayor al 95%, para la temperatura promedio de Bogotá 14.4°C, utilizando la carta psicométrica a una presión de 563 mm Hg. Se obtuvieron los siguientes resultados. Humedad absoluta con Humedad relativa del 100%: 0,013337 kg agua/kg aire seco y a la humedad relativa promedio de Bogotá 72%: 0,009546 kg agua/kg aire seco<sup>6</sup>, la ecuación 18 muestra como se calculó el volumen del humidificador.

<sup>6</sup>Valores calculados mediante applet Publicado

$$V_H = \Delta Y \times \rho \times Q_H \times t_{op} \quad (18)$$

En donde:

$V_H$ : Volumen del humidificador

$\Delta Y$ : Diferencia de Humedades Absolutas

$\rho$ : Densidad del aire: 0.8915 kg/m<sup>3</sup>.

$t_{op}$ : Tiempo de Operación: 24 horas, por 7 días.

Con lo anterior se obtuvo un volumen de 2,9 L.

De la misma forma y usando la ecuación 18, se calculó el volumen del burbujeador de formaldehído, para este caso la humedad absoluta de formaldehído a la entrada del burbujeador era cero y a la salida 0.4945 kg formaldehído/kg aire seco. En este caso el tiempo de operación se tomó para 2 días. Obteniéndose un valor de 1,08 L.

Adicionalmente se planteó la utilización de compost como soporte en el interior del Biofiltro, la decisión de utilizarlo se fundamentó en sus propiedades ya que cuenta con una densa variedad de sistemas microbianos, una buena capacidad para retener agua, buena permeabilidad al aire y contiene un gran número de nutrientes intrínsecos, sin embargo el compost presenta algún tipo de inestabilidad y tendencia a compactarse – como se pudo apreciar durante la experimentación – aumentando la caída de presión. Por lo que se decidió para evitar este tipo de complicaciones mezclándolo con cascarilla de arroz. Por otra parte, la cascarilla de arroz contribuye al aumento de la porosidad del medio de soporte y permite que la población microbiana – tanto hongos como bacterias – aumente, en especial cuando se humedece.

La tabla 12 muestra un resumen de las condiciones de Diseño para el sistema de biofiltración.

---

en: <http://www.torres-refrigeracion.com/scripts/php4/psicrometria.php>

Tabla 9. Parámetros de Diseño sistema de Biofiltración.

Características del biofiltro		Humidificador	
Diametro	0,10 m	Volumen	2,9 L
Altura	0,80 m	T de Trabajo	7 días
T de residencia	55,22 s	Caudal de Trabajo	0,358 m <sup>3</sup> /s
Caudal de Trabajo	0,409 m <sup>3</sup> /s	Burbujeador	
Material del Lecho	Compost- Cascarilla	Volumen	1,0 L
Conc. Entrada	40 ppm CH <sub>2</sub> O	T de Trabajo	2 días
Sutancia de Trabajo	Formalina 37% Merck	Caudal de Trabajo	0,051 m <sup>3</sup> /s

Fuente: Autores

## 7.2. Montaje del equipo de biofiltración.

Para la construcción del Biofiltro se consideraron los siguientes materiales vidrio, PVC y acrílico; escogiéndose este ultimo por ser más versátil, resistente, de menor costo y permitir observar el material de relleno.

Se montó una estructura de 4 cilindros de 0,25 m de altura y 0,10 m de diámetro, para cumplir con el tiempo de residencia planteado en la etapa de diseño, cada cilindro cuenta con una base perforada con 40 orificios de 0.005 m de diámetro, que permiten el ascenso del aire con el contaminante y a su vez dejan pasar el agua, además de servir de soporte del medio filtrante; la base está hecha sobre una placa circular de 0,14 m de diámetro, el extremo superior de cada sección cuenta con un aro de acrílico que permite un acople perfecto entre cada una de las secciones, adicionalmente se les han acondicionado O'rings de 0,105 m para evitar cualquier tipo de fugas y se ajusto con tornillos metálicos.

En la primera sección se ha adaptado un pasa muros metálico de 0.012 m al cual se le acondicionó una manguera de látex que lleva la corriente de gas contaminado proveniente la zona de mezcla, en esta misma sección se adapta otro pasa muros de 0.008 m para tomar muestras, esta última operación se hace en las secciones 2, 3 y 4, todos los pasa muros cuentan con un O'ring



para evitar fugas y están acondicionados a manguera rígida, que va conectada a una venoclisis marca Baxter. A excepción del de la sección 4, que permite la salida del gas filtrado.

Los extremos cuentan con una tapa de 0.10 m de altura, a la ubicada en la parte superior se le adaptó un nebulizador de agua, que distribuye uniformemente la entrada del líquido para mantener la humedad adecuada en el filtro, la ubicada en la base permite retirar los lixiviados producidos durante el proceso. En cada una de las secciones se puso una capa de grava de 0.02 m de altura y posteriormente se dispuso la mezcla compost cascarilla de arroz, la altura del lecho para cada sección fue de 0.20 m, con el fin de cumplir con los parámetros de diseño y obtener los 0.80 m totales, tanto el compost como la cascarilla se adquirieron en un establecimiento comercial para garantizar la ausencia de patógenos. Finalmente el filtro se ubicó sobre un soporte metálico. La figura 4 muestra el montaje del Biofiltro.

Para el Humidificador los cálculos de diseño arrojaron un volumen de 0.0029 m<sup>3</sup>, se usó un balón de 3 Litros, a este se le acondicionó un corcho con dos orificios, al primero de los orificios se adaptó un tubo de 0.005 m de diámetro y 0.20 m de largo, por el cual ingresaba el aire proveniente del compresor y para el otro orificio se usó un tubo del mismo diámetro pero con solo 0.04 m de largo, con este volumen se favorece la transferencia de masa, ya que el tamaño de la burbuja es grande. Para el burbujeador de formaldehído se usó un frasco lavador de gases con placa filtrante, porosidad P1, con una altura total 275 mm, conexión esmerilada NS 29/32, y olivas para manguera de 11 mm de diámetro exterior, la placa filtrante permite que el volumen de trabajo sea más pequeño que el del diseño, ya que forma más burbujas y la difusión del formaldehído en el aire es más alta porque se aumenta el área superficial. La figura 5 muestra el montaje de los dos recipientes.

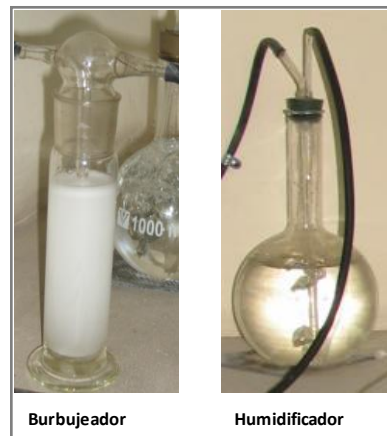
**Figura 4. Montaje del Biofiltro.**



**Fuente: Autores**

Todas las conexiones entre los diferentes componentes del sistema se hicieron con mangueras, se usaron mangueras de látex de 11 mm de diámetro y las divisiones se hicieron usando T de vidrio que se acoplaban fácilmente a las mismas. El sistema se fijo al laboratorio usando grapas metálicas y plásticas para evitar fugas. Y los posibles lugares en donde se detectaron las mismas se cubrieron con silicona. A la salida del filtro se puso un kitasato de 2 litros de capacidad con una solución de Bisulfito de sodio al 1%, para absorber los residuos de formaldehído que no hayan sido removidos por el filtro.

**Figura 5. Vista del humidificador y Burbujeador de Formaldehido.**



**Fuente: Autores**

El suministro de aire es de forma continua y se hace desde una turbina de aire para acuario, marca Yuting, que tiene un caudal de 50 L/min, el caudal de entrada se reguló haciendo una división a la salida de la turbina a la que se le adaptó una válvula, de tal forma que se pudo suministrar el caudal de trabajo deseado. La figura 6 muestra el montaje definitivo del sistema de biofiltración.

**Figura 6. Sistema de Biofiltración de Formaldehido, Montaje Definitivo.**



**Fuente: Autores**

### **7.3. Puesta en marcha el equipo de biofiltración.**

El sistema de biofiltración se empezó a operar el día 1 de abril de 2008, en esta fase se utilizaron concentraciones bajas de contaminante (10 ppm), para aclimatar a los microorganismos del compost y evitar mortalidad o inhibición de los mismos, el Biofiltro se mantuvo en estas condiciones hasta el día 8 de abril de 2008. Posteriormente se monitoreo el comportamiento de las concentraciones de entrada y salida y se observo una ligera disminución de la eficiencia de remoción alcanzándose niveles entre el 40 -50%, para el 15 de abril la eficiencia de remoción volvió a subir y se decidió empezar de nuevo a experimentar el día 18 de abril. Manteniendo el caudal propuesto en el diseño. El sistema se monitoreó durante 32 días hábiles, cada análisis se hacía por duplicado para corroborar la validez del mismo.

