

**BIOFILTRACIÓN DE VAPORES DE ALCOHOL ISOAMÍLICO
PROCEDENTES DE UN PROCESO INDUSTRIAL DE FRAGANCIAS Y
SABORIZANTES**

**JEAN PAUL SILVA
JOAN MANUEL VILLAQUIRÁN REINA**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI**

2012

**BIOFILTRACIÓN DE VAPORES DE ALCOHOL ISOAMÍLICO
PROCEDENTES DE UN PROCESO INDUSTRIAL DE FRAGANCIAS Y
SABORIZANTES**

**JEAN PAUL SILVA
JOAN MANUEL VILLAQUIRÁN REINA**

**Trabajo de grado como requisito parcial para optar al título en
Ingeniería Química**

**Director:
JUAN PABLO SILVA VINASCO,
Ingeniero Químico M.Sc.**

**Asesor:
ALBERTO SERNA
Ingeniero Químico**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI**

2012

NOTA DE ACEPTACIÓN

Ing. Juan Pablo Silva, M.Sc
Director de Trabajo de Grado

Jurado

Jurado

Cali, Enero de 2012

A Dios por mi vida. A mi Mamá fuente de inspiración, y al igual que mi abuela, apoyo incondicional. A mis demás familiares por siempre confiar y creer en mí. A mis compañeros de batalla Calderón y Segovia. A mis amigos por su apoyo en especial en los duros momentos. A mi prima en el cielo que me guía. A la Universidad del Valle y sus profesores que me han formado como el profesional y la persona que soy. Al Dr. Rivas por ayudarme a salir del abismo. A la fuerza del amor que también tuvo su buena cuota de apoyo para alcanzar el objetivo. Este trabajo implico sacrificios y pérdidas, pero la ganancia de algo invaluable: “De la montaña de la desesperación, una piedra de esperanza”, a mi hermano Joan, gracias de corazón, Dios lo bendiga.

Jean Paul

A Dios y la virgen por sus grandes regalos en mi vida. A mis Padres y a mi hermano, quienes son mi fuente de inspiración y motivación, los cuales siempre me han brindado su apoyo incondicional. A mis tías y primos por su gran ayuda en esta etapa de mi vida. A mis amigos por estar presentes en las buenas y en malas. Y a la Universidad del Valle, porque me abrió sus puertas y permitió que me desarrollara como profesional. A todos mil y mil gracias por haber generado en mi la alegría que me caracteriza.

Joan Manuel

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis va dedicado a todas las personas que siempre creyeron en nosotros, pero sobretodo a aquellos que no lo hicieron. Durante la ejecución de este proyecto se contó con la ayuda de muchas personas, a los cuales les brindamos nuestros más sinceros agradecimientos.

A los ingenieros Juan Pablo Silva y Alberto Serna, por su colaboración en la dirección y orientación de este trabajo de grado.

A Danny Mercedes Acevedo, a su ayudante Viviana y a Gloria Lasso, por su gran disposición al ayudarnos con las pruebas en los laboratorios y el préstamo de materiales.

A la empresa La Tour por haber prestado sus instalaciones y por sus colaboraciones hacia este proyecto, en especial al personal del área de reacciones, con quienes compartimos los aromas de la planta; al personal de mantenimiento y del área de cocina, a los analistas de cromatografía, a los ingenieros y a la jefe de recurso humano por haber hecho más llevadero el horario de trabajo.

A los profesores por su aporte en nuestros conocimientos y a nuestros compañeros de la carrera, quienes nos brindaron su amistad y cariño.

A todas aquellas personas que también colaboraron para el desarrollo de este proyecto.

A todos mil y mil gracias.

CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	15
1. INTRODUCCIÓN	16
2. OBJETIVOS	18
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
3. MARCO TEÓRICO	19
3.1 ANTECEDENTES.....	19
3.2 MARCO CONCEPTUAL.....	21
3.2.1 COV's	21
3.2.2 Alcohol isoalcohólico	21
3.2.3 Métodos de control de olores	22
3.2.4 Biofiltración	25
3.2.5 Períodos de aclimatación y reaclimatación	29
3.2.6 Material de empaque	30
3.2.7 Biopelícula	33
3.2.8 Microbiología de la biofiltración	34
3.2.9 Parámetros de operación de los biofiltros	35
3.2.9.1 pH.....	35

3.2.9.2.Humedad	36
3.2.9.3 Temperatura	37
4. METODOLOGÍA	38
4.1 LOCALIZACIÓN DEL EXPERIMENTO	38
4.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO INDUSTRIAL GENERADOR DE ALCOHOL ISOAMÍLICO	38
4.3 CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL GAS CONTAMINANTE	40
4.4 DISEÑO DE LOS BIOFILTROS	41
4.5 ELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES DE EMPAQUE ..	42
4.6 DISEÑO DEL SISTEMA DE BIOFILTRACIÓN	44
4.6.1 Montaje del sistema de biofiltración	44
4.6.2 Instrumentos de medición	48
4.7 FASE EXPERIMENTAL	49
4.7.1 Mediciones en la fase experimental	50
4.7.2 Condiciones experimentales.....	51
4.8 EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	53
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	54
5.1 VARIACIÓN DE LAS VARIABLES DURANTE LA CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL GAS	55
5.2 VARIACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DURANTE LA FASE EXPERIMENTAL	56

5.2.1 Variación de la concentración en las corrientes de entrada y salida.....	56
5.2.2 Variación de la presión y temperatura de las corrientes de entrada y salida	59
5.2.3 Cambio en las propiedades fisicoquímicas de los lechos.....	60
5.2.4 Crecimiento de la población de microorganismos	62
5.4.5 Eficiencia.....	66
5.4.6 Capacidad de eliminación	69
6. CONCLUSIONES.....	72
ANEXOS	75
BIBLIOGRAFÍA.....	91

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Propiedades físicas y químicas del alcohol isoamílico	22
Tabla 2. Ventajas y desventajas de los métodos de control de COV's	24
Tabla 3. Parámetros de diseño de un biofiltro.....	28
Tabla 4. Propiedades de algunas clases de soportes	32
Tabla 5. Especificación de los nutrientes del compost usado	43
Tabla 6. Condiciones de operación de los biofiltros durante la fase experimental.....	51
Tabla 7. Condiciones de operación de los flujos durante la fase experimental	52
Tabla 8. Caracterización fisicoquímica inicial de los materiales de los biofiltros.....	60
Tabla 9. Caracterización fisicoquímica final de los materiales de los biofiltros	61
Tabla 10. Conteo microbiológico de los lechos al inicio del experimento	62
Tabla 11. Conteo microbiológico de los lechos al final del experimento.....	63
Tabla A-1. Datos recolectados durante la caracterización inicial del gas.....	77
Tabla B- 1. Distribución de diámetro de partícula del compost usado	78
Tabla D-1. Datos de temperatura, presión y caudal de las corrientes de la planta.....	80
Tabla D-2. Datos de concentración, eficiencia y capacidad de eliminación.....	82
Tabla D-3. Estadísticos de temperatura, presión y caudal de las corrientes de la planta.....	84
Tabla D-4. Estadísticos de concentración, eficiencia y capacidad de eliminación.....	84

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Esquema de un sistema de biofiltración	27
Figura 2. Representación gráfica de la CE.....	29
Figura 3. Fenómenos fisicoquímicos y microbiológicos en la biopelícula.....	33
Figura 4. Planta de destilación de la empresa	39
Figura 5. Dimensiones de los biofiltros	41
Figura 6. Diagrama de flujo de la planta de biofiltración diseñada	46
Figura 7. Concentración de los alcoholes en el gas durante la caracterización inicial	56
Figura 8. Variación de las concentraciones de entrada y salida en la fase experimental.....	57
Figura 9. Diagrama de cajas y alambres de la concentración	57
Figura 10. Variación de las concentraciones en las mañanas y tardes.....	59
Figura 11. Crecimiento de Pseudomonas durante la fase experimental.....	64
Figura 12. Crecimiento de bacterias heterotróficas durante la fase experimental	64
Figura 13. Variación de la eficiencia de remoción	66
Figura 14. Diagrama de cajas y alambres de la eficiencia de remoción	67
Figura 15. Capacidad de eliminación del biofiltro de compost inoculado.....	70
Figura 16. Capacidad de eliminación del biofiltro de compost	71
Figura 17. Diagrama de cajas y alambres de la capacidad de eliminación.....	71
Figura A-1. Variación de la temperatura.....	76

Figura A-2. Variación de la presión.....	76
Figura A-3. Variación del caudal.....	76
Figura C-1. Curva de secado de la sección inferior del biofiltro de compost.....	79
Figura C-2. Curva de secado de la sección superior del biofiltro de compost.....	79
Figura C-3. Curva de secado de la sección inferior del biofiltro de compost inoculado.....	79
Figura C-4. Curva de secado de la sección superior del biofiltro de compost inoculado.....	79
Figura E-1. Curva de calibración medidor de caudal 1.....	85
Figura E-2. Curva de calibración medidor de caudal 2.....	85
Figura E-3. Curva de calibración medidor de caudal 3.....	85
Figura E-4. Curva de calibración medidor de caudal 4.....	85
Figura G-1. Planta piloto para la biofiltración de vapores de alcohol isoamílico.....	88
Figura G-2. Bomba de vacío.....	88
Figura G-3. Compresor de aire.....	88
Figura G-4. Regulador de presión.....	89
Figura G-5. Bomba de aire de bajo caudal.....	89
Figura G-6. Lugar de muestreo a la salida de los lechos y sistema de riego.....	89
Figura G-7. Sistema de recolección de condensados.....	89
Figura G-8. Bocatoma de los gases producidos por la destilación.....	89
Figura G-9. Medidor húmedo de gases.....	89

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL GAS	76
ANEXO B. GRANULOMETRÍA DEL COMPOST USADO.....	78
ANEXO C. CURVAS DE PÉRDIDA DE HÚMEDAD	79
ANEXO D. RESULTADOS DE LA FASE EXPERIMENTAL.....	80
ANEXO E. CURVAS DE CALIBRACIÓN DE LOS MEDIDORES DE CAUDAL	85
ANEXO F. MANUAL DE OPERACIÓN DE LA PLANTA PILOTO	86
ANEXO G. REGISTRO FOTOGRÁFICO	88

GLOSARIO

AI: Alcohol isoamílico.

B1: Biofiltro empacado con compost – pellets de polipropileno - lodo activado.

B2: Biofiltro empacado con compost – pellets de polipropileno.

Ce: Concentración de entrada de contaminante.

CE: Capacidad de eliminación del biofiltro.

CM: Carga másica de contaminante.

Cs: Concentración de salida de contaminante.

CS: Carga superficial del contaminante.

Ef: Eficiencia de remoción de contaminante.

P: Presión del gas.

Q: Caudal del gas.

T: Temperatura del gas.

τ : Tiempo de residencia.

θ : Porosidad del lecho.

RESUMEN

En ésta investigación se comparó el comportamiento de dos tipos de biofiltros empleados en la remoción de vapores de alcohol isoamílico (AI). Uno de estos biofiltros (B1) se empacó con una mezcla de compost-pellets de polipropileno-lodo activado (50:40:10 % en volumen), mientras el otro (B2) se empacó con compost-pellets de polipropileno (60:40 % en volumen). Ambos equipos tuvieron 1,27 m de altura y 0,23 m de diámetro, y fueron divididos en dos secciones de 0,4 m de altura efectiva cada una.

Los biofiltros se estudiaron durante 10 semanas, con carga superficial constante de $30 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ y humedad de lecho entre 45 y 50 % en base húmeda. La concentración de AI en la corriente de entrada a cada lecho presentó fluctuaciones entre 0,007 a $0,956 \text{ g/m}^3$. La alimentación de AI a los biofiltros fue discontinua debido a que esta sustancia se tomó de corrientes gaseosas residuales de un proceso industrial tipo bacth, donde el horario de trabajo fue de 9 horas diarias y 5 días a la semana. En los periodos de discontinuidad (periodos de no uso) se alimentaron 3 L/min de aire sin AI.

La eficiencia de remoción para B1 estuvo entre 49,95 y 99,99 %, y para B2 se mantuvo entre 42,6 y 99,98 %. La mayor capacidad de eliminación registrada fue $27,98 \text{ g/m}^3\text{h}$ para B1 y $26,98 \text{ g/m}^3\text{h}$ para B2. Adicionalmente se encontró que en ambos lechos hubo un crecimiento de *Pseudomonas* de un orden de magnitud y menos de un orden de magnitud para bacterias heterotróficas, lo que sugiere que hubo actividad microbológica en los bioreactores. Estos resultados indican que en este experimento no hubo diferencias en la remoción de AI entre B1 y B2. Además los resultados también mostraron que las fluctuaciones en eficiencia de remoción tienen mayor posibilidad de ser originadas por variaciones de la concentración de entrada que por los periodos de no uso.

En general se puede afirmar que ambos biofiltros son aptos para tratar este tipo de gas en las mismas condiciones de operación del experimento, ya que ninguno emitió vapores que sobrepasaran la concentración máxima permitida de AI en aire, la cual es $0,36 \text{ g/m}^3$.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire urbano y el deterioro de la capa de ozono son dos de los principales impactos medio-ambientales en los que influyen negativamente los compuestos orgánicos volátiles (COV's). Lo anterior se debe a que estos compuestos reaccionan con óxidos de nitrógeno en presencia de la luz solar y forman el smog fotoquímico, el cual contribuye a alterar la calidad del aire de las ciudades y deteriorar la salud de las personas. Se ha comprobado que los COV's provocan irritaciones cutáneas, disminución de la capacidad respiratoria, problemas cardiacos, mutagénicos y cancerígenos (Caro et al., 2009).

Debido a esta problemática y a regulaciones ambientales existentes, se ha generado la necesidad del desarrollo de nuevas tecnologías y políticas ambientales que mitiguen las emisiones de los COV's. En este sentido se ha sugerido la implementación de tecnologías para el control de fuentes fijas basadas en procesos fisicoquímicos (adsorción, absorción e incineración) y tratamientos biológicos (biofiltración y biolavado).

Actualmente muchas investigaciones se orientan a considerar la biofiltración, porque la durabilidad y eficiencia de los equipos es más alta (debido a que posee autorregulación biológica), mientras los costos de operación y mantenimiento son más bajos en comparación con las otras operaciones unitarias ya nombradas, que además disminuyen la calidad del producto (Nadal, 2008).

La biofiltración es un proceso de degradación biológica de un contaminante de una corriente gaseosa a través de un lecho poroso donde habitan microorganismos (bacterias, hongos, protozoos), los cuales producen CO_2 y H_2O , sustancias de menor impacto ambiental. El diseño y la determinación de las condiciones de operación de esta técnica se

realizan de manera empírica, lo que complica el entendimiento y control del componente biológico, aun más cuando la operación es intermitente (Altamar, 2007).