#### **7.3.1. Toma de muestras**

##### **Concentración de Formaldehido:**

La concentración de formaldehido se monitoreo en línea utilizando toma muestras a la entrada del filtro, y a la salida de cada una de las secciones del mismo, el toma muestras se diseño usando una venocllisis marca Baxter, la cual se adapto mediante una T de vidrio a la entrada del filtro y a la salida del mismo, para el muestre en las secciones se adapto a cada uno de los pasa muros existentes para tal fin, la entrada se reforzó con cinta de teflón para evitar cualquier tipo de pérdidas. Las válvulas de la venocllisis se abrían totalmente a la hora de realizar el muestreo por un periodo de 10 minutos y se dejaba burbujear el gas sobre una solución de bisulfito de sodio 1%, el cual se encontraba en erlenmeyers con desprendimiento lateral de 250 ml a la entrada y de 100 ml en los demás casos. Para la medición de caudal de cada uno de

los toma muestras se utilizo un calibrador primario de aire, marca Buck. La figura 7, muestra el montaje utilizado para el muestreo.

Figura 7. Muestreadores de Formaldehido.



Fuente: Autores

Posteriormente se aplicó el método espectrofotométrico del ácido cromo trópico (NIOSH 3500) tomando una alícuota de 4 ml y llevándose a un tubo de 16 x150 con tapa, a la que se le adicionan 100  $\mu$ L de solución 1% y 6 ml de  $H_2SO_4$  98%, posteriormente se llevaba por 15 minutos a 95°C al termoreactor WTW CR3200, después se dejaban enfriar los tubos a temperatura ambiente y se procedía a medir la absorbancia a 565 nm, en el fotómetro Nova 60 en una celda de 10 mm. Con esto se determinó la masa de contaminante presente en la muestra comparándose con la curva de calibración (Figura 8) y multiplicándose por el factor de alícuota, la masa molecular del formaldehido y dividiéndose por el volumen estándar se obtuvo la concentración en ppm.

#### **Determinación de Humedad:**

La prueba se hizo semanalmente, para ello se tomo una pequeña muestra del medio de soporte y se llevó a un crisol previamente pesado, se puso en una estufa a 105°C durante 18 horas y posteriormente se llevo a un desecador. Finalmente por diferencia de pesos se determinó la Humedad. Para mayor

información sobre la forma en la que se realizó estas determinaciones, consultar el Apéndice 3.

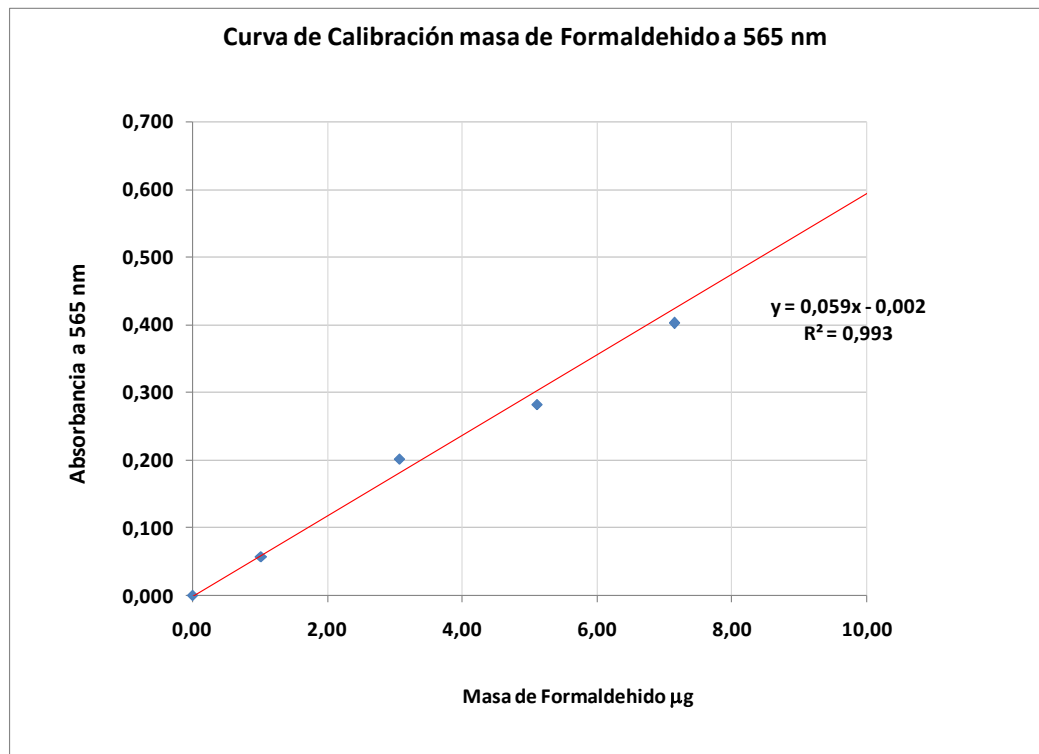
#### **Determinación de pH:**

Se midieron 20 mL de muestra; a estos se les agregó 20 ml de agua desionizada, se agitó intermitentemente por 1 hora y se dejó reposar por media, posteriormente se tomó la lectura con un pH metro marca SCHOTT, previamente calibrado a pH 4.0 y a pH 10.0

#### **Microorganismos:**

Se determinaron los microorganismos aerobios totales, anaerobios totales y micro flora del suelo –en especial del género *Pseudomonas Sp.* –, antes de iniciar el proceso de biofiltración y al final del mismo, para ello se tomaron muestras de 1 kg, del medio.

Figura 8. Curva de calibración para determinar la masa de formaldehído



Fuente: Autores

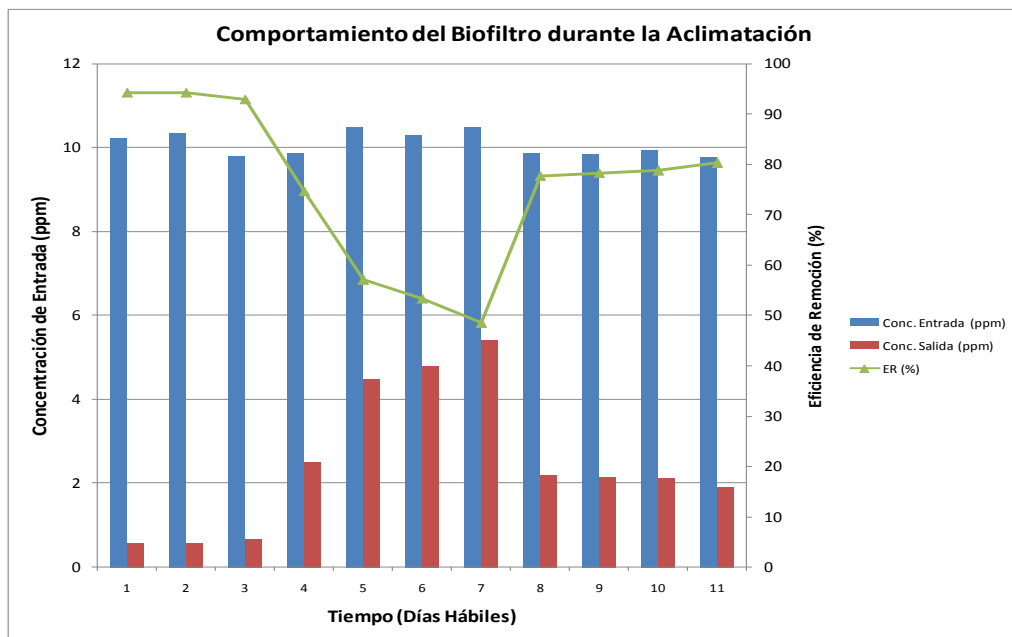
### 7.3.2. Experimentación:

El montaje del biofiltro definitivo fue instalado en la última semana de marzo de 2008, en esta se hicieron las pruebas correspondientes para verificar la hermeticidad del filtro y corroborar que no hubieran fugas, adicionalmente se comprobó que la caída de presión fuera baja en el sistema para evitar acumulación en la parte inferior del filtro. Posteriormente se dividió la investigación en dos fases principales, Fase de aclimatación y fase de experimentación aplicada.

#### 7.3.2.1. Fase de aclimatación:

La fase de aclimatación se desarrolló entre el 1 y el 15 de abril de 2008, el objetivo de esta fase fue familiarizar a los microorganismos con el contaminante y evitar inhibición o mortalidad de los mismos por alteración de su fuente de alimento. En esta etapa se monitoreó la concentración de entrada al filtro y la concentración de salida, se trabajo con concentraciones pequeñas de formaldehído inferiores a 10 ppm, adicionalmente se buscaba encontrar un estado de equilibrio que permitiera inferir que el filtro se encontraba listo para evaluar la capacidad real de eliminación por efectos de metabolismo de los microorganismos y no por adsorción del medio de relleno o absorción del agua existente. La figura 9 muestra el comportamiento de las concentraciones durante la fase de aclimatación y la eficiencia de remoción del biofiltro, en este periodo de tiempo.

Figura 9. Comportamiento del Sistema de Biofiltración durante la aclimatación



Fuente: Autores

### 7.3.2.2. Fase de Experimentación aplicada



La fase de experimentación se inició el día 16 de abril de 2008, se desarrollo durante 31 días en la cual se monitorearon diariamente las siguientes variables: Concentración de entrada de formaldehido, concentración de formaldehido a la salida de cada sección del Biofiltro, y cada 3 días hábiles pH y humedad.

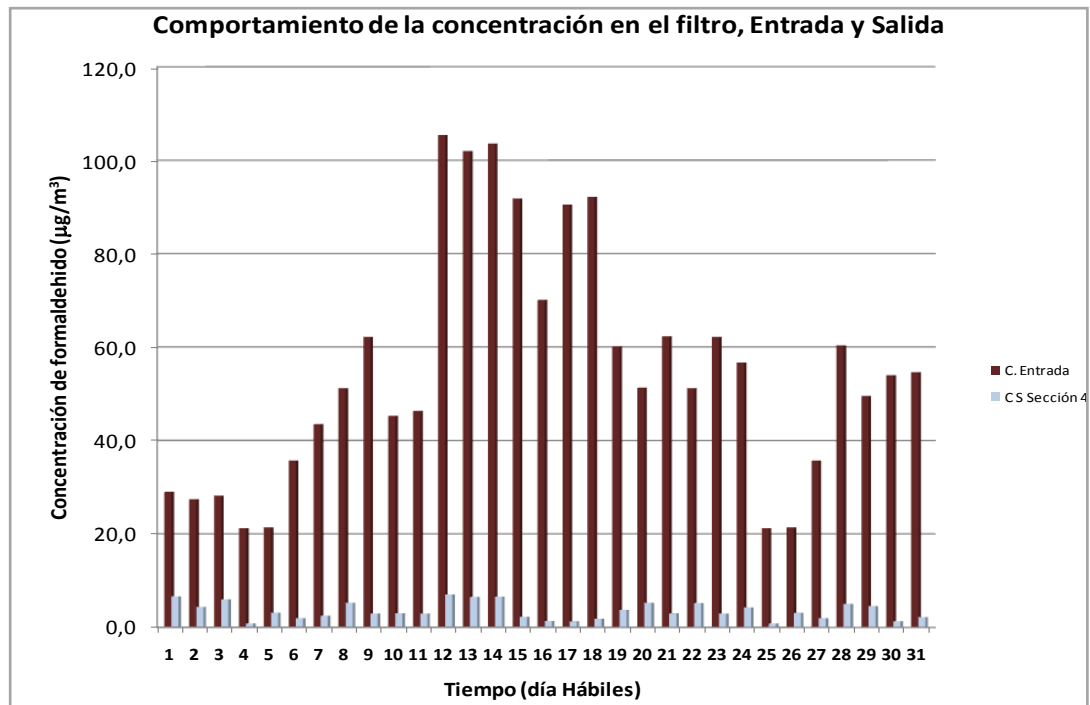
### **Concentración de Entrada:**

La concentración de entrada al biofiltro se monitoreó utilizando una venocllisis que permitía muestrear un volumen determinado de aire, el cual se burbujeaba sobre 100 mL de solución 1% de NaHSO<sub>3</sub>. Posteriormente se le aplicaba el Método NIOSH 3500. La muestra se tomaba en línea para evitar paradas y alterar las condiciones del biofiltro, se hacían pruebas diarias y se hacían análisis por duplicado, considerando una muestra valida si la variación era menor al 10%. La figura 10 muestra las concentraciones de entrada durante la operación.

### **Concentración de Salida:**

La concentración de salida del biofiltro se monitoreó de la misma forma que para la entrada, únicamente se modificaba el volumen de la solución absorbente, para este caso se utilizaban 40 mL, esto con el fin de obtener mayores concentraciones y tener una mayor confiabilidad del método. En la figura 10 se muestra el comportamiento de esta variable.

**Figura 10. Concentraciones de entrada y salida monitoreadas en la fase de experimentación aplicada.**



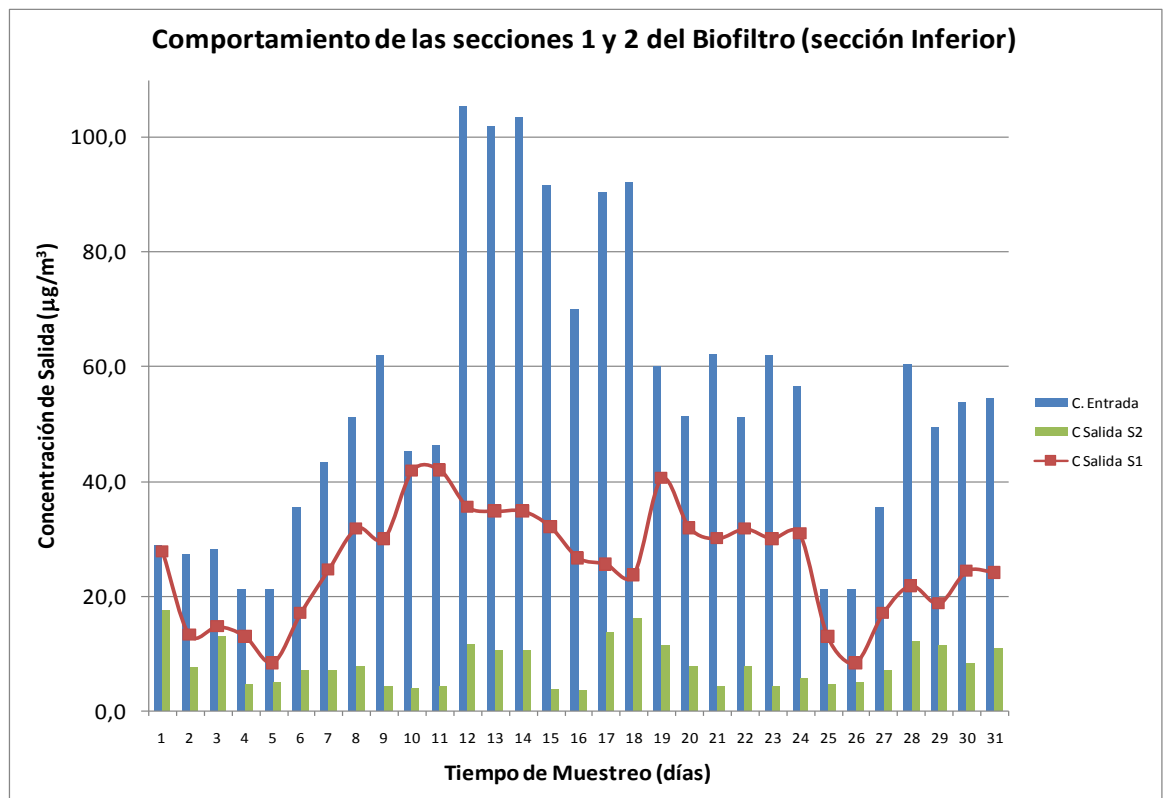
Fuente: Autores

Los datos obtenidos se presentan en el ANEXO 5.

### Monitoreo del Perfil de concentración en el Biofiltro:

El Diseño del biofiltro permitía evaluar en cada sección cual era la eficiencia de remoción, para la cual se adecuó un punto de toma de muestra al final de cada sección. De tal forma que se pudiera evaluar como mejoraba la remoción del contaminante por aumento del volumen del lecho. En la figura 11 se muestra el comportamiento de la concentración en las secciones inferiores (1 y 2), a la entrada y a la salida. Esta figura muestra en las barras azules la concentración de entrada al biofiltro que es la misma que entra a la sección 1. La línea roja muestra la concentración de salida de la sección 1, y que es la misma de entrada a la sección 2. Y finalmente las barras verdes muestran la concentración de salida de la sección 2. Es claro que a medida que asciende el contaminante en el filtro disminuye la concentración.

Figura 11. Comportamiento del biofiltro en las secciones inferiores.

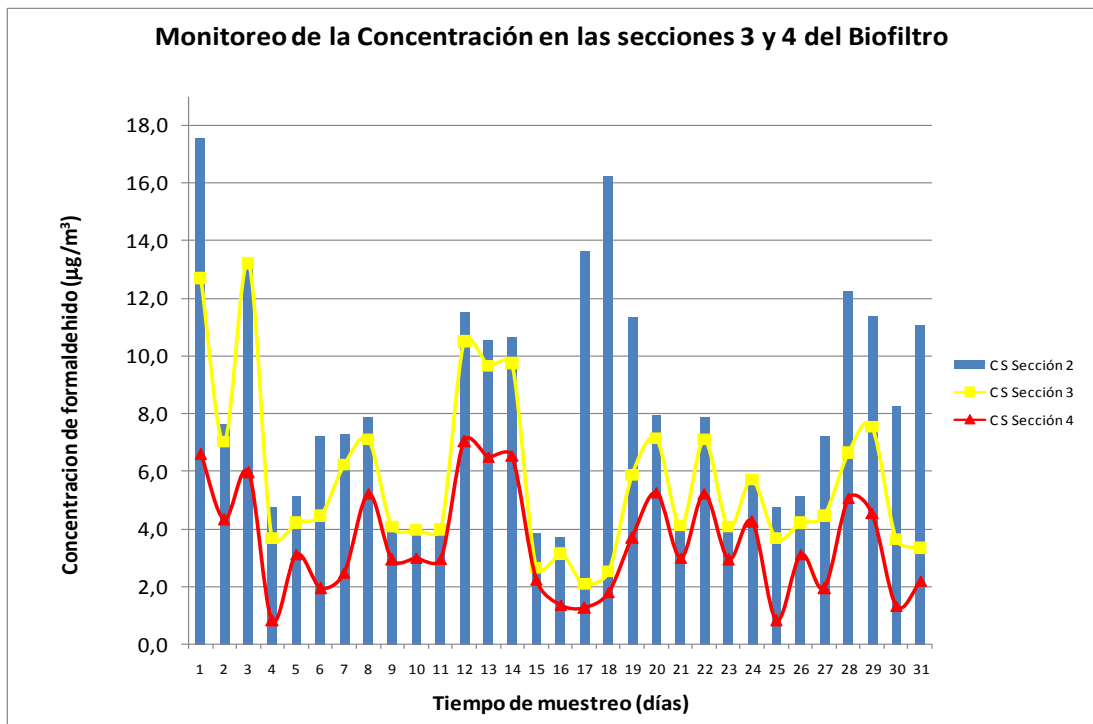


Fuente: Autores

El comportamiento de las secciones 3 y 4, se muestra en la figura 12, las barras corresponden a la concentración de salida de la sección 2, la cual es la misma de entrada a la sección 3, la línea amarilla es la concentración de salida de la sección 3 y de entrada a la sección 4, y la línea roja corresponde a la salida del biofiltro, sección 4.