Puesto que en Colombia los conocimientos en el tema de biofiltración son escasos, con el presente trabajo de grado se pretende contribuir con conocimientos sobre la biofiltración como técnica de remoción de vapores de alcohol isoamílico (pertenecientes a la clasificación de COV's) y la viabilidad técnica para su uso posterior a escala industrial. Para lograr esto se usaron corrientes gaseosas residuales provenientes de una industria de fragancias y sabores, con las cuales se evaluó la eficiencia de remoción de estos vapores mediante biofiltración con compost y de manera intermitente.

A continuación se describen los detalles de la planta piloto que se construyó para biofiltrar dichas corrientes, las pruebas realizadas y los resultados observados durante 3 meses de operación. Como conclusiones se especifican los efectos de los cambios de concentración de la corriente de entrada y los periodos de no uso sobre 2 tipos de biofiltros: compost y compost inoculado con lodo activado.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la capacidad de biofiltración con compost para vapores de alcohol isoamílico asociados a un proceso industrial discontinuo de rectificación de aceite de fúsel en la fabricación de fragancias y sabores.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar el montaje a escala piloto de un biofiltro adaptado al proceso de generación de vapores de alcohol isoamílico de la industria de fragancias y sabores.
- Evaluar el efecto de inocular el compost (medio filtrante) con un lodo proveniente de un sistema de lodos activados en la biofiltración de vapores de alcohol isoamílico.
- Estudiar la influencia de la operación discontinua en la biofiltración de vapores de alcohol isoamílico.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 ANTECEDENTES

La primera aplicación de la biofiltración fue en 1953 en Long beach (California), con el objetivo de tratar olores desagradables de la estación de aguas residuales. En Europa el uso de los biofiltros surgió en 1959 en Nuremberg (Alemania) con el mismo objetivo (Cárdenas et al., 2003). Esta técnica se realizaba en fosos abiertos, que se cubrían con un suelo poroso y se dotaban de canales de distribución de gases, a través de los cuales transitaba aire contaminado. El funcionamiento fue satisfactorio, pero los canales sufrían de taponamiento cuando el suelo se compactaba y deterioraba (por culpa de los ácidos a tratar), lo que disminuía la eficiencia (INE, 2007).

Shareefdeen & Slingh (2005) afirman que mediante experimentos de laboratorio de remoción de vapores de ácido sulfhídrico (H_2S) generados en un alcantarillado, Carlson & Leisler (1966) determinaron que la eliminación del ácido era producto de la oxidación realizada por microorganismos presentes en el suelo y no por la capacidad de adsorción del material.

Luego en los años 70's, los alemanes y los holandeses se convirtieron en los pioneros del tratamiento biológico de aguas residuales e introdujeron en los biofiltros materiales de soporte estructural (trozos de madera y bolas de poliestireno) para mejorar la distribución de flujo y evitar compactación. Esto condujo al diseño de nuevos biofiltros para tratar mayores concentraciones y caudales de contaminantes, con el objetivo de cumplir con la normatividad de calidad que en dichos años estaba en auge (Cárdenas et al., 2010).

En los años 80's esta tecnología progresó rápidamente en Europa y Norteamérica por su bajo costo, lo que condujo a que aparecieran nuevos diseños de sistemas cerrados que

empleaban medios filtrantes inorgánicos como carbón activado, materiales cerámicos y poliestireno. Este hecho produjo que la biofiltración se empezara a investigar de manera científica (Cárdenas et al., 2010).

Ottengraf & Van Den Oevar (1983) determinaron que la eficiencia está ligada a la difusión del contaminante de la fase gaseosa a la fase líquida, lo que llevó a la técnica de humidificación del lecho poroso, que produjo biofiltros más pequeños y de mayor capacidad (Shareefdeen & Slingh, 2005). Esto junto con las investigaciones de Eitener & Gethke (1984) y Deshusses (1994) permiten optimizar y comprender la dinámica de biofiltración (Shareefdeen & Slingh, 2005).

A partir de los años 90's, Estados Unidos ha publicado un gran número de investigaciones, que involucran la generación de equipos de alto desempeño en remoción de compuestos de baja biodegradabilidad, los cuales utilizan microorganismos seleccionados y adaptados (Cárdenas et al., 2010).

Desde 1997 la Universidad del Valle por medio del grupo de investigación "Biotecnología para el control de la contaminación atmosférica" en convenio con otras entidades, han adelantado trabajos en investigación de diferentes contaminantes y medios filtrantes, para así obtener técnicas que minimicen el impacto producido por los COV's de diferentes procesos industriales.

Uno de esos trabajos fue una investigación realizada por Achipiz & López (2006), donde se experimentó con vapores de alcohol isoamílico y periodos de no uso en un biofiltro tipo compost con carga superficial constante e igual a $30 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$. Estos autores recomiendan trabajar con una concentración de $2,52 \text{ g}/\text{m}^3$, puesto que con esta concentración de entrada se obtiene eficiencias superiores al 80 % y no se excede el límite de concentración máxima permitida del alcohol isoamilico. Al evaluar periodos de no uso de 4 y 8 días, estos investigadores encontraron que la eficiencia de remoción tardaba más de 6 días en alcanzar un valor estable.

3.2 MARCO CONCEPTUAL

3.2.1 COV's

La atmósfera se compone principalmente de N₂, O₂, y varios gases nobles, cuyas concentraciones han permanecido prácticamente estables a lo largo del tiempo. Sin embargo, un cierto número de gases está también presente en cantidades pequeñas y muy variables. El vapor de agua, el dióxido de carbono, el ozono y los contaminantes del aire urbano pertenecen a esta categoría.

Dentro de estos contaminantes se encuentran los compuestos orgánicos volátiles (COV's), que son todas las sustancias orgánicas de bajo peso molecular, de naturaleza antropogénica, volatilidad alta a condiciones ambiente y con presión de vapor superior a 0,14 mmHg a 25 °C (Altamar, 2007). Estos son nocivas para la salud, puesto que producen irritaciones cutáneas, problemas cardiacos, factores mutagénicos, náuseas, disminución de la productividad y capacidad olfativa del hombre (Caro et al., 2009). Además los COV's son precursores de oxidantes fotoquímicos que destruyen la capa de ozono y contribuyen con el efecto invernadero (INE, 2007).

Ejemplos típicos de estos compuestos son las cetonas, alcoholes, esterés, etc., cuyas fuentes principales de emisión son los transportes, la producción industrial, la incineración de residuos y el consumo de combustible (Altamar, 2007).

3.2.2 Alcohol isoalmílico

El alcohol isoamílico está clasificado como un compuesto orgánico volátil, por su bajo peso molecular y alta volatilidad a condiciones ambiente. Este es nocivo para la salud, ya que es un narcótico 4 veces más tóxico que el etano, produce irritaciones cutáneas, problemas cardíacos y factores mutagénicos (Cía. Química, 2005).

También es llamado alcohol isopentílico, isobutilcarbinol ó 3-metilbutanol (C₅H₁₂O). Las propiedades físicas y químicas más importantes para la investigación se pueden observar en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas del alcohol isoamílico (Cía. Química, 2005)

Propiedad	Valor
Peso Molecular (g/mol)	88,15
Color	Incolor
Olor	Desagradable
Presión de vapor (mmHg a 25 °C)	2,37
Punto de ebullición (°C)	132
Punto de fusión (°C)	-117,2
Temperatura de ignición (°C)	135
Límite de exposición permitido (ppm)	125
Solubilidad en agua (mg/L a 25 °C)	2.67 x 10 ⁴
Log P (octanol-agua)	1.16
Densidad de vapor relativa	3
Gravedad específica (a 15 °C)	0.813

Las fuentes principales de la emisión de este alcohol son los procesos involucrados con fragancias, aromatizantes, adhesivos, aerosoles, gas licuado de la gasolina y plásticos, puesto que es usado como componente de perfumes y solvente para tintas de impresión, lacas, adhesivos (Cía. Química, 2005).

3.2.3 Métodos de control de COV's

En la actualidad existen gran cantidad de alternativas para la reducción de los COV's, las cuales se dividen en preventiva y correctiva. La preventiva se encarga de eliminar el contaminante desde la fuente y se enfoca en el cambio de las materias primas, lo que puede dañar la calidad del producto a comercializar; mientras que la correctiva se encarga de tratar el gas efluente. Por ende las segundas son más estudiadas que las primeras (Cárdenas et al., 2003).

Los métodos correctivos para el control de olores pueden clasificarse en fisicoquímicos y biológicos. Al primer grupo pertenecen la absorción, la adsorción, y la incineración, mientras que en el segundo grupo se encuentra la biofiltración y el biolavado (Shareefdeen & Slingh, 2005). En la Tabla 2 se muestran las principales ventajas y desventajas de estos métodos.

Los métodos fisicoquímicos han sido las técnicas tradicionales en la purificación de gases contaminados y fueron desarrollados para tratar corrientes con altas concentraciones de gases residuales. Estas tecnologías se basan en principios fisicoquímicos establecidos para lograr el control efectivo de dichos gases. En muchos casos estas técnicas generan subproductos que requieren tratamiento adicional antes de ser eliminados. Aunque estos métodos tradicionales son más costosos y consumen demasiada energía, son los más usados (Pirol, 2009).

Sin embargo, los métodos biológicos han ganado importancia en este campo en los últimos años, debido a su bajo costo de desempeño, porque no produce contaminantes peligrosos, y por las altas eficiencias de remoción para caudales con baja concentración de contaminante (Nadal, 2008).

Aunque el nacimiento de éstos métodos biológicos fue hace casi 60 años, solo en las últimas dos décadas se ha visto como una tecnología competitiva frente a los tratamientos físico-químicos y ha llegado a ser un componente clave en el control de emisiones de olor en las instalaciones de compostaje, plantas de tratamiento de aguas residuales, industria alimenticia, producción animal y otras fuentes de COV's y olores (INE, 2007).

Las técnicas biológicas de tratamiento de corrientes gaseosas residuales utilizan microorganismos, principalmente bacterias para oxidar aeróbicamente los contaminantes. Los costos de mantenimiento son bajos pero se debe tener control en la temperatura, el pH y la humedad, ya que las condiciones deben favorecer el crecimiento de aquellos microorganismos. Los productos finales de los COV's son principalmente CO₂ y H₂O

(Cárdenas et al., 2003). Además estos métodos biológicos permiten trabajar a temperaturas relativamente bajas (15 a 30 °C) y presión atmosférica, lo que se traduce en un menor consumo de energía para el funcionamiento del sistema (Altamar, 2007).

Tabla 2. Ventajas y desventajas de los métodos de control de COV's (INE, 2007)

Clase de método	Método	Ventajas	Desventajas
Fisicoquímico	Adsorción	<ul style="list-style-type: none"> • Corto tiempo de residencia • Equipos pequeños • Efectiva remoción de compuestos • Adaptable a cargas bajas y moderadas • Operación confiable 	<ul style="list-style-type: none"> • Altos costos de operación • Costos de capital moderados • Flujos contaminados secundarios • Vida del material de empaque reducida por la humedad
	Absorción	<ul style="list-style-type: none"> • Corto tiempo de residencia • Efectiva remoción de compuestos • Operación confiable 	<ul style="list-style-type: none"> • Altos costos de operación y de capital • Flujos contaminados secundarios • Poco efectiva para concentraciones bajas
	Incineración	<ul style="list-style-type: none"> • Corto tiempo de residencia • Efectiva remoción de compuestos • Operación confiable 	<ul style="list-style-type: none"> • Altos costos de operación y de capital • Flujos contaminados secundarios • Poco efectiva para concentraciones bajas
Biológico	Biolavado	<ul style="list-style-type: none"> • Baja caída de presión • Trata los contaminantes ácidos producidos • Puede manejar altas cargas de flujo • Habilidad para manejar cargas variables 	<ul style="list-style-type: none"> • Moderados costos de operación y de capital • Problemas de obstrucción por biomasa • Construcción y operación compleja • Flujos contaminados secundarios
	Biofiltración	<ul style="list-style-type: none"> • Bajos costos de operación y capital • Baja caída de presión • Remoción efectiva de compuestos 	<ul style="list-style-type: none"> • Grandes requerimientos de espacio • No recomendado para altas concentraciones • Humedad y pH difícil de controlar

La eficiencia de remoción de los métodos biológicos es cercana al 90 % para alcoholes, aldehídos, amoníaco, éteres y sulfuros y mayores al 90 para butadieno, formaldehído, entre otros (Aguayo, 2005).

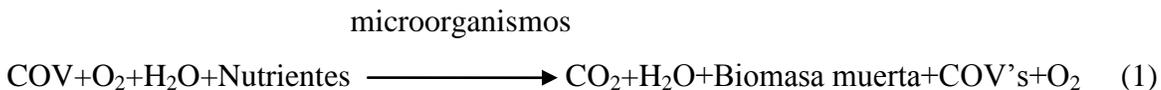
En comparación con el biolavado, la biofiltración es más versátil (porque permite remover mayor número de compuestos) y menos costosa (ya que no tiene fases móviles). A pesar de su aparente simplicidad, la tecnología es compleja y solo se ha descrito una parte de los fenómenos físicos, químicos y biológicos, puesto que el comportamiento biológico es poco conocido y por ende es difícil de modelar (Nadal, 2008).

3.2.4 Biofiltración

La biofiltración es una técnica empleada para la remoción de contaminantes presentes en corrientes gaseosas, los cuales son tomados por los microorganismos anaerobios (bacterias, hongos y protozoos) presentes en un lecho poroso. Luego estos contaminantes se oxidan y se convierten a compuestos de menor peso molecular y de aparente menor complejidad, como el CO_2 , H_2O , sales, NO_3^{-3} , SO_4^{-2} (según la composición de dichos contaminantes). Lo anterior cataloga a esta técnica como una tecnología más limpia, ya que los compuestos que salen son menos nocivos que los que entran (Shareefdeen & Slingh, 2005).

Por ende, los biofiltros son reactores en los cuales un flujo de aire contaminado se impulsa a través de un soporte inmovilizado. Al entrar en contacto con este soporte, los compuestos solubles en agua presentes en la fase gaseosa son absorbidos por una capa húmeda llamada biopelícula, que se encuentra adherida a este soporte. Dentro de la biopelícula, los contaminantes entran en contacto con los microorganismos y se biodegradan (Pirol, 2009).

Mediante la degradación de contaminantes, el ecosistema microbiológico obtiene la energía necesaria para su crecimiento y reproducción; y se produce un menor impacto ambiental (Cárdenas et al., 2003). Lo anterior se explica en la expresión:



Un factor importante es que la biofiltración es un proceso de oxidación biológica que se aplica para la eliminación de contaminantes oxidables, compuestos orgánicos parcialmente oxidados o compuestos minerales reducidos, lo que no resulta una solución de tratamiento para el CO₂ y óxidos del nitrógeno y el azufre (Jimenez & Villegas, 2005).

Las reacciones de biodegradación se clasifican como reacciones catalíticas, ya que suceden bajo la presencia de enzimas específicas, que actúan como precursoras de compuestos que influyen en la velocidad de reacción. Esta oxidación puede ser parcial o total (Pineda & Thalasso, 2002). Los compuestos que se degradan rápidamente son los de bajo peso molecular, alta solubilidad en agua y con grupos funcionales que contienen oxígeno, nitrógeno, o azufre.

Algunos estudios muestran que los alcoholes, ésteres, aldehídos, cetonas, aromáticos y aminas a concentraciones bajas presentan buen grado de remoción. Se consideran los alcoholes como los mejores candidatos a la biofiltración gracias a su alta solubilidad en agua (Cárdenas et al., 2003).

Debido a que grandes cantidades de contaminante (sustrato) pueden inhibir el crecimiento de la población de microorganismos, el campo de aplicación de la biofiltración está enfocado a la eliminación al tratamiento de efluentes que contienen bajas concentraciones de compuestos oxidables y de estructura molecular sencilla. Por lo tanto su mayor aplicación son los procesos para el control de polución, remoción de COV's y control de

olores provenientes del tratamiento de aguas residuales y plantas procesadoras de residuos sólidos (Pineda & Thalasso, 2002).

Otra de las ventajas que distinguen a los biofiltros son la facilidad en su puesta en marcha y la resistencia a los períodos sin alimentación de contaminante, debido a que el soporte inmovilizado contiene nutrientes necesarios para poder mantener la actividad biológica de los microorganismos (Jimenez & Villegas, 2005).

Como se nota en la Figura 1, un sistema de biofiltración consta generalmente de (Pineda & Thalasso, 2002):

- Un lecho biofiltrante.
- Un compresor-ventilador de gases.
- Un conducto de transporte de gases para la entrada y salida del lecho poroso.
- Un humidificador de gases externo al lecho (para saturar de agua el aire y evitar secar el lecho).
- Un sistema de drenado de agua.

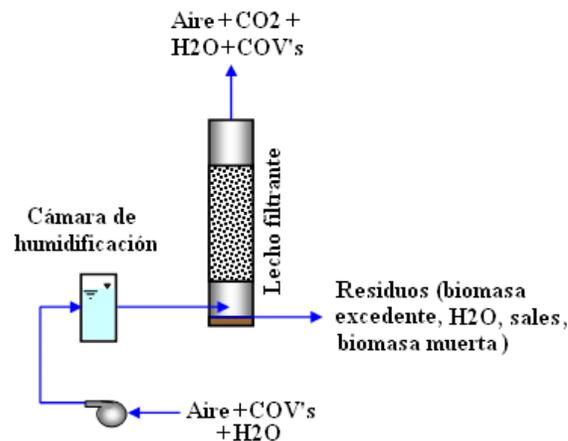


Figura 1. Esquema de un sistema de biofiltración (Achipiz & López, 2006)

El diseño de un biofiltro se determina por medio de los parámetros de la Tabla 3, donde V, Q, Ce y Cs son el volumen del biofiltro, el flujo de gas, la concentración de entrada y la concentración de salida, respectivamente.

Tabla 3. Parámetros de diseño de un biofiltro (Altamar 2007)

Parámetro	Descripción	Fórmula	Unidad	Rango típico
Tiempo lecho vacío (τ)	Medida del tiempo de residencia del gas en el biofiltro	V/Q	Segundos	15-60
Carga superficial (CS)	Carga volumétrica de gas	Q / A	$m^3/m^2/h$	50-200
Carga másica (CM)	Carga másica por unidad de volumen de lecho	QC / V	$g/m^3/h$	10-160
Capacidad de eliminación (CE)	Remoción másica por unidad de volumen de lecho	$Q(Ce-Cs) / V$	g/m^3h	10-160
Eficiencia de remoción (Ef)	Medida de rendimiento	$(Ce-Cs)/Ce \times 100\%$	%	95-99

De la tabla anterior, las variables más importantes para medir el desempeño de un biofiltro son:

- Eficiencia de remoción: fracción de contaminante removido que se expresa en porcentaje. Este es un parámetro incompleto de desempeño porque varía con la concentración del contaminante, el flujo de gas y tamaño del biofiltro, es decir, solo se refleja bajo las condiciones específicas a las cuales opera (Altamar, 2007).
- Capacidad de eliminación: parámetro que determina la cantidad de contaminante que puede remover un biofiltro y que permite la comparación directa de los resultados de dos sistemas de biofiltración distintos, ya que tanto el flujo como el volumen se encuentran normalizados. Solo puede ser igual o menor que la carga másica del contaminante. Bajo condiciones de baja carga la eficiencia es 100 % y la CE es igual a la carga. Al incrementar la carga existe un punto donde la eficiencia de remoción deja de ser 100%, este punto se denomina carga crítica o capacidad de eliminación crítica. Cuando la carga de contaminante se sigue incrementando se alcanza un punto donde la

capacidad de eliminación es independiente de la carga másica, a este se le llama CE máxima y es la máxima carga de contaminante que el lecho puede sostener sin inhibición de la actividad microbiológica (Altamar, 2007). Este hecho se puede observar en la Figura 2.

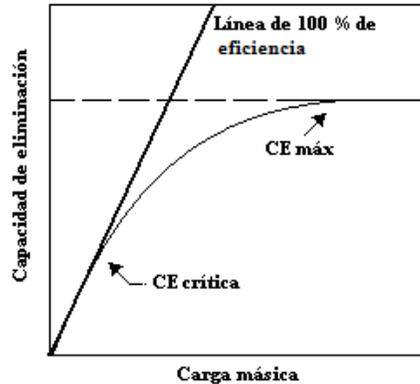


Figura 2. Representación gráfica de la CE

3.2.5. Períodos de aclimatación y reaclimatación

Durante el arranque de los biofiltros se produce una inestabilidad en la concentración de salida, esto se debe a que la biomasa se encuentra en el periodo de adaptación a la degradación de contaminante. A este periodo se le llama aclimatación, la cual se mide como el tiempo que se demora el biofiltro para alcanzar el 95 % de capacidad de remoción máxima (Aguayo, 2005). Cuando hay periodos de no uso ó cambios en las variables de operación se denomina reaclimatación. Generalmente la aclimatación toma cerca de 10 días para COV's de estructura simple (Jimenez & Villegas, 2005).

Leson & Smith (1987) determinaron que la alimentación de mezclas toma largos periodos de aclimatación, debido a la competencia entre especies (Aguayo, 2005). El periodo de aclimatación consta de dos fases. La primera es la aclimatación celular, donde la población microbiana se adapta al sustrato, realiza la síntesis de las enzimas necesarias para asimilarlo y las células crecen de tamaño sin dividirse. Mientras que la segunda es la aclimatación del ecosistema, donde ocurre la reproducción celular y la recolonización de

todo el volumen del lecho. Algunas investigaciones sugieren que la etapa inicial de aclimatación es más rápida que la siguiente, porque los microorganismos consumen el contaminante más rápido mientras crecen y luego lo consumen solo para mantenerse con vida (Cárdenas et al., 2003).

Algunas condiciones a tener en cuenta son (Aguayo, 2005):

- El periodo de reaclimatación es corto para periodos de no uso cortos, porque los microorganismos alcanzan a mantener su actividad metabólica.
- Para tener reaclimatación más corta, el lecho poroso debe estar húmedo y tener condiciones apropiadas de temperatura, nutrientes y flujo de aire para estos organismos durante los periodos de no uso.
- La reaclimatación dura menos que la aclimatación en el arranque. Luego de que el sistema se estabilice no hay diferencia entre operación continua y discontinua.

3.2.6 Material de empaque

El lecho poroso es el material filtrante donde los microorganismos habitan, motivo por el cual sus características son fundamentales para que estos crezcan y cumplan con sus funciones metabólicas, y así puedan degradar los contaminantes a tratar. Este lecho generalmente posee una duración de 4 años (Aguayo, 2005).

En los biofiltros los microorganismos se encuentran en una capa húmeda activa biológicamente ó biopelícula, la cual rodea las partículas porosas del lecho. Allí es donde los contaminantes se difunden y son biodegradados por la actividad de bacterias aeróbicas (Grant & Long, 2008). Por lo tanto el lecho o empaque tiene como objetivo soportar la biopelícula y servir como reservorio de agua, de contaminantes y nutrientes.

Muchas industrias usan sus propios residuos sólidos de plantas de tratamiento como medios para biofiltros, ya que tienen un alto contenido de microorganismos acostumbrados a los contaminantes que ellas producen (Jiménez & Villegas, 2005)

Las principales características que debe cumplir un lecho son (Shareefdeen & Slingh, 2005):

- Alta cantidad de nutrientes inorgánicos (N, K, P, S), que son necesarios para el crecimiento celular de estos organismos (0,4 a 0, 15 %).
- Contenido de nutrientes orgánicos de 35 a 55 %, los cuales sirven de fuente de alimento en los periodos de no uso. Esto para emisiones discontinuas de contaminantes.
- Humedad del 40 a 80 %. Esto con el fin de originar alta difusión de la fase gaseosa a la líquida y para que los microorganismos se alimenten y tengan adherencia de ellos al medio.
- Porosidad de 40 a 80% para garantizar flujo homogéneo del gas y baja caída de presión. Esto impide la creación de zonas de acumulación exagerada de agua, lo que previene la formación de zonas anaerobias que afecten el comportamiento del biofiltro.
- pH de 6 a 8, con la finalidad de mantener un ambiente adecuado para los microorganismos.
- Área superficial grande que permita mayor cantidad de adsorción de gas contaminado.

En la Tabla 4 se presenta un cuadro comparativo de las principales propiedades de algunos medios filtrantes. El uso común de compost en biofiltración radica en las características descritas en esta tabla, y su bajo costo se debe a que es un material obtenido de forma natural por transformación de residuos orgánicos de verduras y frutas, lodos de aguas residuales ó abonos (Sakuma & Deshusses, 2006).

Tabla 4. Propiedades de algunas clases de soportes. (Aguayo, 2005)

Parámetro	Compost	Turba	Suelo	Carbón activado	Materiales sintéticos
Densidad Poblacional	Alta	Baja - Media	Alta	Ninguna	Ninguna
Área superficial	Media	Alta	Baja -Media	Alta	Alta
Permeabilidad al gas	Media	Alta	Baja	Media - Alta	Muy Alta
Humedad	Alta	Media - Baja	Alta	Alta	Ninguna
Contenido de nutrientes	Alta	Media - Alta	Alta	Ninguna	Ninguna
Potencial de porción	Media	Media	Media	Baja - Alta	Variable
Tiempo de vida	2- 4 años	2 – 4 años	> 30 años	> 5 años	> 15 años
Costos	Bajo	Bajo	Muy bajo	Medio - Alto	Muy alto
Aplicabilidad general	Alta por su gran efectividad	Media por la dificultad en el control de agua	Alta en biofiltros de baja actividad	Baja porque necesita nutrientes y es costoso	Únicamente en prototipos

Un medio que es pesado y tiene mucha profundidad puede compactar el fondo, lo que afecta el tiempo de residencia del gas y por ende la eficiencia del biofiltro. Como el compost se compacta fácilmente se usan alturas de 1 a 1,5 m (Aguayo, 2005). Para evitar la compactación se acostumbra combinar al compost con otros materiales como medio de soporte, los cuales generalmente son materiales sintéticos porque resisten más a la compactación que los de tipo orgánico (Jiménez & Villegas, 2005). La adición de materiales inertes livianos, como esferas de poliestireno, ayudan a una mejor estructura del lecho, ya que el poliestireno no adsorbe agua, soporta parte del material filtrante y previene la compresión del material orgánico (Aguayo, 2005).

El reemplazo del empaque es necesario cuando la remoción está por debajo del límite aceptable o cuando la caída de presión es muy alta y no se pueden restaurar las condiciones óptimas de operación.

3.2.7 Biopelícula

La biopelícula es una delgada capa líquida de agua con presencia de biomasa, y es donde ocurre la difusión de contaminantes, oxígeno y posibles subproductos, además de la reacción de biodegradación. Esta puede tener un espesor de 1 a 5 mm (Deshusses & Sakuma, 2006).

La remoción de los contaminantes en un biofiltro implica fenómenos complejos del transporte de contaminante del gas hacia la biopelícula y la biodegradación que realizan los microorganismos. Los mecanismos de biodegradación que ocurren en un biofiltro son muy complejos y solo se han descrito mediante modelos empíricos. Estos mecanismos incluyen fenómenos físicos (transferencia de masa) y biológicos. El proceso de biodegradación involucra 4 pasos fundamentales (Grant & Long, 20005):

- Transferencia de contaminante y oxígeno de la fase gaseosa a la biopelícula
- Difusión del contaminante y oxígeno a través de la biopelícula
- Biodegradación del contaminante en la biopelícula
- Transferencia de los productos oxidados de la fase líquida a la gaseosa

La Figura 3 representa los fenómenos presentes en la biopelícula.

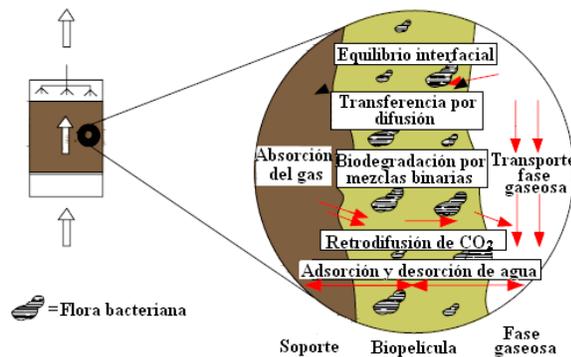


Figura 3. Fenómenos fisicoquímicos y microbiológicos en la biopelícula (Modificado de Etcharren, 2007)

3.2.8 Microbiología de la biofiltración

Los microorganismos presentes en los biofiltros son las bacterias y hongos que degradan los compuestos en la naturaleza, en los sistemas de tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados y en los rellenos sanitarios (Grant & Long, 2008).

Yves & Dument (2009) afirman que en un biofiltro existen condiciones aerobias y oscuras que favorecen el crecimiento de bacterias, hongos y protozoos, donde las bacterias son predominantes en la biodegradación de contaminantes. Los protozoos son depredadores de bacterias y hongos, lo que contribuye con la regulación de biomasa.

Kennes & Veiga (2004) señalan que en un biofiltro con condiciones ácidas y de baja humedad, los hongos pueden predominar sobre las bacterias. Cuando el material filtrante es del tipo orgánico, los hongos tienden a descomponer las macromoléculas o los polímeros como la lignina o la celulosa, lo que afecta la estructura del lecho.

Lodos, residuos de jardín y compost de residuos sólidos tienen mayor diversidad y población microbiana que los suelos, lo que los hace ventajosos como medios de soporte, ya que se mejora la remoción de contaminantes. La mezcla de pequeñas cantidades de lodo con compost, favorece el incremento inicial de la población bacteriana, lo que produce un periodo de aclimatación menor. Sin embargo los lechos de compost poseen una población de microorganismos considerable que se adaptan al sustrato que se desea remover, siempre que este sea biodegradable (Elias et al. 2010).