La finalidad de hacer el muestreo en las diferentes secciones del filtro, fue identificar en cual zona era más eficiencia, para poder realizar diferentes comparaciones que permitan modificar el diseño a futuro y seguir aumentando la capacidad de eliminación de contaminante por medio de biofiltración.

Figura 12. Comportamiento de las secciones del Biofiltro Secciones (3 y 4)

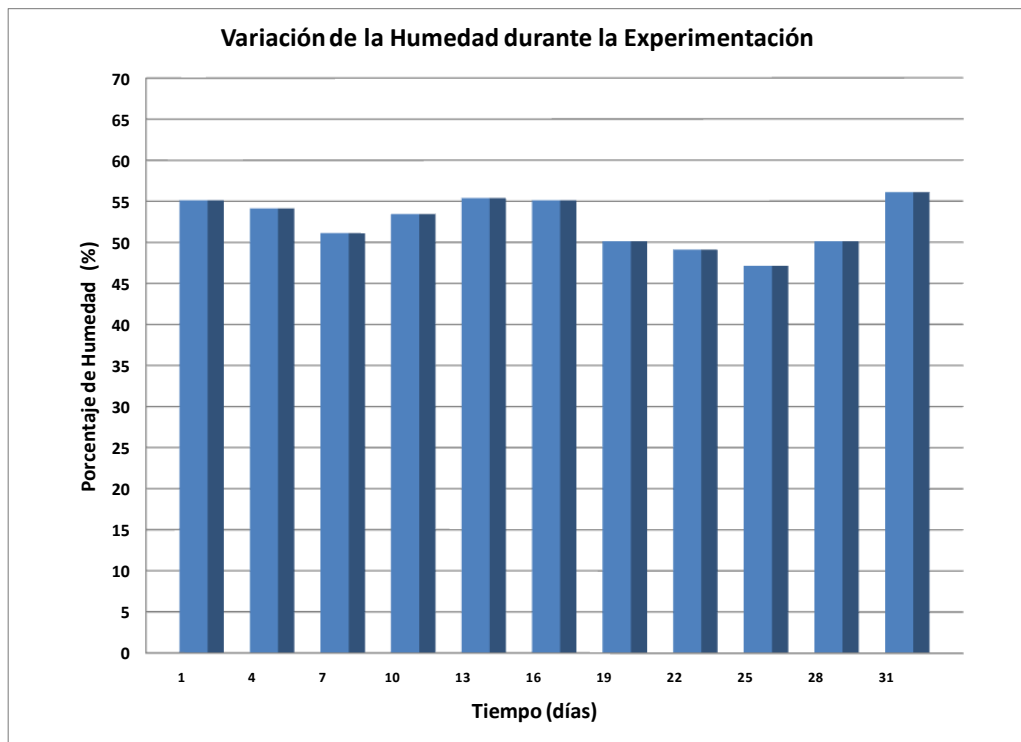


Fuente: Autores

### Medida de Humedad:

En la investigación se hicieron análisis de humedad del sustrato cada 3 días, para ver el comportamiento, y en caso de notar disminuciones demasiado altas, poder suministrar agua para que este parámetro fuera constante durante de experimentación aplicada. La figura 13 muestra el comportamiento de la humedad con respecto al tiempo, cabe resaltar que una vez se tomaba la muestra, se necesitaba de mínimo 18 a 24 horas para poder tomar una decisión. Adicionalmente, se podía observar si la pérdida de agua era alta, por la generación de lixiviados, los cuales eran extraídos por el extremo inferior (base del biofiltro). En el anexo 3 se presenta el método utilizado.

Figura 13. Comportamiento de la Humedad durante la fase de experimentación aplicada

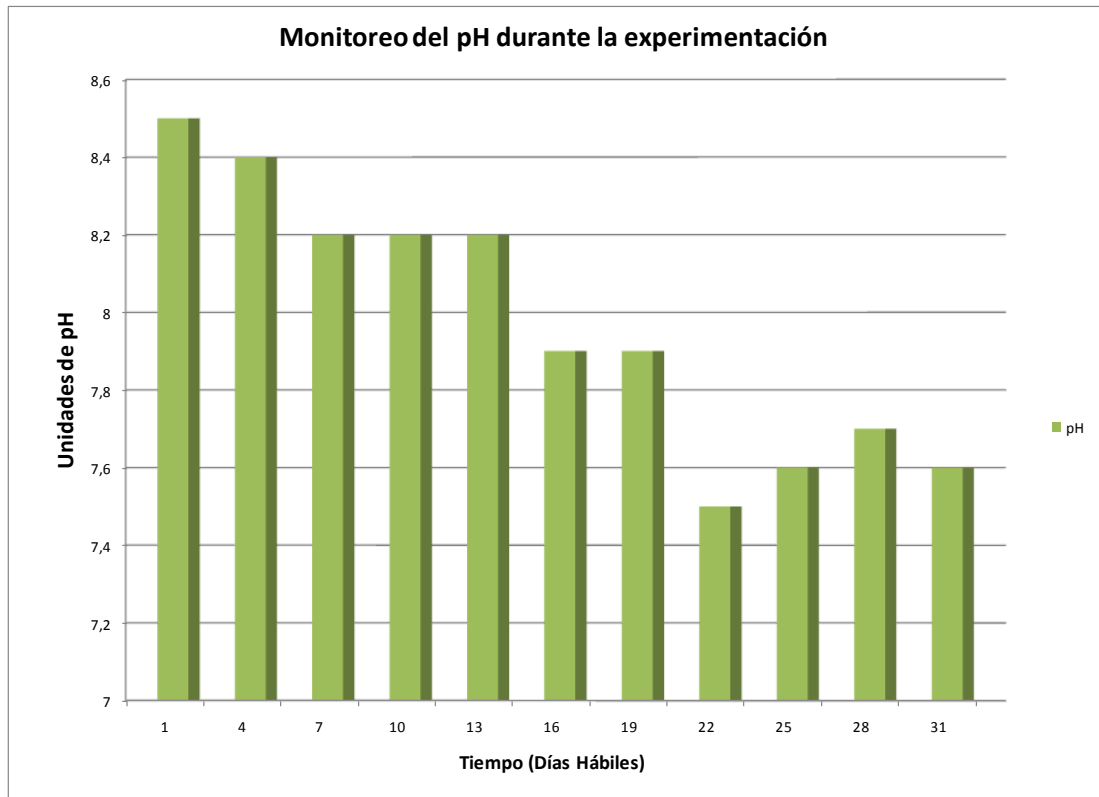


Fuente: Autores

### Medida de pH:

Se consideró necesario monitorear el pH por su influencia sobre los microorganismos. Se sabe que cambios súbitos de pH pueden inhibir a algunos microorganismos, y en otros casos eliminarlos. Asimismo, el formaldehído por ser un producto de la oxidación incompleta del metanol, podría seguir su fase de oxidación hacia ácido fórmico, lo cual sería indeseable para los fines de la investigación. Por lo tanto, el pH sirve como variable de control, de reactivo y de condiciones dentro del filtro. La figura 14 presenta los resultados de los muestreos realizados. El pH se monitoreó los mismos días que la humedad, aprovechando que se retiraba muestra del equipo. La técnica usada se presenta en el Anexo 3.

Figura 14. Comportamiento del pH, durante la fase de experimentación aplicada.



Fuente: Autores

## 8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 8.1. Método de análisis:

Antes de iniciar la evaluación del proceso de biofiltración de formaldehído, era necesario desarrollar e implementar un método de análisis instrumental que permitiera obtener resultados confiables, el cual pudiera ser adaptado a las condiciones de trabajo del laboratorio – lo que incluye los equipos, materiales y reactivos necesarios –, fuera representativo cuantitativamente, que a su vez facilitara un análisis eficiente y práctico de los resultados, y que éstos pudieran ser validados frente a estándares nacionales e internacionales.

Identificada tal necesidad, se procedió a realizar la curva de calibración (según se registra en la Figura 8) – teniendo en cuenta la norma ASTM E1333. Hecho palpable de lo anterior, resulta en observar que mediante el método de mínimos cuadrados, el valor del índice de correlación,  $R^2$ , es de 0.993, lo cual indica que existe una relación directa entre las variables establecidas en la curva. Este hecho confirma lo registrado en el método de la ASTM E1333 y la NIOSH 3500, con lo cual se llega a la conclusión que la curva de calibración cumple con lo establecido, y por tanto, se podía continuar con las siguientes fases del proyecto, por cuanto ya se tenía un referente comparativo que permitiera con posterioridad realizar el análisis de los resultados que arrojarían las demás fases de la investigación. Los datos estadísticos relacionados con la curva de calibración, se encuentran en el apéndice 4.