En el caso de soportes inertes hay la necesidad de inocular microorganismos especializados asociados con el contaminante a eliminar, con el propósito de mejorar las velocidades de biodegradación y acortar el tiempo aclimatación (Elias et al. 2010). A pesar de que se han desarrollado cepas microbianas en el laboratorio, al emplearse en los biofiltros se presentan dificultades, como lo es la competencia en el proceso de adaptación contra las especies nativas que puede presentar el lecho (Deshusses & Sakuma, 2006).

En el caso de corrientes gaseosas con mezcla de contaminantes, las interacciones microbiológicas son más complejas, lo que lleva a fenómenos de cometabolismo, donde la presencia de un compuesto aumenta la degradación de otro; ó inhibición cruzada donde un contaminante inhibe el comportamiento de los microorganismos que degradan otro compuesto de la mezcla (Grant & Long, 2008). Smeet (1996) demostró que en la biofiltración de una mezcla de isobutiraldehído y dimetil sulfuro, la biodegradación del último se iniciaba cuando el isobutiraldehído era totalmente degradado (Aguayo, 2005). Generalmente se requiere realizar pruebas a escala piloto para dimensionar correctamente un biofiltro para una corriente que contenga varios componentes.

De igual manera la distribución y clase de microorganismos en el caso de mezclas no es homogénea respecto a la altura del biofiltro. Los microorganismos que utilizan como sustrato los componentes con mayor biodegradabilidad predominan en las primeras capas del material de soporte, mientras que en las capas siguientes estarán los responsables de los compuestos de biodegradación lenta (Grant & Long, 2008).

Dentro de las bacterias del compost se encuentra el género *Pseudomonas*, grupo de bacilos gran negativos aeróbicos, catalogados como los más versátiles, ya que pueden utilizar más de 100 compuestos orgánicos como fuente principal de carbono y energía, diferentes a la glucosa (Altamar, 2007). Entre estos compuestos se encuentran alcoholes, cetonas, acetatos, etc. (Pineda & Thalasso, 2002).

3.2.9 Parámetros de operación de los biofiltros

3.2.9.1 pH

El pH en un biofiltro puede cambiar durante la operación por los tipos de contaminantes y cepas microbianas asociadas. El medio puede bajar su pH debido a que algunas de las biotransformaciones generan productos ácidos, como es el caso de la biofiltración de ácido sulfúrico (Cárdenas et al., 2003). Las especies de estas cepas microbianas son susceptibles

a cambiar su comportamiento al presentarse variaciones en el pH, puesto que les causa inhibición o muerte. Por lo general lo recomendable es que el pH de un lecho esté entre 6 y 8, ya que un medio ácido puede inhibir la actividad microbiológica. En ambientes con pH neutro las bacterias tienen la ventaja de tomar el sustrato y crecer más rápido que los hongos (Grant & Long, 2008).

Los efectos del cambio de esta variable se pueden minimizar al emplear un medio con una alta capacidad buffer, que se define como la capacidad del medio para soportar los cambios de pH. En el caso del compost esto sucede porque el material contiene minerales que reaccionan con los ácidos para producir sales (Pineda & Thalasso, 2002).

3.2.9.2. Humedad

El contenido de agua en el lecho es el parámetro de operación más crítico que debe controlarse durante la biofiltración. Una cantidad insuficiente de humedad limita la formación de la biopelícula, la difusión de contaminante y la actividad microbiológica. Por otra parte una humedad excesiva reduce la transferencia de masa de sustancias hidrófobas, reduce la porosidad, aumenta la caída de presión y puede causar daños estructurales en el lecho (Jiménez & Villegas, 2005).

El gas contaminado debe estar saturado de agua o con un porcentaje mayor al 98% antes de ingresar al biofiltro, con la finalidad de evitar que el biofiltro desorba agua por arrastre de del gas. Esto garantiza una adecuada formación de la biopelícula (Altamar, 2007).

Para mantener la humedad estable se debe rociar agua cada cierto periodo de tiempo, puesto que la adición excesiva puede lavar biomasa y nutrientes del medio, lo que origina que lleguen a la entrada y causen una obstrucción prematura del medio (Jiménez & Villegas, 2005).

3.2.9.3 Temperatura

La temperatura de un biofiltro es función de la temperatura del gas de entrada, las pérdidas de calor por condiciones medioambientales externas, evaporación del agua del biofiltro y generación de calor por las reacciones exotérmicas del proceso de oxidación microbológica (Shareefdeen & Slingh, 2005). La mayoría de los lechos empleados tienen conductividades térmicas bajas, por lo tanto los reactores a gran escala pueden considerarse adiabáticos. Los incrementos debido a la actividad microbológica van de los 2 a los 4 °C (Shareefdeen & Slingh, 2005).

Durante la biofiltración, los principales microorganismos activos son las bacterias mesofílicas, que crecen en ambientes en el rango de 5 y 50°C y óptimamente a 37 °C (Grant & Long, 2008). Los hongos generalmente se adaptan mejor a condiciones extremas de temperatura. Una temperatura alta (cerca de 50 °C) favorece la actividad microbológica, pero al mismo tiempo afecta el funcionamiento fisicoquímico del biofiltro, puesto que la solubilidad de los gases en agua disminuye al aumentar la temperatura. Se cree que el efecto biológico es más importante que el efecto físico, entonces se puede decir que los biofiltros trabajan mejor a mayores temperaturas, sin embargo los efectos físicos no deben ser descartados (Cárdenas et al., 2003).

4. METODOLOGÍA

En esta investigación se realizó un estudio del comportamiento de dos tipos de biofiltros, compost y compost inoculado con lodo activado, con el objetivo de evaluar la eficiencia de remoción y capacidad de eliminación de vapores de alcohol isoamílico provenientes de un proceso industrial discontinuo. Para esto se desarrolló la caracterización del material de empaque de los biofiltros, el diseño y montaje a escala piloto de los biofiltros en la empresa productora de fragancias y saborizantes, la calibración de los equipos usados y las mediciones necesarias para obtener los resultados que se presentan en este documento.

4.1 LOCALIZACIÓN DEL EXPERIMENTO

La investigación se llevó a cabo en la empresa productora de fragancias y saborizantes ubicada en la vereda El Mameyal, corregimiento Los Andes, del municipio de Santiago de Cali (Valle, Colombia), ubicada entre los 1100 y 1300 msnm y con precipitaciones anuales de 1500 mm, temperatura promedio de 24 °C y humedad relativa entre 70 y 75 % (IDEAM, 2012).

4.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO INDUSTRIAL GENERADOR DE ALCOHOL ISOAMÍLICO

La empresa se dedica a la elaboración de distintas fragancias y saborizantes para la industria alimenticia. Dentro de sus procesos se encuentra la destilación discontinua de aceite de fúsel para separar el alcohol isoamílico de los demás compuestos y de esta manera usarlo en otra etapa del proceso. Esto genera corrientes gaseosas con COV's que deben tratarse antes de ser enviadas a la atmósfera. La operación de la planta se desarrolla durante 9 horas diarias (de 8:30 a.m. a 5:30 a.m.) y cinco días a la semana (de lunes a viernes).

La destilación llevada a cabo es del tipo batch, acorde con el proceso descrito en la Figura 4.

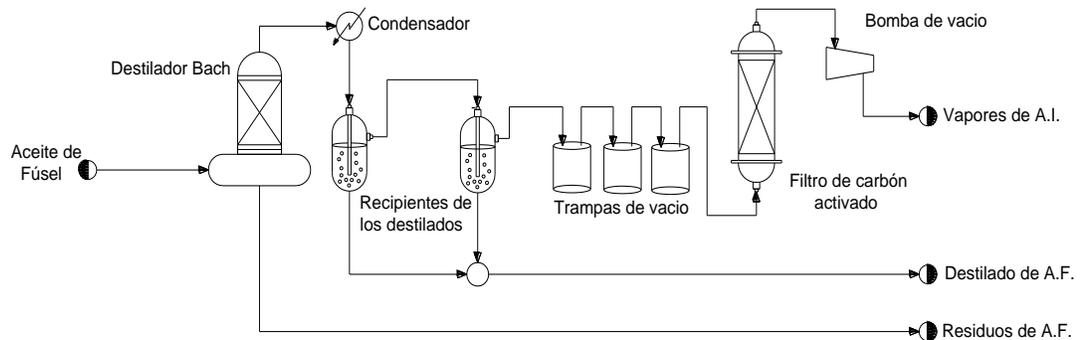


Figura 4. Planta de destilación de la empresa

El aceite de fúsel es cargado a un rehervidor enchaquetado de 200 L de capacidad. Allí la carga ocupa el 80 % del volumen y se calienta hasta su punto de burbuja, lo que produce dos fases. La fase gaseosa pasa a través de una columna empacada con trozos de vidrio, donde se induce una mejor separación de los componentes mediante el contacto del vapor con los condensados formados en dicha columna; mientras que la fase líquida permanece en el rehervidor para continuar con el proceso de separación.

El vapor que sale de la columna se envía a un condensador parcial, el cual se conecta con 2 envases de vidrio de 19 L que recogen el condensado, mientras que el vapor que no se alcanza a condensar pasa por medio de 3 trampas de vacío de vidrio de 2 L y un filtro de carbón activado de 415 L. Luego al vapor lo succiona una bomba de vacío y lo expulsa hacia el ambiente. Los componentes del vapor son alcohol isoamílico ($C_5H_{12}O$), etanol (C_2H_6O), propanol (C_3H_8O), isobutanol ($C_4H_{10}O$) y agua (H_2O).

Con base en el proceso descrito, se decidió que el montaje de la planta piloto de biofiltración se desarrollara en la zona de la emisión de dicha corriente (ver sección 4.6), es decir, después de la bomba de vacío del destilador. Esto con el fin de tomar una fracción del gas como objeto de estudio. Por ende, al sistema de biofiltración y a la atmósfera se

transportaron descargas de COV's de forma discontinua con concentración variable en el tiempo de la fase experimental.

4.3 CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL GAS CONTAMINANTE

Antes de iniciar el montaje, durante tres semanas se desarrolló un estudio preliminar del gas emitido hacia el ambiente, con la finalidad de determinar la composición, el caudal del gas, presión y temperatura de la emisión generada en el proceso. El punto de medición de estas variables se ubicó en la salida de la bomba de vacío (ver Figura 4). La toma de muestras gaseosas se realizó cada 2 horas y las mediciones de caudal, temperatura y presión se hicieron cada hora.

El flujo, la temperatura y la presión se midieron por medio de un medidor de flujo de área variable (rotámetro de aguja), un termómetro de mercurio y un tubo en U lleno parcialmente de aceite de densidad 830 kg/m^3 , respectivamente.

La medición de la composición del gas se obtuvo a través del análisis de cromatografía de muestras gaseosas, el cual lo desarrolló el laboratorio de control de calidad de la empresa. Estas muestras se extrajeron por medio de una jeringa de gases de alta precisión y luego se almacenaron en viales de vidrio de 10 mL, selladas con agrafes metálicos y un corcho de baja porosidad (ver anexo G-13). La cantidad de volumen extraído por la jeringa fue de 5 mL por vez. Para tomar este volumen la aguja de la jeringa se introdujo en septums ubicados en las tuberías por donde transitaba el gas.

El equipo usado por la empresa para la determinar las concentraciones fue un cromatógrafo de gases modelo Agilent Technologies serie 6890 Plus, con una columna marca Agilent 19091Z-233, acoplado a un detector selectivo de masas MSD 5973 N. El gas portador fue helio con un flujo de $10,5 \text{ mL/min}$, presión de $8,64 \text{ psig}$ y temperatura de $270 \text{ }^\circ\text{C}$.

4.4 DISEÑO DE LOS BIOFILTROS

A partir de los resultados de la caracterización del gas, se establecieron las condiciones de operación de la fase experimental y se decidió usar como recipientes de los lechos a dos tanques en acero suministrados por la empresa, los cuales se acondicionaron para que funcionaran como biofiltros. En la Figura 5 se encuentra el esquema de las partes y dimensiones de cada biofiltro.

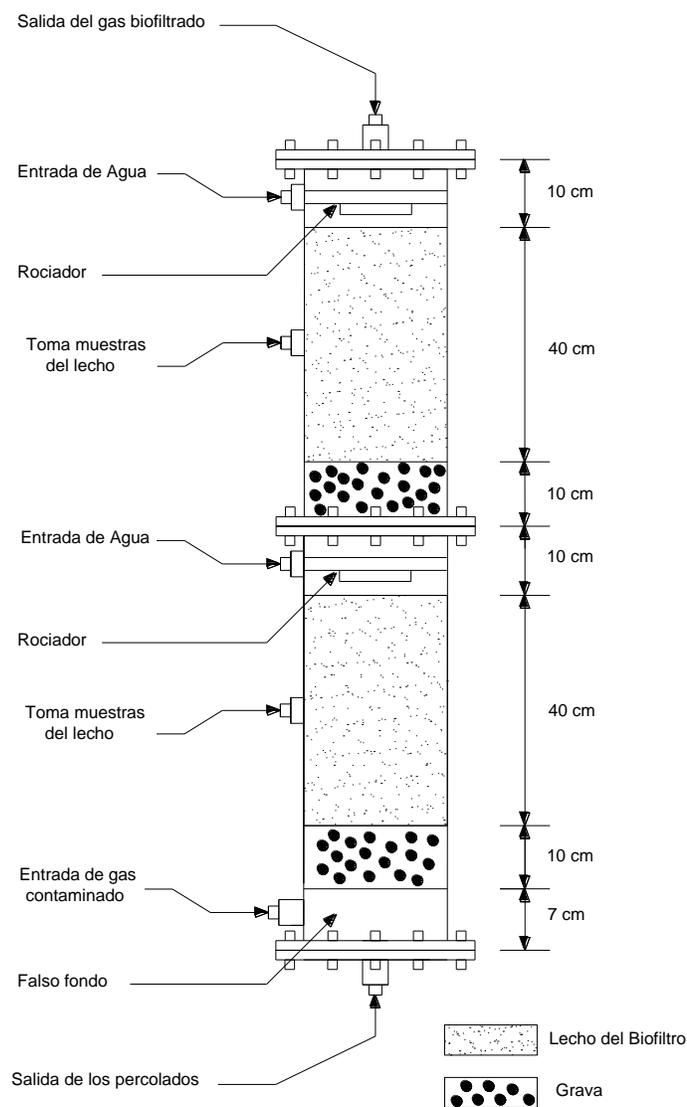


Figura 5. Dimensiones de los biofiltros

Cada uno de los biofiltros consistió en un tanque cilíndrico de acero de 0,23 m de diámetro y 1,27 m de altura, dividido en dos compartimientos, uno superior de 60 cm y otro inferior de 67 cm. Estos compartimientos se ensamblan entre sí por medio de tornillos, al igual que las tapas planas que sellan la parte inferior y superior de cada biofiltro.

Ambos comportamientos se acondicionaron con un sistema de riego de agua para mantener la humedad del lecho a un valor constante. El sistema de distribución de riego consistió en tubos de PVC perforados en forma de cruceta, cuya alimentación de agua se realizó por medio de una manguera acoplada a la tubería de agua municipal cada vez que era necesario. El diámetro de los orificios para el riego fue 3 mm aproximadamente.

Igualmente se dispuso de una capa de grava de altura de 10 cm y tamaño de partícula de 4 cm. Esto con la finalidad de homogeneizar el flujo de contaminantes y servir como sostenimiento del lecho en el interior del equipo. En la parte inferior se dispuso de un fondo falso de 7 cm de altura y de una llave para la eliminación de los percolados generados por las reacciones de los microorganismos y los residuos de agua de riego. Este falso fondo tiene un volumen de 1,5 L por debajo de la entrada de aire.

El material de empaque se adicionó hasta alcanzar una altura efectiva de 40 cm en cada compartimiento y las muestras gaseosas se tomaron a la entrada y salida de cada biofiltro.

4.5 ELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES DE EMPAQUE

El material base escogido como lecho para los biofiltros fue compost, por las características mencionadas en la tabla 4 respecto a los demás materiales usados comúnmente en biofiltros. Este se obtiene a partir de residuos de frutas y verduras en la planta de compostaje de la central de abastecimiento CAVASA S.A. En la Tabla 5 se encuentran las especificaciones de los nutrientes del compost usado como lecho en los biofiltros.

Tabla 5. Especificación de los nutrientes del compost usado. (CAVASA, 2012)

Parámetros		Unidad	Valor promedio
Macronutrientes	Nitrógeno total	%	2
	Nitrógeno amoniacal	%	0,03
	Materia orgánica	%	54
	Carbono orgánico	%	15
	Fósforo asimilable	%	4
	Calcio asimilable	%	5
	Potasio	%	3
Micronutrientes	Cobre	ppm	123
	Boro	ppm	84
	Hierro	ppm	856
	Manganeso	ppm	345
	Zinc	ppm	270

Con el propósito de seleccionar un tamaño de partícula adecuado que permita minimizar la caída de presión en el lecho del biofiltro, se llevo a cabo un análisis de granulometría del compost (ver anexo B-1). A partir de ello se determinó que el tamaño de partícula estuviera entre 0,99 y 2,36 mm, medidas que corresponden a los tamices 16 y 8 según las normas ASTM, respectivamente. Se escogió este rango teniendo en cuenta estudios anteriores (Jiménez & Villegas, 2005; Altamar, 2007), quienes concluyeron que partículas de este tamaño propician una buena transferencia de masa en la biofiltración y evitan grandes caídas de presión; además de que es el rango de partícula con más cantidad de masa del compost usado, con un porcentaje del 51.67 %.

Uno de los biofiltros se empacó con una mezcla compost–pellet en una proporción 60:40 % en volumen, respectivamente, mientras que en el otro se empacó con una mezcla compost-pellet-lodo activado en proporciones 50:40:10 % en volumen, respectivamente. El lodo activado se extrajo de la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa, puesto que posee microorganismos adaptados a la eliminación de residuos químicos generados por dicha empresa. Este lodo se filtró y se mezcló con los demás materiales.

Para aumentar la porosidad de los lechos y disminuir el efecto de compactación, se adicionaron los pellets de polipropileno de baja densidad, en forma de pequeños cilindros

de 3 mm de diámetro y 4 mm de altura. Antes del experimento se comprobó que las condiciones del gas no afectaban la estructura del polipropileno.

Antes y después de la fase experimental, a los materiales de los lechos se les practicó pruebas de microbiología para observar la cantidad de bacterias representativas en la biofiltración de alcoholes. El método usado para medir la cantidad de bacterias fue el recuento en placa profunda, donde se usaron como medios: Agar nutritivo para las bacterias heterotróficas y Agar Cetrimide para las Pseudomonas. Esto se hizo con el fin de establecer la tasa de crecimiento de las bacterias. También se realizaron pruebas de pH, densidad real y aparente, porosidad y capacidad de campo, las cuales son algunas de las características más influyentes en los biofiltros.

4.6 DISEÑO DEL SISTEMA DE BIOFILTRACIÓN

4.6.1 Montaje del sistema de biofiltración

La Figura 6 y el Anexo G muestran el montaje de la planta piloto, donde el flujo de entrada a los biofiltros es ascendente. Este montaje se realizó teniendo en cuenta el tamaño de los biofiltros y las condiciones de operación del experimento, las cuales se mencionan en la Tablas 6 y 7 en la sección 4.7.2. Los instrumentos de medición se instalaron sobre dos láminas metálicas de 90 cm de largo por 60 cm de ancho, ya que la estructura del lugar no permitió que la pared sirviera de soporte (ver Figuras G-10 y G-11).

Para el transporte de los gases se usó tubería y accesorios de PVC de ½” de diámetro y para las adaptaciones a equipos y medidores se utilizó manguera plástica de ¼” de diámetro. Todas las válvulas fueron de PVC y tipo bola de ½” de diámetro; a excepción de las válvulas 2 y 3, que fueron del tipo aguja de ¼”, puesto que la fracción del gas con COV's era de muy poco flujo volumétrico y su regulación era difícil al usar una válvula de bola.

En algunos tramos de tubería se instalaron recolectores de condensados (ver Figura G-7), para almacenar las gotas del gas que van condensando y evitar que interfieran con las mediciones en los instrumentos de medición. Estos recolectores consistieron en ramificaciones verticales de la tubería PVC con un tapón roscado.

La planta se puede dividir en 2 secciones, una como zona de pretratamiento de los gases y la otra como zona de biofiltración. En la primera se lleva a cabo la toma de una fracción del gas, la humidificación del aire para prevenir el secado del lecho, y la mezcla de ambas sustancias, mientras que en la segunda se realiza la biofiltración de la mezcla formada.

El gas emitido por la bomba de vacío (P-101) se envía hacia la planta piloto (flujo 2), donde las válvulas 1, 2 y 3 orientan el gas hacia la bocatoma (flujo 3) o hacia el sistema de biofiltración (flujo 4). Por lo tanto, cuando la planta de biofiltración no está en uso, la válvula 1 permanece abierta, mientras que la 2 y la 3 permanecen cerradas.

Cuando el sistema está en funcionamiento la válvula 1 se cierra y el flujo 4 se divide en dos flujos por medio de las válvulas 2 y 3, para así obtener la fracción de vapores de alcohol isoamílico que va a ingresar al sistema de biofiltración (flujo 6) y desechar el resto (flujo 5). El flujo molar de la corriente 6 se regula basado en los resultados dados por los medidores de esta corriente (de presión, temperatura y caudal) y se envía al mezclador, el cual consiste en un recipiente de vidrio de 19 L donde el gas se expande y se mezcla con aire húmedo.

El aire de mezcla inicia el proceso al ser transportado por el compresor (C-101), el cual toma este aire del ambiente y lo envía hacia un regulador de presión que disminuye su presión de 40 a 5 psig (flujo 9). El flujo molar de aire (flujo 11) se regula por medio de los medidores de presión, temperatura y caudal y la abertura de la válvula 4.

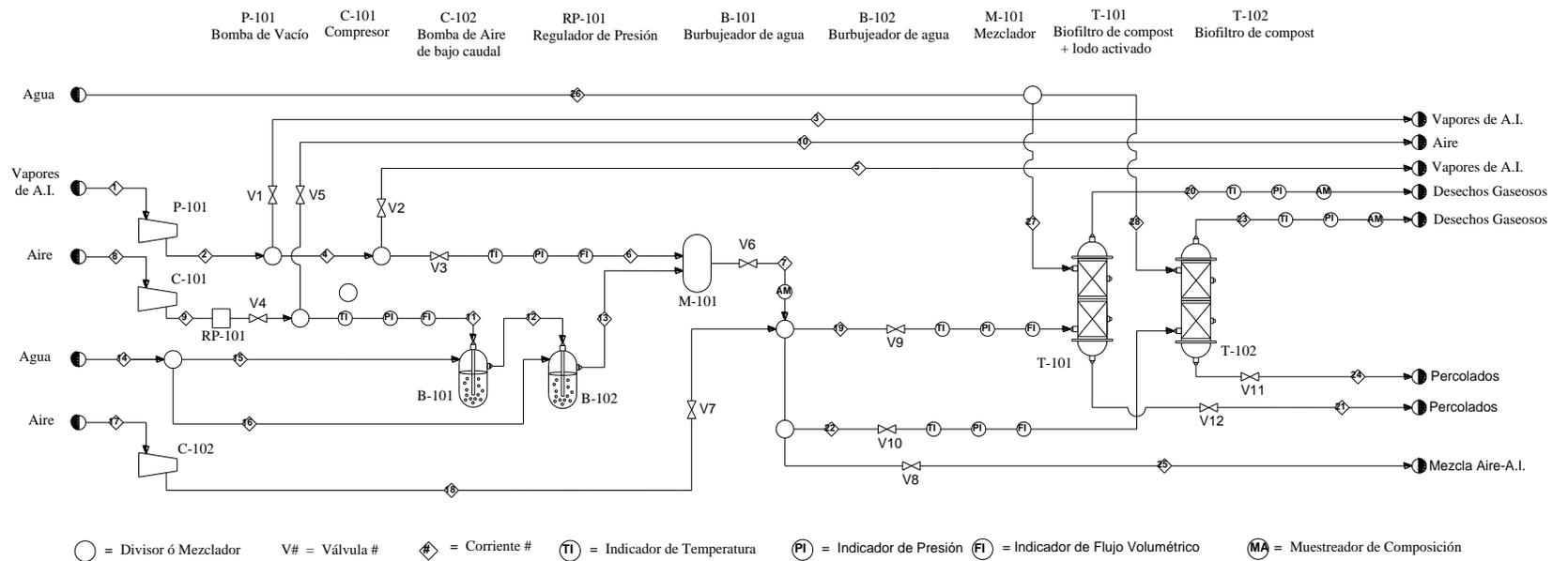


Figura 6. Diagrama de flujo de la planta de biofiltración diseñada

Después del regulador de presión se instaló la válvula 5 para permitir la disminución del caudal de aire al enviar parte de la corriente de aire comprimido (flujo 10) hacia la atmósfera, con el fin de evitar que los equipos se sobre- presionen durante el arranque, porque el compresor almacena aire a 60 psig en su tanque cuando la planta deja de funcionar. Por ende, bajo este sistema el flujo de aire comprimido (flujo 9) durante el arranque posee una presión de 60 psig y luego de 10 min se estabiliza en 40 psig, dando como resultado un flujo constante; en este momento se cierra la válvula 5.

Luego del paso a través del regulador de presión, el aire entra a dos humidificadores (B-101 y B-102), los cuales le incrementan la humedad relativa de 70 a 97 %. En los humidificadores el agua permanece estática y el aire se burbujea es ésta. De esta manera el aire absorbe agua a través del contacto de las burbujas con la fase líquida. El nivel de agua en cada humidificador se debe mantener en 36 ± 3 cm. Luego de la humidificación comienza la segunda sección, donde la mezcla se separa para que entre a los lechos y en donde se toman las muestras gaseosas a analizar.

Una vez que el aire se humidifica, se envía al mezclador para producir la mezcla aire-vapor de alcohol isoamílico (flujo 7) con una concentración del contaminante apropiada para introducirla a los biofiltros. A cada parte de la mezcla se le mide la presión, la temperatura y el caudal antes y después del paso por los biofiltros. El caudal se regula por medio de las válvulas ubicadas antes de cada lecho. También se puede regular el caudal de estas corrientes (flujos 19 y 22) a través de la abertura de la válvula 8, la cual permite el paso de parte de la mezcla hacia la atmósfera sin afectar las demás corrientes.

Una vez que las mezclas gas-aire ingresan a los biofiltros (T-101 y T-102), de ambos se obtiene como resultado agua percolada y gases con baja concentración de alcohol isoamílico. A los lechos se les agrega agua cada 4 días para mantener la humedad cercana al 50 % en base húmeda.

En los periodos en que la destilería no emite gases, se apagan la bomba de vacío y el compresor, se cierra la válvula 6, se abre la válvula 7 y se pone a funcionar un soplador de aire de bajo caudal (C-102), el cual comúnmente se usa para inflar colchones y piscinas inflables y se observa en el la figura G-5. Con esta bomba se envía 3 L/min de aire a los lechos y se garantiza condiciones aerobias en el interior de ellos.

4.6.2 Instrumentos de medición

En la planta se emplearon 4 medidores de flujo, dos de ellos se usaron para medir los caudales de las mezclas aire-contaminantes que entran a los biofiltros, y los otros dos se utilizaron en la medición del gas contaminante y el aire comprimido.

Los dos primeros consistieron en medidores de flujo de área variable (rotámetros de aguja), que constan cada uno de un flotador y un tubo medidor de forma cónica, donde se encuentran registradas diferentes alturas que indican cuanto es la cantidad de flujo volumétrico cuando el flotador se desplaza de forma vertical.

Para medir la fracción de gas contaminante se usó un rotámetro de balón, cuya escala de medición es muy pequeña; mientras que para la medición del aire de dilución se usó un medidor de flujo tipo restricción en el que se induce una alteración en la presión debida a una contracción-expansión de las tuberías, la cual se lee en un tubo en U parcialmente lleno con aceite. En este último medidor la medición del caudal se hace en base a la caída de presión, que es proporcional al flujo.

En la calibración de los medidores de caudal se usó un medidor húmedo de gases ESTEL HANDEL MAINZ, el cual se puede observar en la figura G-9. Las gráficas de estas calibraciones se pueden observar en el anexo E, donde se relaciona el caudal dado por el medidor húmedo de gases con la altura marcada en los instrumentos. A cada medidor se le asignó un número: 1 para el rotámetro de balón, 2 para el medidor tipo restricción, 3 y 4 para los rotámetros de aguja ubicados antes de los biofiltros de compost inoculado con

lodo activado y compost, respectivamente. Para medir la temperatura, en las secciones se instalaron tornillos sobre algunos orificios de la tubería, los cuales se removían para introducir un termómetro de mercurio.

En la planta piloto se instalaron cuatro manómetros diferenciales parcialmente llenos de aceite para la medición de la presión antes y después de los biofiltros, un manómetro diferencial parcialmente lleno de mercurio para la medición del gas contaminante antes de la dilución y un manómetro tipo Bourdon para el aire comprimido. Las densidades del aceite y el mercurio son 830 kg/m^3 y 13000 kg/m^3 , respectivamente.

4.7 FASE EXPERIMENTAL

La puesta en marcha de los biofiltros se llevó a cabo entre el 24 de Enero y el 5 de Abril de 2011. Periodo donde la planta piloto operó en el mismo horario de la planta de destilación. Aunque la empresa comenzaba operaciones a las 7:30 a.m., la alimentación se realizó una hora después, ya que este tiempo se usaba para inspeccionar las tuberías y así evitar problemas con condensados y fugas, observar los equipos para detectar problemas, retirar los percolados, humidificar los lechos, e inyectar agua a los humidificadores. En algunas ocasiones se presentaron paradas por mantenimiento y problemas de la bomba de vacío y el compresor, lo que ocasionó que los periodos de no uso incrementaran hasta 5 días seguidos.