## **8.2. Condiciones de humedad:**

Al observar los resultados arrojados por las determinaciones de humedad del biofiltro, en sus diferentes muestras a lo largo de la fase de experimentación aplicada, se puede establecer que los valores de humedad oscilaban entre el 47% y el 56%, con un promedio de 52%, lo cual coincide con la literatura, la cual recomienda mantener niveles de humedad entre el 50 al 70% dentro del material de soporte, por cuanto ésta incide directamente en la capacidad de eliminación de contaminante.

Por otra parte, en la figura 13 se muestra que en el día 25, la muestra refleja que el contenido de humedad era de 47%, lo cual indicaba la falta de humedad en el filtro, a consecuencia de la falta de humectación del filtro, por lo que se procedió a humectarlo de forma tal que no afectara las demás secciones, esto se realizó de forma gradual, por lo que se puede apreciar que durante las mediciones en los días siguientes aumentó de forma leve la humedad, hasta llegar al nivel promedio.

Como se mostrará en la fase de aclimatación y de experimentación aplicada, la humedad no solamente influía dentro de la remoción de contaminante mediante el proceso de absorción, sino que los lixiviados formados permitían que el contaminante fuera posteriormente degradado desde las secciones superiores (de menor actividad degradativa) a las secciones inferiores (las cuales tenían una mayor actividad degradativa).

Cabe resaltar que los muestreos se realizaron en la sección 2, por estar en la parte media del biofiltro, era la que presenta la mayor estabilidad en cuanto a los niveles de humedad dentro del biofiltro, en comparación con las secciones superiores, las cuales eran las primeras en tener contacto con la fuente de humectación, por lo que las muestras tomadas de estas secciones arrojarían errores sobre la situación real del biofiltro. Se espera que en próximos estudios se pueda llevar una mayor rigurosidad de las condiciones de humedad en cada



una de las secciones del biofiltro, y con menores tiempos de muestreo. Sin embargo, el lugar ideal para la realización de las muestras de humedad era en la sección 1, puesto que es el punto por el cual la corriente de aire contaminada entraba en el equipo. Desafortunadamente, sólo se pudieron realizar determinaciones en la segunda sección.

### 8.3. Condiciones de pH:

De acuerdo con los valores obtenidos en las determinaciones de pH de cada una de las muestras, se puede afirmar que hubo un proceso de acidificación dentro del biofiltro, puesto que el pH pasó de un valor de 8.5 en el primer día de de experimentación, disminuyendo hasta valores de 7.6, llegando a valores mínimos de 7.5 en la tercera semana de experimentación.

Es importante tener presente que de acuerdo con la información suministrada por el comercializador del compost y de acuerdo con los análisis de comprobación realizados al compost, el pH del era de 8.9, y que al realizar la mezcla con la cascarilla de arroz, su pH disminuyó ligeramente al valor inicial de 8.5. Asimismo, aunque los valores de pH disminuyeron levemente durante la fase de experimentación aplicada, indica que hubo formación de ácido fórmico por oxidación del formaldehído, debido a los procesos de absorción del contaminante. La reacción mediante la cual hubo formación de ácido fórmico se presenta a continuación:



Sin embargo, el aumento del valor de pH en la última semana de experimentación indica que los microorganismos degradaron de forma más rápida el formaldehído, lo cual hizo que la formación de ácido fórmico fuese menor. Otra razón, es que durante los días 25 y 28 se realizó la humectación del medio de soporte, lo cual es posible que lavara el mismo, con lo que las

concentraciones del medio de soporte disminuyeran. Se espera que en futuros estudios se realicen determinaciones de pH con mayor frecuencia y en todas las secciones del biofiltro, con el fin de dar un seguimiento más preciso de la situación existente en cada una de las secciones, y observar en cuales se presenta la mayor acidificación, con el fin de determinar aspectos tales como la eficiencia de remoción. También, es importante que se hagan determinaciones de ácido fórmico en el medio de soporte, con el fin de comprobar la formación de éste a través del tiempo.

#### **8.4. Fase de aclimatación:**

Para la fase de aclimatación se pudo observar que la concentración de entrada era constante y oscilaba alrededor de 10 ppm. La finalidad de esta fase consistía en la formación de la biopelícula con los microorganismos que se encontraran en el compost para la degradación del contaminante, ya que no se podía asegurar que éstos comenzaran a degradar el contaminante inmediatamente estuvieran en contacto con el formaldehído; adicionalmente, el compuesto alimentado se encontraba estabilizado con metanol y existe una mayor selectividad hacia el metanol que hacia el formaldehído, por lo que era necesario observar cuidadosamente el comportamiento de las variaciones en la eficiencia de remoción.

Al observarse la figura 9, es claro que la eficiencia de remoción durante los tres primeros días de trabajo fue superior al 90%, lo cual era de esperarse ya que en estos días se deduce que se presentaron fenómenos de adsorción y absorción por parte del compost; y además, el formaldehído es bastante soluble en agua, y el sustrato tenía un contenido de humedad superior al 50%, que absorbería fácilmente el contaminante. La eficiencia de remoción empezó a disminuir hacia el día 4, alcanzando su menor valor (48,57%), el día 7. De

este comportamiento se puede inferir que los fenómenos de transferencia de masa han disminuido, por la saturación del sustrato con el contaminante, y por lo tanto las diferencias de concentraciones son cada vez más pequeñas. Para el día 8 la eficiencia de remoción aumentó de nuevo, indicando la formación de la biopelícula con los microorganismos sobrevivientes y condicionados para la degradación del formaldehído, y se estima que la disminución en la concentración de salida de formaldehído fue producida por el metabolismo del mismo por parte de los microorganismos.

Hacia el día 9 se alcanzó una eficiencia de remoción superior al 75% y, como este comportamiento se mantuvo durante los días 10 y 11, se decidió terminar con la fase de aclimatación y pasar a la siguiente etapa de la experimentación.

#### **8.5. Perfil de concentración en el equipo:**

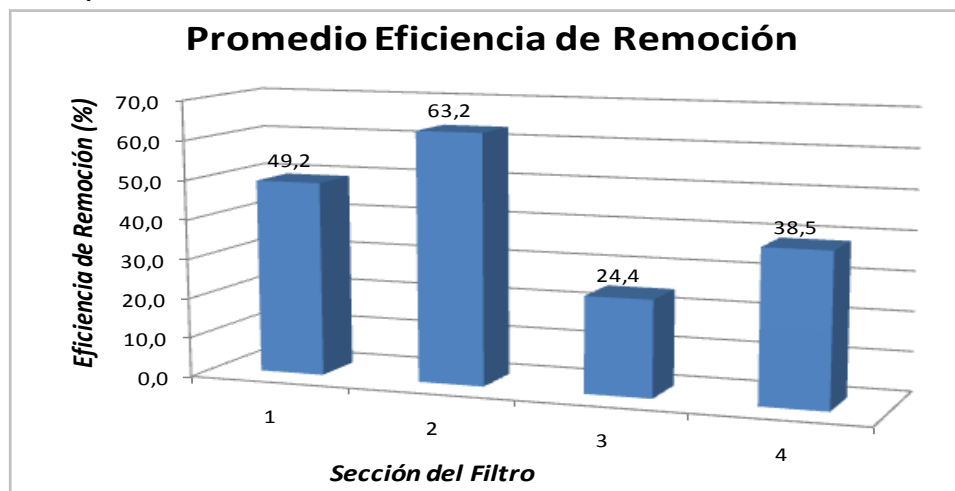
Al diseñar el biofiltro se buscó poder medir diferentes variables dentro del mismo, por lo que en la fase de diseño se concibió que el biofiltro fuera compuesto por 4 secciones, así que se midieron las concentraciones de formaldehído en diferentes puntos de cada una de las secciones, para aproximarse lentamente a un estudio diferencial del fenómeno, en un estudio posterior se sugiere medir variables como temperatura, humedad y crecimiento bacteriano.

Si bien el estudio no fue lo suficientemente riguroso para hacerlo, ya que se requerirían secciones mucho más pequeñas, se pudo ver que el comportamiento no es el mismo en todas las secciones y las diferencias en cuanto a capacidad de eliminación es alta. Las figuras 11 y 12 dejan ver cuál es el comportamiento de las concentraciones, en el transcurso del tiempo a lo largo del filtro y si bien la tendencia general es la misma es representativo que

algunas secciones realizan un mejor trabajo que otras. Según Devinny (1999), la sección en la cual se presenta la mayor remoción de contaminante es la primera que entra en contacto con el mismo, para el caso en estudio se entiende que esta es la primera.

Adicionalmente, esto permite evaluar como mejora la capacidad de eliminación del filtro a medida que aumenta el tamaño del lecho. La figura 15, muestra la capacidad de eliminación promedio para cada una de las secciones del filtro, en ella se puede ver que la sección que presenta la mayor capacidad de eliminación es la sección 2, seguida de la sección 1, mostrando que las secciones inferiores son las que remueven la mayor cantidad de contaminante, aunque estas no logran una remoción total del contaminante y dejan ver la necesidad de tener las otras dos secciones.

Figura 15. Comportamiento de la eficiencia de remoción en las diferentes secciones del biofiltro



Fuente: Autores

Para el caso del formaldehído la eficiencia de remoción es mayor en la sección 2 que en la sección 1, este comportamiento no es típico para la biofiltración pues se hubiera esperado que la mayor eficiencia se presentará en la sección 1, cabe aclarar que al biofiltro se suministró también metanol, el cual no se cuantificó en el presente estudio, Prado (2004), encontró que el metanol es una fuente de carbón más accesible para los microorganismos causando inhibición en la remoción de formaldehído, por lo que se infiere que la remoción del

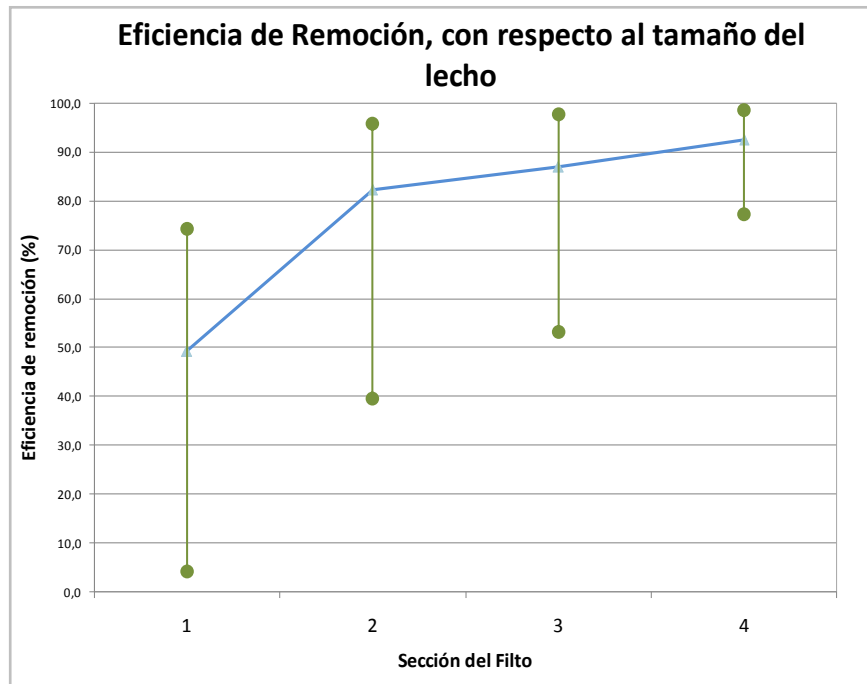
metanol se presentó en la primera sección, disminuyendo la selectividad de la misma hacia el formaldehído y que una vez se eliminó el metanol, la selectividad aumento hacia el formaldehído, situación que tuvo lugar en la segunda sección, con lo que se explica el comportamiento aparentemente atípico, se recomienda en un futuro estudió cuantificar los dos contaminantes o usar una fuente de formaldehído puro.

En la sección 3 se presenta la eficiencia de remoción más baja y se puede atribuir a que las concentraciones de entrada al ser más bajas que en las secciones del filtro anteriores, hicieron que los microorganismos tuvieran un grado de adaptación menor, lo que incide directamente en la capacidad de eliminación del contaminante. También es posible que la fuente de carbono para su metabolismo no la obtengan del formaldehído, sino del medio.

Finalmente, se ve que la eficiencia de remoción de la última sección del biofiltro vuelve a subir, y se atribuye a que esta sección es la primera en tener contacto con la fuente de humectación, por lo que se presentan fenómenos de absorción que complementan la remoción de contaminante en la biopelícula, en donde se desarrolla la biofiltración.

Además de estudiarse la eficiencia de remoción por secciones también se puede analizar la eficiencia de remoción acumulada a través del filtro, cada sección cuenta con una altura de 0,20 m para una altura total de 0,80 m. En la figura 16 se muestra el comportamiento de la eficiencia de remoción a medida que se aumenta el tamaño del lecho.

Figura 16. Eficiencia de remoción acumulada a la largo del biofiltro.



Cuando el tamaño del lecho es muy pequeño, se obtienen valores que no superan una eficiencia de remoción del 75 – 78 %, con una eficiencia media del 49%, por lo que son valores bastante bajos. Esto quiere decir que para la carga contaminante que se le administraba a la primera sección del biofiltro (con una altura de 0.20 m), no eran suficientes para generar una emisión adecuada. Si se observa ahora el comportamiento del biofiltro al sumar la sección 2 (con una altura de 0.40 m), la eficiencia de remoción alcanzó valores superiores al 90%, pero la dispersión de los resultados sigue siendo alta, por lo tanto no se garantiza una emisión con una baja concentración de contaminante de forma constante. Finalmente, en la sección 4 se ve que la dispersión es bastante pequeña y que la eficiencia de remoción es superior al 80%. Por lo tanto, es claro que a mayor volumen de lecho, mayor eficiencia de remoción, pero también se ve que cuando se aumenta el volumen, la remoción tiende a volverse estable, de tal forma que se llega a un punto en donde aumentar el volumen no tendrá efectos significativos.

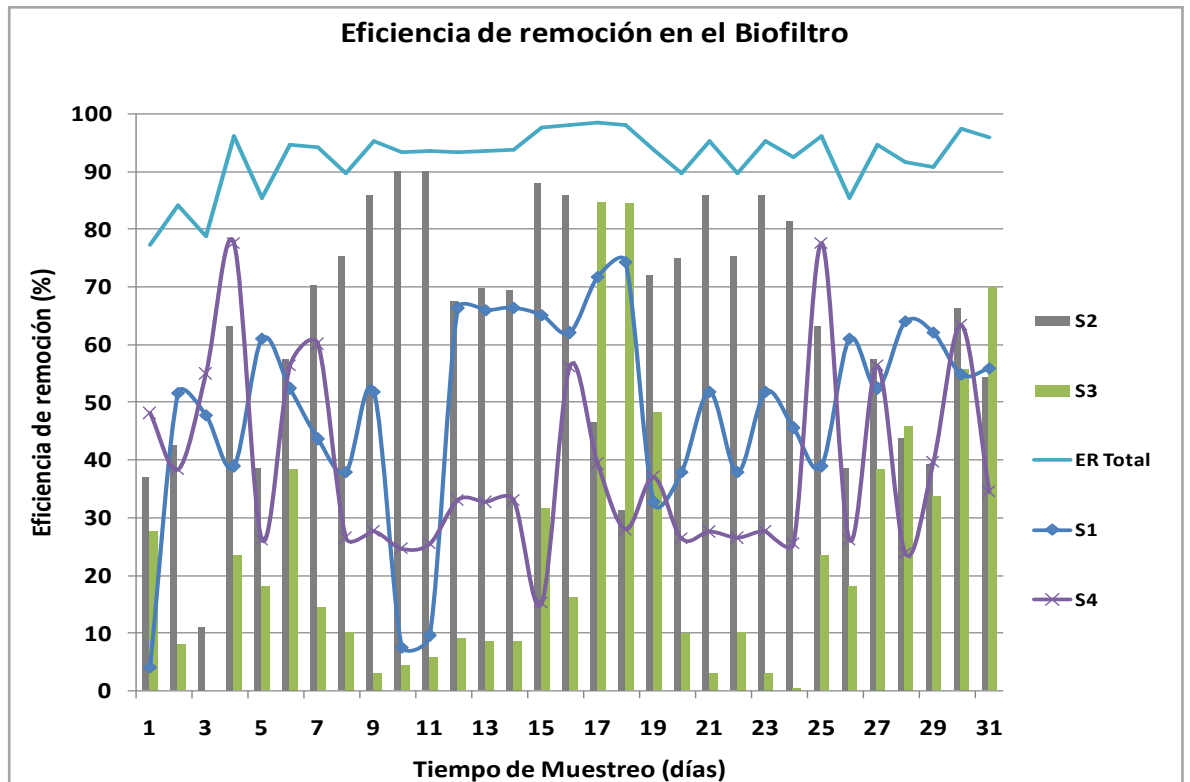
## **8.6. Eficiencia de remoción:**

La eficiencia de remoción se calculó según la ecuación 10, la cual es la diferencia que existe entre la concentración de entrada con la de salida, medida en porcentaje. La figura 17 muestra la eficiencia de remoción del biofiltro; la dispersión muestra como la eficiencia de remoción es la misma en cada sección y la línea continua presenta la eficiencia total del filtro.

En la figura 17 se observa que la eficiencia de remoción empezó con un porcentaje inferior al 80%, muy cercano al de la fase de aclimatación y fue subiendo hasta alcanzar niveles superiores al 90%. Solo se presentó una disminución de la misma en pocas ocasiones y la tendencia fue siempre mantenerse por encima del 90%. Con el comportamiento de la eficiencia se pudo corroborar que el trabajo realizado durante la aclimatación fue adecuado pues no hay diferencias significativas en los valores de ésta, a pesar de tener variaciones constantes de concentración; con ello se infiere que el biofiltro puede tratar de una forma eficiente concentraciones variables sin presentar problemas significativo, lo que constituye una ventaja a la hora de escalar el modelo a un nivel industrial, ya que generalmente es demasiado complicado mantener una concentración constante de los emisiones que se estén presentando en una empresa.