El manual de operación de la planta piloto se encuentra en los anexos, allí se describe paso a paso la forma como se operó durante el experimento y las precauciones que se tomaron antes de operar.

Antes de arrancar con esta fase experimental, durante 3 semanas se hizo un estudio de secado de los biofiltros, con el fin de conocer la variación de la humedad de los lechos cuando opera la planta piloto. De esta manera se estableció la cantidad de agua a reponer para mantener en un rango adecuado los valores de esta variable. Las curvas de secado de

los lechos se pueden observar en el anexo C. Las muestras de lecho se extrajeron cada 4 días para no afectar su estructura, donde la cantidad extraída fue de 5 gramos.

4.7.1 Mediciones en la fase experimental

La medición principal fue la concentración de alcohol isoamílico en la corriente de entrada y salida de los lechos, ya que permite evaluar la eficiencia y la capacidad de eliminación. Sin embargo se midieron la temperatura, presión y caudal del gas, puesto que estas variables se consideran explicadoras del comportamiento de los biofiltros. Para tener más fundamentos en el análisis de los resultados, antes y después de la fase experimental se midió el contenido de bacterias heterotróficas y *Pseudomonas*, el pH, la porosidad y la capacidad de campo.

Las muestras gaseosas se tomaron 2 veces al día, generalmente a las 10:00 a.m. y 4:30 p.m. Cuando se arrancaba con la destilación no se tomaron muestras porque el flujo de gas contaminante era muy pequeño comparado con el generado cuando el interior del rehervidor alcanzaba la temperatura de burbuja del aceite fúsel cargado. Esta temperatura solo se logró aproximadamente a las 1,5 horas después del arranque de los equipos.

La composición de las muestras gaseosas se obtuvo a través de un análisis de cromatografía, el cual fue desarrollado por el laboratorio de control de calidad de la empresa con las mismas condiciones y equipos usados durante la caracterización inicial del gas (ver sección 4.3). La toma de muestras fue similar a la usada durante dicha caracterización.

4.7.2 Condiciones experimentales

La tabla 6 resume las condiciones de operación de los biofiltros durante el experimento, donde el biofiltro de compost inoculado con lodo activado y el de compost se nombran como B1 y B2, respectivamente.

Tabla 6. Condiciones de operación de los biofiltros durante la fase experimental

Parámetro	Rango	
	B1	B2
Volumen efectivo de empaquetamiento (m ³)	0,0415	0,0415
Área transversal del lecho (m ²)	0,0415	0,0415
Altura del lecho (m)	0,4	0,4
Carga superficial (m ³ /m ² h)	30	30
Porosidad del lecho (%)	48,76	61,34
Tiempo de residencia para lecho vacío (s)	120	120
Tiempo de residencia real (s)	58	73
Humedad promedio del lecho (% bh)	45-50	45-50
Caudal del gas de entrada (m ³ /h)	1,25	1,25
Concentración de alcohol isoamílico en el gas de entrada (g/m ³)	0 - 1	0 - 1
Humedad relativa del gas de entrada (%)	97	97
Caudal del aire auxiliar en periodos de no uso (m ³ /h)	0,003	0,003

La concentración de alcohol isoamílico en el aire contaminado que entra a los biofiltros puede cambiar con la variación de la temperatura, presión y caudal de las corrientes que entran al mezclador ó con la fluctuación de la concentración del gas que emite la bomba de vacío. Para este estudio se consideró la segunda opción, lo que permitió tener la carga superficial constante.

Las variables volumen del lecho, área transversal, tiempo de residencia y caudal del gas de entrada permanecieron constantes durante la fase experimental, mientras que el flujo del gas emitido por la bomba de vacío, el flujo de aire, la humedad de los lechos, y humedad relativa del aire se controlaron para que tuvieran variaciones poco considerables. Los registros de estas variables se encuentran en el anexo D.

El tiempo de residencia real se calculó teniendo en cuenta la porosidad, según la siguiente ecuación:

$$\tau = V\theta / Q \quad (2)$$

Donde: τ = Tiempo de residencia (s), V = Volumen del lecho (m^3), Q = Caudal del gas (m^3/s), θ = Porosidad del lecho (Fracción).

Se dispuso trabajar con 50 % de humedad en cada lecho, ya que este valor está dentro del rango recomendable según la literatura (Altamar, 2007; Jiménez & Villegas, 2005; Achipiz y López, 2006). Cada 4 días se adicionaron de 0,5 y 1 L de agua, en la parte superior e inferior, respectivamente. Esta cantidad se calculó con base en las curvas de secado de los dos equipos.

Para realizar algunos cálculos se estableció trabajar con una concentración promedio de alcohol isoamílico de $2,52 \text{ g/m}^3$ en la mezcla aire-gas contaminante de entrada a los biofiltros, ya que Achipiz & López (2006) afirman que este valor permite un comportamiento con mayores eficiencias de remoción y una concentración de salida menor al límite de exposición durante 8 horas.

Los promedios de las condiciones de los flujos se encuentran reportados en la Tabla 7.

Tabla 7. Condiciones de operación de los flujos durante la fase experimental

Parámetro	Valores promedio			
	Gas contaminante	Aire comprimido	Mezcla de entrada Bio. 1	Mezcla de entrada Bio. 2
Caudal (m^3/h)	0,035	2,38	1,25	1,25
Temperatura ($^{\circ}C$)	25	24	24	24
Presión (psia)	12,76	14,59	12,37	12,34

Mediante ensayos de la operación de la planta piloto y una carta Psicométrica, se determinó que los humidificadores debían llenarse hasta una altura de 36 cm para que el aire de salida alcance una humedad cercana al 97 % y evite que los lechos se sequen.

Como cada uno de estos equipos posee un diámetro de 22 cm, se adaptó un tubo de 40 cm de largo y 3 mm de diámetro, el cual se introduce en el agua y permite que el aire sea burbujado. El diámetro de este tubo se determinó a través de los datos de Treybal (1988), donde para humidificadores de diámetro menor a 30 cm se recomienda que el diámetro de la burbuja generada sea de 3 mm o menos.

Con el fin de asegurar que la mezcla que entra a los biofiltros fuera homogénea, se verificó que el volumen del mezclador fuera el adecuado a través de la siguiente ecuación:

$$V_M = Q \tau \quad (3)$$

Donde: V_M = Volumen del mezclador (L), Q = Caudal de Operación (L/s), τ = Tiempo ideal de mezclado (s).

En base a estudios a nivel laboratorio, Altamar (2007) afirma que el tiempo mínimo ideal de mezclado es 4,5 s, por tanto se obtiene que el volumen mínimo del mezclador es 1,5 L. El volumen del mezclador usado es 19 L, lo que indica que hubo un mezclado homogéneo.

4.8 EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

Para el análisis de los resultados se utilizaron las ecuaciones de la Tabla 3 del marco teórico, diagramas de dispersión de datos, de cajas y alambres y gráficos de control, que son métodos gráficos que proporcionan información visual de la tendencia de los datos.

Las ecuaciones usadas correlacionan las variables de respuestas con algunas de las variables medidas y son las empleadas con mayor frecuencia por muchos autores para el reporte de sus resultados.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se estudian las variables de respuesta, que son la eficiencia de remoción y capacidad de eliminación; la influencia de las fluctuaciones de la concentración de entrada del gas y el efecto de los periodos de no uso sobre estas dos variables.

A partir de las mediciones directas durante la fase experimental, se obtuvieron los resultados que permiten entender el comportamiento de los biofiltros, los cuales se encuentran en los anexos. A continuación las variables precedidas de B1 y B2 indican que son las mediciones de los biofiltros de compost inoculado y compost sin inocular, respectivamente. Las variables concentración de entrada, concentración de salida, eficiencia de remoción y capacidad de eliminación se indican como C_e , C_s , E_f y CE , respectivamente.

Algunos datos de la semana 1 y 3 y todos los de la semana 4 (los que se encuentran subrayados con amarillo en la Tabla D-2) no se encuentran en ninguna de las figuras de esta sección porque la concentración de salida fue mayor a la concentración de entrada, lo que ocasiona que la eficiencia de remoción y capacidad de eliminación tengan valores negativos. Estos datos no se incluyeron en los análisis porque no se sabe con certeza que se deban a errores en la toma de muestras ó en los instrumentos de medición (situación muy probable), ó por una desorción de los lechos.

El fenómeno de desorción se considera una de las posibles causas, debido a que los lechos de los biofiltros pueden llegar a saturarse, lo que ocasiona que el sentido de la difusión cambie al entrar contaminante con una concentración muy baja. Algunos autores (Achipiz & López, 2006; Hernández, 2001; Jiménez y Villegas, 2005) reportan algunos casos parecidos donde se presentaron valores negativos de eficiencia, pero estos al igual que esta

investigación no pudieron determinar sus causas, aunque consideran menos probable el fenómeno de desorción.

5.1 VARIACIÓN DE LAS VARIABLES DURANTE LA CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL GAS

Durante la caracterización inicial del gas, la presión, temperatura y caudal se midieron solamente para realizar el diseño de la planta, pero estos datos no influyeron en los resultados de la fase experimental, puesto que se tomó una fracción del gas. Sin embargo en el Anexo A se muestran los gráficos de la variación de estos datos como complemento de la investigación.

Con esta caracterización se pudo notar que la composición de la corriente que sale de la bomba de vacío es una mezcla de agua (H_2O) y varios alcoholes: etanol (C_2H_6O), propanol (C_3H_8O), isobutanol ($C_4H_{10}O$) y alcohol isoamílico ($C_5H_{12}O$). La Tabla de resultados se encuentra en el Anexo A. En la Figura 7 se muestra la alta variación de la concentración de cada contaminante generado en el proceso durante dicha caracterización inicial, donde el alcohol isoamílico es el componente en mayor proporción y es la sustancia que presenta mayor fluctuación en la concentración. Por lo tanto si se establecen las diferentes proporciones de los alcoholes producidos, se puede considerar al etanol, propanol e isobutanol como elementos traza.

Al observar la Figura 7 se nota un comportamiento cíclico en la concentración del alcohol isoamílico, donde los valores más bajos corresponden a la hora de arranque de la destilación, y donde los valores más altos se registraron en las horas de la tarde. Por este motivo se determinó que el muestreo del gas se realizara en las dos jornadas, puesto que permite observar el comportamiento de los biofiltros ante la fluctuación de la concentración.

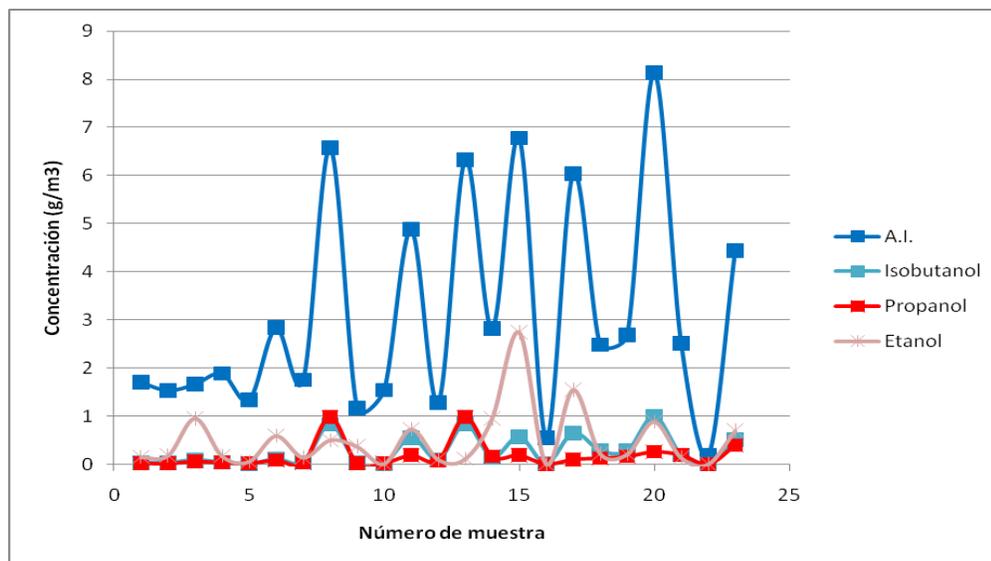


Figura 7. Concentración de los alcoholes en el gas durante la caracterización inicial

5.2 VARIACIÓN DE LAS VARIABLES DURANTE LA FASE EXPERIMENTAL

El registro de los resultados obtenidos se encuentra en el Anexo D, donde también se detallan los estadísticos que permiten un mejor análisis de la información.

5.2.1 Variación de la concentración en las corrientes de entrada y salida

En la Figura 8 se muestra la variación de la concentración de entrada y salida (mediciones principales) respecto al tiempo, donde se indican los periodos de no uso que separan las semanas de operación. Para analizar las tendencias y fluctuaciones de las concentraciones a lo largo de todo el experimento y por ende tener una observación más clara de Cs, se realizó un diagrama de cajas y alambres de todas las concentraciones semana por semana. Este diagrama se puede observar en la Figura 9.