La eficiencia de remoción promedio fue del 92,8%, el rango de eficiencia de remoción se encontró siempre en valores superiores al 80%, pero al tomar los datos a partir del tercer día de la experimentación aplicada, descartando los tres primeros día de muestreo al considerarse que aún se encontraba el filtro en su última fase aclimatación, la dispersión existente en cuanto a eficiencia de remoción disminuye considerablemente.

Figura 17. Eficiencia de remoción en el Biofiltro



Fuente: Autores

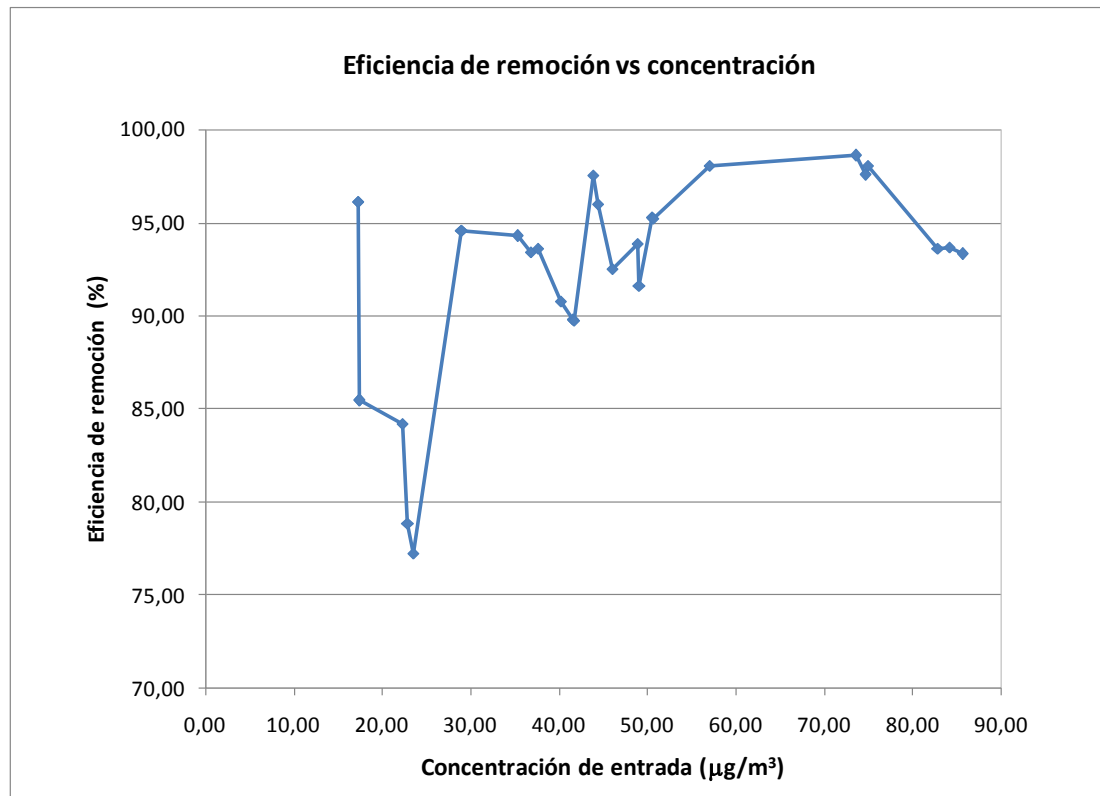
El rango de los datos disminuye en una decena aproximadamente, presentando una desviación estándar de 3,4 y no de 5,4 que era la existente cuando se tomaban los datos de los tres primeros días, en este caso se obtiene una eficiencia de remoción promedio de 93,7%, alcanzando un valor máximo de eficiencia de remoción del 98,6%. Lo anterior, indica que el biofiltro una vez alcanza su estado estable mantiene una eficiencia de remoción superior al 90%. Sin embargo, una investigación posterior permitiría monitorear otras variables como temperatura, humedad y medio de soporte que permitan aumentar la eficiencia de remoción promedio.

La dispersión que se muestra en la figura 17 ratifica la eficiencia de remoción en las dos primeras secciones del filtro, aunque cuando la eficiencia de remoción disminuye en las secciones inferiores aumenta en las secciones



superiores, para obtener una eficiencia de remoción constante a la salida del filtro, permitiendo una emisión relativamente constante.

Figura 18. Comportamiento de la eficiencia de remoción con respecto a la concentración.



La figura 18 muestra el comportamiento de la eficiencia de remoción con respecto a la concentración de entrada. En ella se puede ver que no hay una tendencia marcada de comportamiento para las concentraciones que se presentaron en el biofiltro, pero se ve que el sector de trabajo más estable estuvo a concentraciones superiores a 30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . En la misma figura se observa que cuando las concentraciones son altas, la eficiencia de remoción empieza a disminuir levemente –si bien nunca fue menor al 90%–. Es posible que si se aumentan las concentraciones a niveles superiores la eficiencia disminuya considerablemente.

De acuerdo a lo anterior se pudo ver que la eficiencia de remoción en el biofiltro es alta, si bien las pruebas se hicieron con formaldehído compuesto con el que no se han hecho demasiados estudios, se ratifica la viabilidad de esta

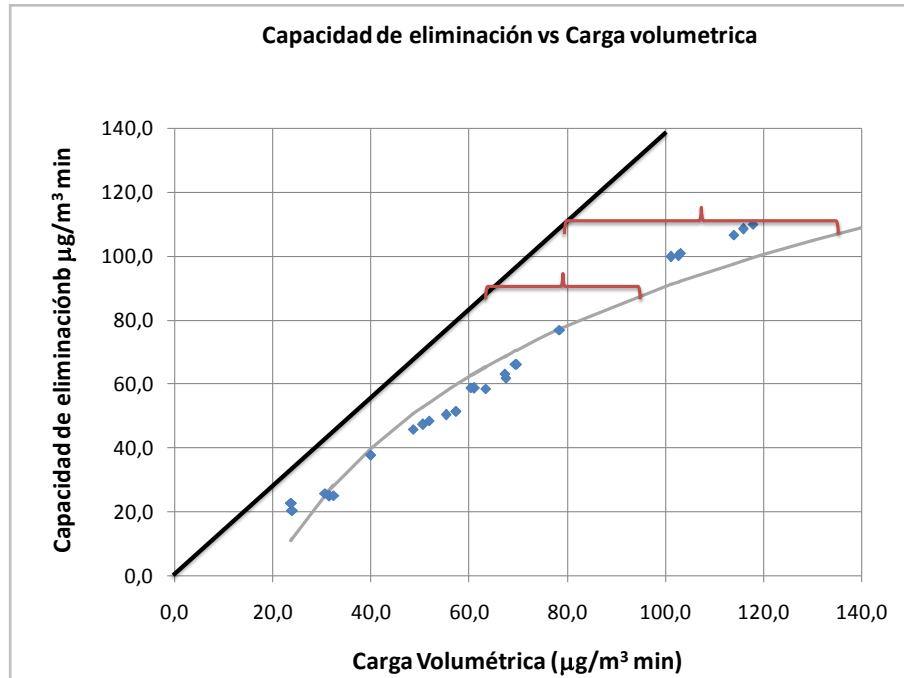
tecnología emergente como sistema de tratamiento de contaminantes, que permite alcanzar estándares altos que ayudaran a cumplir la normatividad aplicable.

### **8.7. Capacidad de eliminación y carga másica:**

Si bien la eficiencia de remoción nos da una idea general del funcionamiento del biofiltro, este parámetro solo describe las condiciones específicas del equipo o montaje sobre el cual se está trabajando, y no permite escalar los resultados para evaluar una posible aplicación industrial es por ello que se hace necesario evaluar otro parámetro conocido como capacidad de eliminación, para permitir una comparación de los resultados de dos sistemas de biofiltración diferentes porque el volumen y el flujo son normalizados por definición. Sin embargo la capacidad de eliminación es también una función de la concentración. La concentración efluente usada frecuentemente usada está dada por las metas o la normatividad correspondiente.

Para el biofiltro de formaldehido se observo que a bajas cargas de contaminante la capacidad de eliminación es cercana al 100% (figura 19), en donde la máxima capacidad de eliminación se alcanza en la recta  $y=x$ . En la misma figura se observa que a medida que aumenta la carga contaminante, disminuye la capacidad de eliminación, y los valores se alejan más de la recta del 100% de eficiencia; los corchetes horizontales rojos muestran claramente este aspecto, en el punto en el cual la tendencia de la recta cambia drásticamente se encuentra la máxima capacidad de eliminación para el sistema. Si bien para el formaldehido la curva empieza tener un cambio de comportamiento, este no es total y no se puede aseverar que se haya alcanzado la máxima capacidad de eliminación, por lo que se requiere aumentar la carga y hacer más ensayos para comprobar si realmente es este punto crítico.

Figura 19. Comportamiento de la capacidad de eliminación con respecto a la carga



Fuente: Autores.

Adicionalmente, las condiciones de experimentación no permitían trabajar con cargas de contaminante demasiado bajas, por lo que en la figura no se alcanzan a ver los puntos cercanos a la remoción del 100% esperado como los que se muestran en la figura 1.