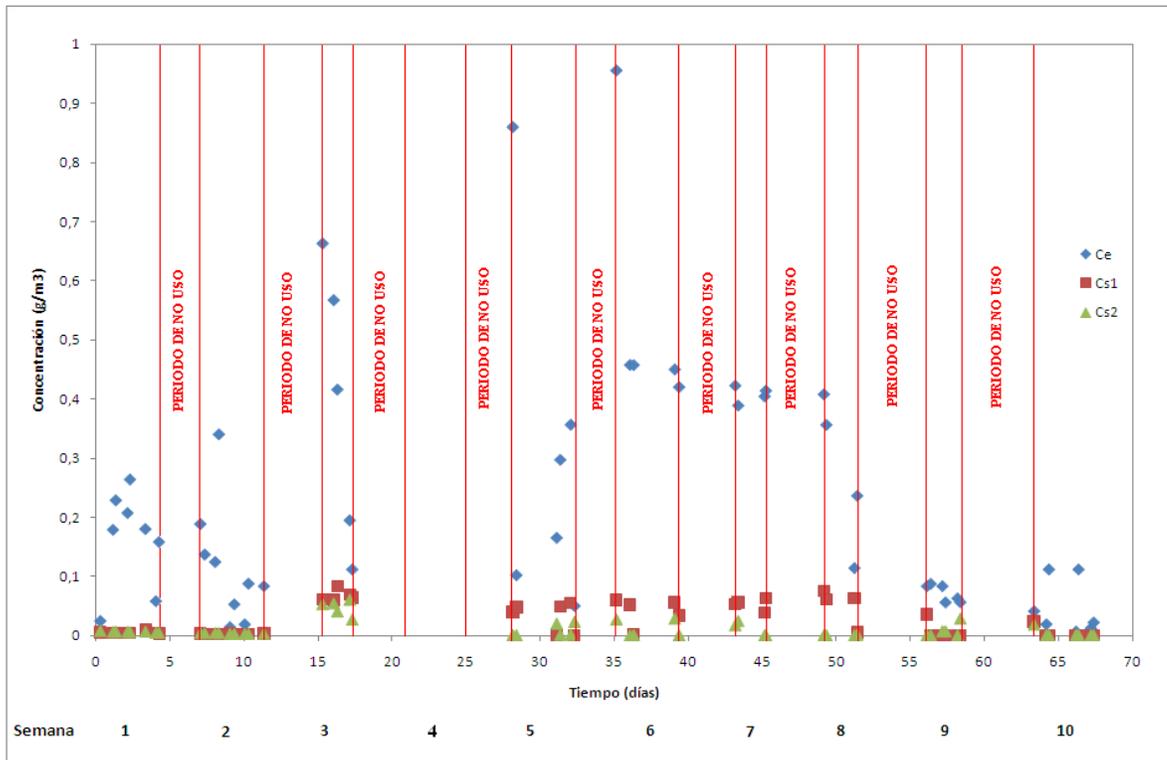


Figura 8. Variación de las concentraciones de entrada y salida en la fase experimental

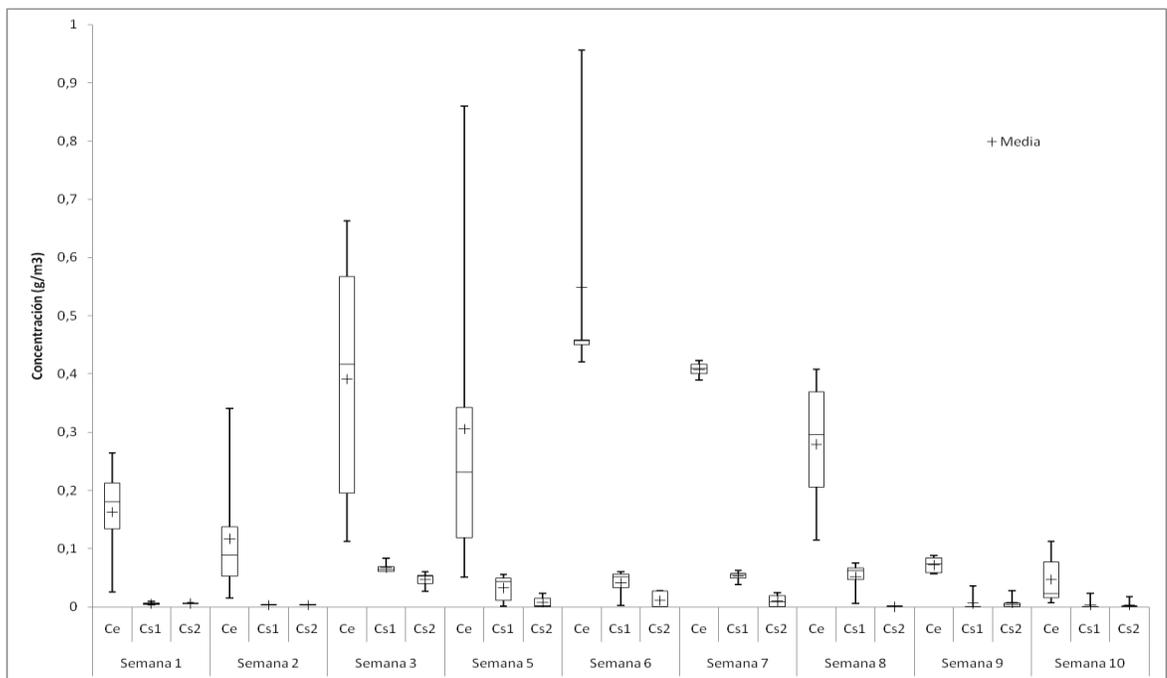


Figura 9. Diagrama de cajas y alambres de la concentración

Los datos recolectados muestran claramente que para una misma semana, en los periodos de alimentación de contaminante, la concentración de salida de ambos biofiltros tuvo una tendencia poco fluctuante comparada con la alta variación de la concentración de entrada. C_e presentó fluctuaciones desde $7,2 \times 10^{-3}$ hasta $9,6 \times 10^{-1} \text{ g/m}^3$ a lo largo de toda la fase experimental, mientras que C_s estuvo entre $1,3 \times 10^{-6}$ y $8,3 \times 10^{-2} \text{ g/m}^3$ para el biofiltro de compost y entre $2,8 \times 10^{-6}$ y $6,1 \times 10^{-2} \text{ g/m}^3$ para el biofiltro de compost inoculado. Lo anterior y el hecho de que la media y la mediana de C_s fueron similares, señalan que durante los periodos de uso, el comportamiento de cada biofiltro fue similar dentro de una misma semana.

Las Figuras 8 y 9 permiten concluir que cambios en el rango de C_s entre dos semanas, tienen mayor probabilidad de haber ocurrido por la presencia de un cambio drástico en el rango de la concentración de entrada, más que por los periodos de no uso, puesto en las semanas consecutivas donde el rango de C_e fue semejante, el rango de la C_s fue similar. Esto se infiere debido a que los resultados entre la semana 1 y 2 son parecidos, pero varían cuando la concentración de entrada de la semana 3 aumenta drásticamente. Lo mismo sucede para las semanas 3 a 8, donde la C_s permaneció casi constante hasta que C_e disminuyó bruscamente en la semana 9 y 10.

La Figura 10 se realizó para conocer las diferencias de la operación de los biofiltros entre las jornadas mañana y tarde. De esta manera se determinó que los periodos de no uso de 15 horas no son muy influyentes en la C_s de ninguno de los biofiltros, puesto que esta variable tuvo dispersión similar entre ambas jornadas. En esta figura no se separaron las cajas por semanas debido a la poca cantidad de datos para una jornada en una semana.

El hecho de que los periodos de no alimentación de los fines de semana no ocasionaron cambios en el rango de la concentración de salida, y el análisis de la Figura 11 permiten concluir que no hubo cambio en la operación del equipo por los periodos de no uso menores a de dos días, sino por el cambio de rango de C_e .

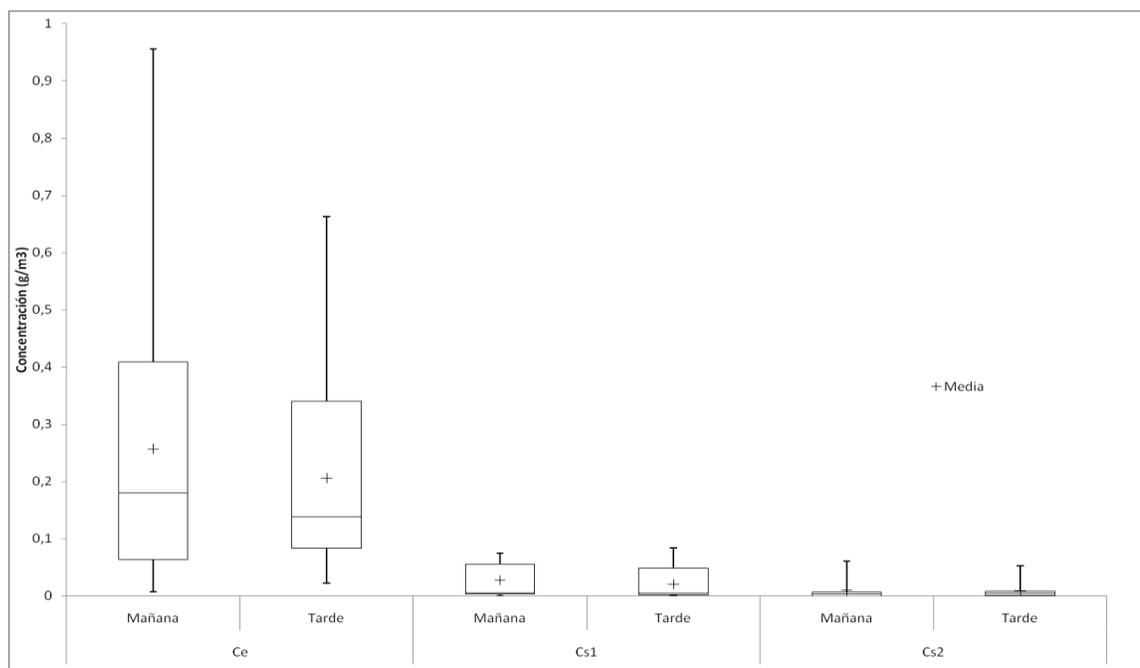


Figura 10. Variación de las concentraciones en las mañanas y tardes

Debido a todos los resultados anteriores se comprobó las afirmaciones de algunos investigadores (Deshusses & Sakuma, 2006; Jiménez & Villegas, 2005) que mencionan al compost como un material que propicia una biofiltración de fácil arranque, y que soporta operación intermitente.

5.2.2 Variación de la presión y la temperatura de las corrientes de entrada y salida

La temperatura de entrada y de salida mantuvieron una tendencia casi constante e igual para ambos biofiltros, las cuales fueron 24 ± 2 °C y 25 ± 2 °C, respectivamente. La poca variabilidad de estos datos en comparación con la fluctuación de la concentración de entrada, y el hecho de que el rango de temperatura óptimo para mantener una buena de actividad microbológica se encuentra entre 5 y 55 °C (Grant & Long, 2008), permiten afirmar que la variación de la temperatura no fue un factor influyente en los cambios de Cs de la Figura 8.

La presión es una variable que se relaciona directamente con el flujo a lo largo de todo el sistema, en el especial en los lechos, ya que caídas de presión muy altas indican que el flujo tiene inconvenientes para transitar a través de los equipos, y caídas de presión muy bajas muestran que el tiempo de residencia de la corriente es muy pequeño. Pero al observar los datos del anexo D se puede notar que esta variable tuvo poca fluctuación en la entrada y salida en comparación con la variabilidad de C_e , lo que indica que tuvo poca influencia en la variación de C_s .

5.2.3 Cambio en las propiedades fisicoquímicas de los lechos

El cambio de algunas propiedades fisicoquímicas del compost al agregar el lodo activado y los pellets se puede notar en la Tabla 8, donde se muestran los resultados de la caracterización fisicoquímica que se le realizó a los materiales que conforman los lechos y su comparación cuando se mezclan. Las mediciones se hicieron con humedad de 50 % de los lechos.

Tabla 8. Caracterización fisicoquímica inicial de los materiales de los biofiltros

Parámetro	Compost	Lodo activado	Compost + Lodo activado	Pellets	Compost + pellets	Compost + lodo activado + pellets
pH	8,75	5,67	8,15	---	8,6	8,05
Densidad real (g/mL)	1,54	1,2	1,46	0,89	1,19	1,21
Densidad aparente (g/mL)	0,8	0,95	0,94	0,49	0,46	0,62
Porosidad (%)	48,05	20,83	35,61	44,94	61,34	48,76
Capacidad de campo (%)	52,24	65,64	60,62	---	54,22	62,31

Al observar la Tabla 8 se puede visualizar el aumento en la porosidad al adicionar pellets al compost y al compost inoculado con lodo activado, con lo que se comprobó que los pellets son un material inerte adecuado para mejorar la estructura de los lechos sin afectar las demás propiedades.

En comparación con el compost puro, la mezcla compost y lodo activado tuvo pH y porosidad menor. Esto ocasiona que el compost inoculado tenga propiedades menos aptas para la supervivencia de la mayoría de los microorganismos, ya que generalmente entre más bajo sea el pH, la actividad microbiológica es menor (Grant & Long, 2008); y para porosidades bajas el área de contacto entre el gas y la biopelícula disminuye, lo que hace que la difusión de contaminante sea menor y por ende que la degradación sea más baja. Sin embargo la capacidad de campo fue mayor en el compost inoculado, lo que indica que puede retener más agua, factor que permite el aumento de la biomasa puesto que facilita la disolución de contaminante.

La Tabla 9 muestra las mediciones fisicoquímicas de los materiales de empaque que se realizaron al final del experimento. Las secciones para un mismo biofiltro no presentaron diferencias sustanciales. Las mediciones también se hicieron con humedad de 50 % de los lechos.

Tabla 9. Caracterización fisicoquímica final de los materiales de los biofiltros

Parámetro	Compost + pellets	Compost + lodo activado + pellets
pH	8,12	6,55
Densidad real (g/mL)	1,1	1,08
Densidad aparente (g/mL)	0,49	0,61
Porosidad (%)	55,22	43,88
Capacidad de campo (%)	55,22	67,33

Al comparar las Tablas 8 y 9, se nota que el pH del lecho de compost disminuyó de 8,6 a 8,12, lo cual es un cambio leve comparado con el del compost inoculado, que disminuyó de 8,05 a 6,55. Esto indica que el compost sin inocular tiene más capacidad buffer, y por ende un ambiente más adecuado para la supervivencia de los microorganismos. La disminución del pH posiblemente se dió por la formación de compuestos ácidos debido a la actividad biológica, ya que muchos microorganismos tienen funciones metabólicas donde se producen ácidos orgánicos (Grant & Long, 2008). Debido a la frecuencia de las mediciones no se pudo detectar el instante preciso del cambio del pH, por ende, un

seguimiento más continuo del pH de los percolados y de los lechos permitiría establecer si hubo o no barrido de ácidos.

La porosidad de ambos lechos disminuyó, lo que demuestra que se compactaron debido a los riegos y percolaciones y al peso del mismo lecho. Pero esta compactación no fue muy influyente en el flujo de gas, puesto que la caída de presión permaneció casi constante (ver sección 5.2.2).

Si la capacidad de campo hubiera disminuido por debajo del 50 %, la humedad del lecho no podría alcanzar 50 % al realizar los riegos, pero como permaneció poco variable y superior al 50 % se puede concluir que la humedad se mantuvo dentro del rango de operación establecido.

5.2.4 Crecimiento de la población de microorganismos

En la Tabla 10 se detalla el conteo de bacterias heterotróficas y Pseudomonas de los lechos antes de la fase experimental, donde también se observa el aumento en la cantidad de bacterias al agregar el lodo activado de la empresa. Para el compost inoculado con lodo activado, la prueba se realizó 3 días después de la mezcla de los materiales, ya que este es el periodo que tarda en completarse la inoculación (Aguayo, 2005).

Tabla 10. Conteo microbiológico de los materiales de los lechos al inicio del experimento

Tipo de material	Cantidad de Pseudomonas (UFC/g)	Cantidad de bacterias heterotróficas (UFC/g)
Compost	3 E4	16 E7
Lodo activado	60 E4	28 E7
Compost inoculado con lodo activado	50 E4	19 E7

De la tabla anterior cabe destacar el aumento en la cantidad de Pseudomonas al mezclar el lodo activado con compost, las cuales, dentro de la clasificación de bacterias

heterotróficas, son los microorganismos que más se involucran en la degradación de los COV's (Cárdenas et al., 2003; Yves, et al., 2009; Elias, 2010).

En la Tabla 11 se muestra el contenido de bacterias después de la fase experimental, donde se nota la diferencia entre las partes de cada uno de los biofiltros. En la tabla 10 no se hizo diferenciación entre las partes de los dos tipos de lechos como se hizo en la tabla siguiente, puesto que cada lecho se preparó y luego se dividió en dos secciones.