## 9. CONCLUSIONES

Se diseñó un sistema de biofiltración a escala banco con el fin de estudiar la viabilidad de utilizar esta tecnología no convencional como mecanismo de control de contaminantes gaseosos, el cual facilitó la evaluación de variables tales como humedad, pH, y eficiencia de remoción tanto por secciones como de manera global.

Al observar los resultados obtenidos de la investigación se puede ver que la biofiltración es un método adecuado para remoción de formaldehído alcanzándose una eficiencia de remoción promedio del 92%, convirtiéndose en una opción a tener en cuenta a la hora de diseñar un sistema de remoción del mismo no solo a nivel industrial sino también a la hora de evaluar contaminación en interiores.

Con respecto a la humedad del material filtrante, estuvo dentro de los parámetros de diseño, con lo cual se garantizó que el medio de soporte tuviera las condiciones óptimas para que los microorganismos pudieran degradar el formaldehído. Asimismo, el pH dentro del biofiltro no sufrió grandes variaciones, lo que indicó entre otras, que el formaldehído efectivamente fue degradado por microorganismos y no removido mediante los fenómenos de adsorción ni absorción que se podían presentar en el biofiltro.

La eficiencia de remoción en el biofiltro se mantuvo constante sobre un valor del 90%, a pesar de las variaciones de concentración que se presentaron ya que se trabajaron bajas como 10 ppm hasta algunas más altas (120 ppm), lo que indica que la fase de experimentación nunca alcanzó la capacidad máxima de eliminación.

La máxima eficiencia de remoción se presentó en la sección 2, del biofiltro, (63,2%) , este comportamiento se atribuye a la presencia de metanol en la corriente de entrada el cual se cree fue eficientemente removido en la sección 1 del Biofiltro.

La biofiltración es altamente eficaz para el tratamiento del aire contaminado con formaldehído, y por otra parte presenta un alto nivel de flexibilidad frente a cambios repentinos en condiciones de funcionamiento, tales como flujo, tiempo de residencia, concentración de la entrada del contaminante, etc.

Gracias a que se logró la estabilización del biofiltro fácilmente, condición necesaria para la realización de ensayos con corrientes gaseosas, se considera el compost como una buena opción de sustrato, por las altas eficiencias alcanzadas y las características físicas que permiten la formación de la biopelícula. Además del medio se corroboró que la humedad es un factor vital y esta debe ser superior al 40%, preferiblemente valores superiores al 50%.

## 10. RECOMENDACIONES

Aunque no fue el objeto de estudio de esta investigación, es necesario cuantificar la concentración de metanol al biofiltro para determinar la selectividad de los microorganismos en cada sección del reactor biológico.

Con respecto a las determinaciones de humedad, temperatura, caracterizaciones químicas del medio de soporte se deben desarrollar métodos alternativos, por cuanto estos datos sin duda alguna contribuyen a explicar los fenómenos que ocurren dentro del biofiltro.

Aun cuando la literatura menciona al compost como uno de los medios de soporte más utilizados, existen un sinnúmero de medios que pueden ser utilizados, por cuanto sería significativo el desarrollo de investigaciones que analizaran los medios de soporte ideales para la remoción de Formaldehído.

Con respecto a la caracterización microbiológica del medio de soporte, se debe desarrollar un inventario de los microorganismos que degradan de forma eficiente el formaldehído. Esto es de vital importancia, para los casos en los que se requiera cultivar y sembrar microorganismos en otros medios de soporte – como resultado de futuras investigaciones que pretendan buscar la eficiencia de remoción con base en diferentes medios de soporte –.

Para el desarrollo de investigaciones con este tipo de compuestos es necesario contar con los espacios adecuados para la realización de experimentos que incluyan mayores concentraciones de Formaldehído – y en los cuales, por normas de seguridad, solo las personas que estén realizando la experimentación tengan acceso–, por lo que es importante desarrollar tales espacios, no solamente para la ubicación física del equipo de biofiltración, sino también para las determinaciones físicas y químicas que se deben realizar. Esto es de vital importancia, ya que concentraciones altas de formaldehído generan efectos nocivos para los seres humanos.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

ALTAMAR A., Tratamiento Biológico de compuestos orgánicos volátiles: dimensionamiento de un sistema de biofiltración de gases. En: Avances Investigación en Ingeniería. Vol. 6. Pág. 98 -105. 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Determining Formaldehyde Concentrations in Air and Emission Rates from Wood Products Using a Large Chamber. ASTM. 2002. 12.p. (E-1333-96)

BARRENA G, R.; VÁZQUEZ L., F.; Y SÁNCHEZ F., Ai. The use of respiration indices in the composting process: a review. En: Waste Management & Research. 2006

BENAVIDEZ O., A. Remoción de vapores de fenol en un filtro Biológico. Bogotá 2004. 68 p. Tesis de pregrado (Ingeniería química). Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería.

BOHN, H. Biofilter media. En: Proceedings of the 89<sup>th</sup> Annual Meeting & Exhibition of Air of Waste Management of Air & Waste Pollution Association. Pittsburg. Junio 23 -28 de 1996.

CADAVID R., L. Estudio Preliminar de la cinética de H<sub>2</sub>S en un biofiltro de Compost. Santiago de Cali, 2001. 143 p. Trabajo de Grado (MSc Ingeniería Sanitaria y Ambiental). Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Posgrado en Ingeniería Sanitaria y Ambiental.

CENTRO DE CIENCIAS ECOLÓGICAS - INDIA. Formaldehido. Fichas de seguridad sanitaria y ambiental. Fecha de acceso: Junio 24 de 2008. Pagina web:<http://www.ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/HDL/ENV/envsp/Vol328.htm>

DELHOMÉNIE, M.; BILBEAU, L.; BREDIN, N. Biofiltration of air contaminated with toluene in a compost – based bed. En: Advances in Environmental research. Vol. 6. Pág. 239 – 244. 2002.

DELHOMÉNIE, M. ; HEITZ, M. Biofiltration of Air: A review. En: Criticals Reviews in Biotechnology; Vol. 25. Pág. 53- 72. ISSN 0738-8551. 2005.

DEVINNY, J.; DEHUSSES, M.; WEBSTER, T. Biofiltration for Air Pollution Control. Editorial CRC Press. Boca Ratón 1999. ISBN 15-667-0289-5.

ERGAS, S. J. Tratamiento Biológico de Gases. Publicado En: Principios de Biorecuperación Capitulo 10. Editorial M McGraw Hill. España 1999. Pág. 259-284. ISBN 84-481-2511-8.

ERGAS, S. J. CÁRDENAS G., B. Biofiltration Past, Present, Future Directions. En: Biocycle. Vol.45. Pág. 35-39. 2004

ESPAÑA. REVISTA ESPAÑOLA DE PATOLOGÍA. Vol. 38. No. 1. Año 2005. Página web : <http://www.pgmacline.es/revpatologia/volumen38/vol38-num1/38-1n18.htm>

FERRADÁS G., E. Formaldehido: toxicología e impacto ambiental. Fundación Mapfre. Madrid, España. 1986. 258 Pags. ISBN: 8471001519.

KENNES, C.; VEIGA, M. Fungal biocatalysts in the biofiltration of VOC-polluted air. En: Journal of Biotechnology. Vol 113. Pág. 305–319. 2004.

KIRK, OTHMER. Enciclopedia de Tecnología Química. Editorial Limusa. México 1998. Pág.1386. ISBN 968-18-5576-0.

MORENO G., M. Toxicología Ambiental: Evaluación del Riesgo para la salud Humana. Editorial McGraw Hill. España, 2003. Pág. 254. ISBN 84-481-3781-7.

NATIONAL LIBRARY OF MEDICINE. Formaldehido. Ficha de seguridad ambiental. Fecha de acceso: Junio 24 de 2008. Pagina web: <http://toxtown.nlm.nih.gov/espanol/chemicals.php?id=47>

NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH. Formaldehyde by VIS. NIOSH. 1994. 5. p. (3500)



ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, Programa Internacional de Salud Química. Formaldehído. Criterios ambientales y sanitarios. Geneva, Suiza. 1989. 219 Págs. ISBN: 9241542896.

PICIOREANU, C.; VAN LOOSDRECHT, M.; HEIJNEN J.; Discrete differential modelling of biofilm structure. En: Water Science & Technology. Vol. 39. Págs. 115 – 122. 1999.

PRADO, O.; VEÍGA, M.; KENNES, C; Biofiltration of waste gases containing a mixture of formaldehyde and methanol. En: Applied Microbiology and Biotechnology. Vol. 65, Págs. 235 – 242. 2004.

YANG, Y.; ALLEN, E.R. Biofiltration Control of Hydrogen Sulfide: Design and Operational parameters. En: Journal of Air and Waste Management Association, Vol. 44, págs. 863 – 868.

UNIVERSIDAD DE VALENCIA. Formaldehído. Fecha de acceso: Junio 24 de 2008. Página Web: <http://www.uv.es/=vicalegr/PTindex/PTformol.html>

UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA. INSTITUTO DE Toxicología Ambiental. Centro de Sanidad Ambiental. Fecha de acceso: Junio 24 de 2008. Página web:<http://www.envtox.ucdavis.edu/CEHS/TOXINS/SPANISH2/Formaldehyde.htm>

# **ANEXOS**