Tabla 11. Conteo microbiológico de los materiales de los lechos al final del experimento

Tipo de lecho	Ubicación	Cantidad de Pseudomonas (UFC/g)	Cantidad de bacterias heterotróficas (UFC/g)
Compost	Superior	8 E5	64 E7
	Inferior	2 E5	15 E7
Compost inoculado con lodo activado	Superior	7 E5	31 E7
	Inferior	5 E5	26 E7

Al agua de riego (extraída del sistema de agua municipal) se le realizó un solo sembrado en profundidad, en la cual no se encontraron Pseudomonas ni bacterias heterotróficas, por ende se puede decir que durante la experimentación las clases de bacterias heterotróficas fueron autóctonas de los lechos.

Para tener una visualización más clara del crecimiento bacteriano se graficaron los valores de las Tablas 10 y 11. Las figuras resultantes se encuentran en las Figuras 11 y 12.

Al comparar las Figuras 11 y 12 se puede afirmar que hubo crecimiento apreciable de Pseudomonas y heterotróficas en ambos biofiltros, lo que comprueba que las primeras son los microorganismos que tienen mayor influencia en la remoción de COV's, como se ha establecido anteriormente.

El aumento en la cantidad de Pseudomonas fue en mayor proporción en el biofiltro de compost, lo cual es algo contradictorio si se piensa que al inocular el lecho, la cantidad de

bacterias aumenta y por ende la Cs disminuye. Aunque Deshusses (2000) afirma que en algunas investigaciones se desarrollaron cepas microbianas especializadas en la degradación de un compuesto, las cuales se inocularon en algunas clases de lechos, pero luego presentaron problemas de adaptación al medio cuando se desarrolló el proceso de biofiltración.

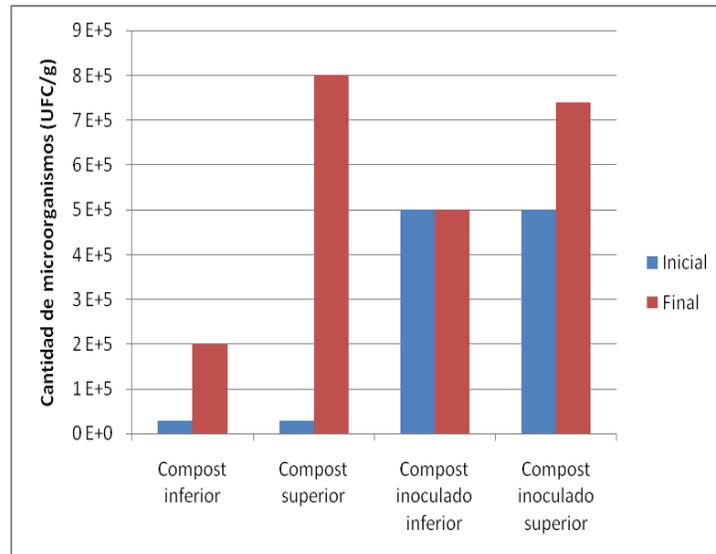


Figura 11. Crecimiento de Pseudomonas durante la fase experimental

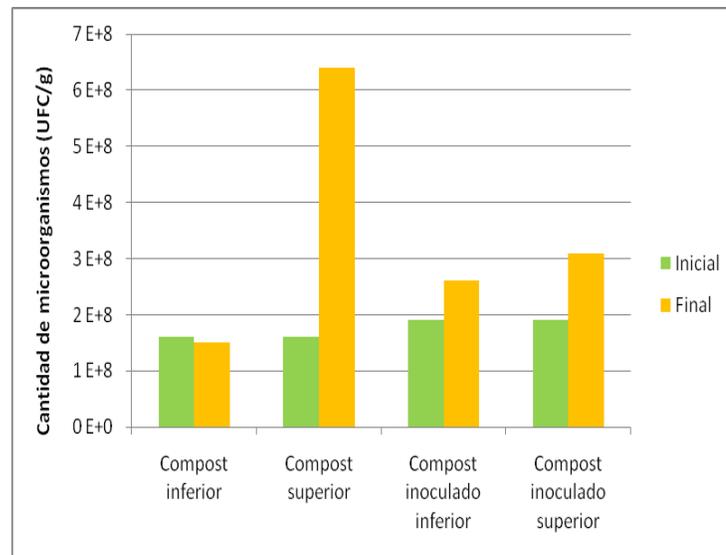


Figura 12. Crecimiento de bacterias heterotróficas durante la fase experimental

En los estudios experimentales de Baltzis (1997), este autor sugirió que los consorcios microbianos para la remoción de etanol y butanol son diferentes aunque los compuestos son de estructura similar, por lo tanto existen diferentes tipos de biomasa para cada COV (Deshusses, 2000). Este fenómeno también pudo haber influido en la diferencia en la cantidad de bacterias, ya que cada lecho posee diferentes clases de microorganismos que pudieron crecer en diferentes proporciones debido a que se introdujo una mezcla de varios alcoholes.

Comparando la parte inferior con la superior, en ambos lechos la primera tuvo una menor cantidad de microorganismos. Este efecto indica que posiblemente se presentó estratificación vertical, donde los compuestos más biodegradables son metabolizados en los niveles cerca a la entrada, y los menos biodegradables son degradados en los niveles cercanos a la salida del biofiltro (Grant & Long, 2008).

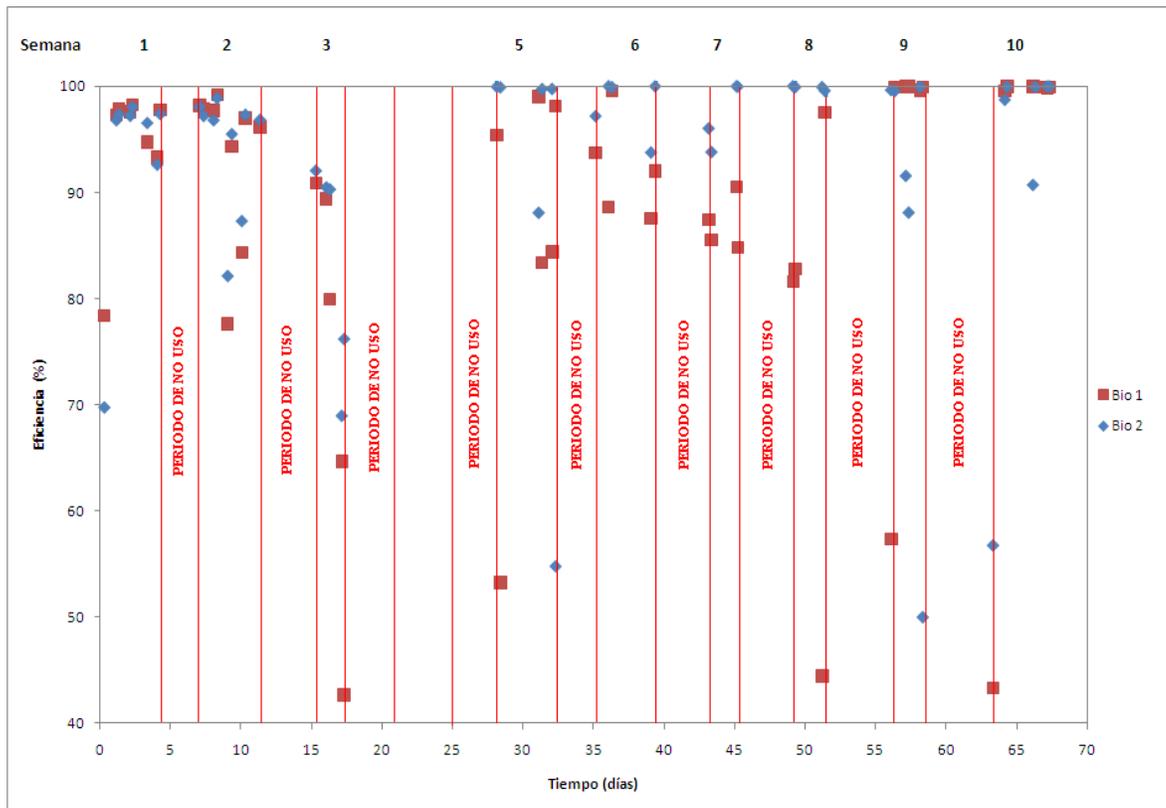
Lo anterior ocasiona que el alcohol isoamílico al tener menor biodegradabilidad sea consumido en el nivel superior, y al estar en mayor proporción que los demás alcoholes, el crecimiento es mayor en este nivel debido a que la disponibilidad de alimento va a ser mayor. Por esta razón para investigaciones posteriores de biofiltración de mezclas es conveniente tomar muestras de la variación de la concentración en cada sección de los lechos, ya que el conocimiento sobre el cambio de la concentración del gas contaminado al interior de los biofiltros permite establecer medidas para el control de las condiciones óptimas de operación.

Otra posible causa de la diferencia en la cantidad de bacterias entre secciones, puede ser la presencia de inhibición microbiológica sectorizada, ya que la parte inferior se secó más rápido, y entre menor contenido de humedad menor es la actividad microbiológica. Esto se pudo presentar porque el aire contaminado no estuvo saturado al 100%, lo que ocasiona la evaporación del agua. Además el agua evaporada en la primera sección puede condensar en la segunda, lo que mantiene más húmeda la parte superior.

Al comparar el crecimiento microbiológico obtenido, con el de la investigación de Achipiz & López (2006), se puede decir que posiblemente los periodos de no uso poco afectaron la cantidad de bacterias, puesto que estos investigadores encontraron que hubo un decrecimiento de bacterias heterotróficas y Pseudomonas, luego de periodos de paro mayores de 4 días. Pero para confirmar esta conclusión, para próximos estudios con periodos de no uso, se sugiere que se realicen pruebas microbiológicas antes y después de parar la alimentación de contaminante.

5.2.5 Eficiencia

En la Figura 13 se muestra la variación de la eficiencia respecto al tiempo, y en la figura 14 se muestra un diagrama de caja y alambres de la eficiencia de cada biofiltro semana por semana.



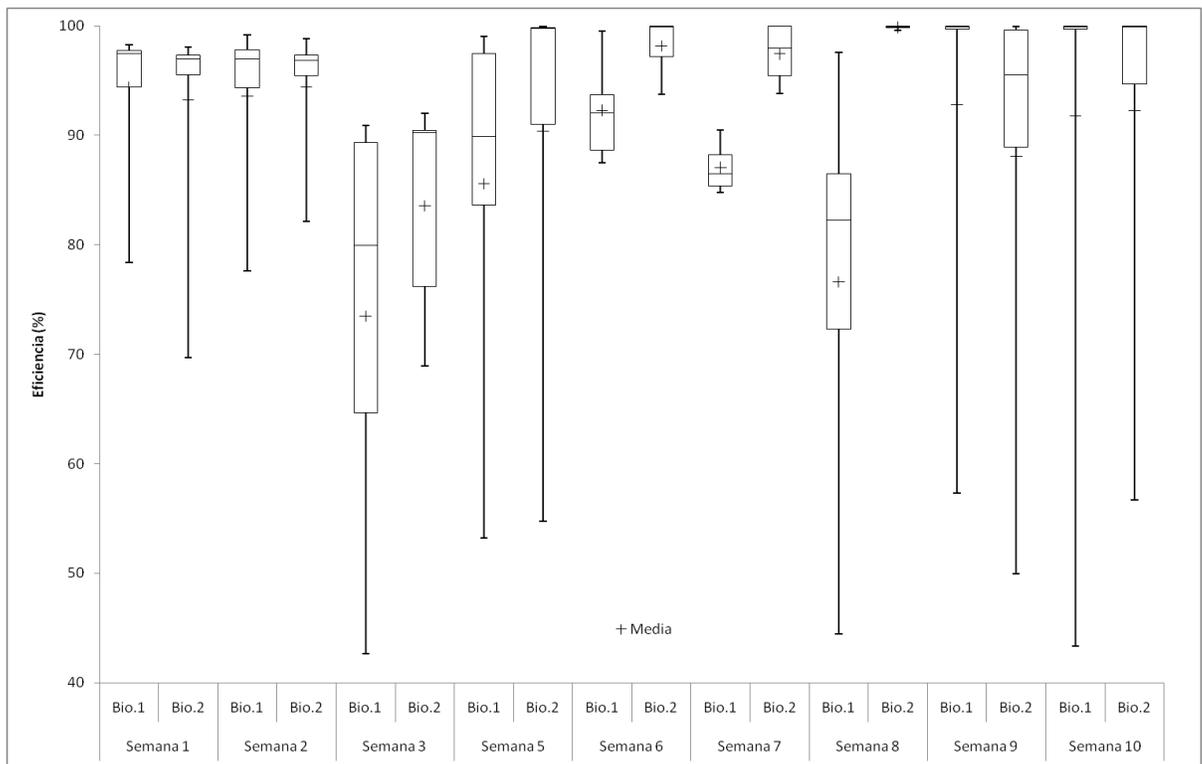


Figura 14. Diagrama de cajas y alambres de la eficiencia de remoción

La Figura 14 demuestra que no hubo reaclimatación de los lechos luego de los periodos de no uso, ya que Ef no tuvo una tendencia hacia un valor. Esto es algo desfavorable si se piensa aumentar la duración de los periodos de no uso, ya que entre más largo es el periodo de no alimentación de contaminante, mayor es la fluctuación de la Ef.

Sin embargo los valores de la eficiencia de remoción variaron desde 40 a 99 %, encontrándose que el 85,19 y 88,89 % de los datos presentaron eficiencias de remoción superiores al 80 % para el biofiltro de compost y compost inoculado, respectivamente. Esto sumado al hecho de que no se excedió el límite de exposición permitido por la OSHA para una exposición de alcohol isoamilico durante 8 horas ($0,36 \text{ g/m}^3$) (Cía. Química, 2005), permite asegurar que esta tecnología es óptima para tratar corrientes con poca concentración de este compuesto bajo las condiciones de experimentación de esta investigación.

Los valores más bajos para la eficiencia correspondieron a las muestras donde la Ce es muy pequeña, lo cual es algo contradictorio si se piensa que entre menor Ce, menor es Cs. Una posible explicación de este comportamiento pueden ser las interacciones de los microorganismos con los alcoholes de la mezcla, puesto que la concentración, biodegradabilidad y estructura molecular de estos compuestos pueden ocasionar aumentos o disminuciones en la tasa de remoción de alcohol isomilico. Estas interacciones incluyen cometabolismo, donde un compuesto ayuda en el aumento de la degradación de otro; inhibición cruzada, en la cual una sustancia disminuye la tasa de eliminación (Grant & Long, 2008); ó estratificación vertical (de la que ya se hablo en la sección 5.2.4).

La explicación anterior se sustenta porque cuando Ce de alcohol isoamílico disminuye a valores muy pequeños, la concentración de los otros alcoholes aumenta (hecho que se evidenció durante la caracterización inicial del gas, ver figura 7), lo que contribuye a aumentar las posibles interacciones mencionadas. Por ende en futuras investigaciones se recomienda medir la concentración de todos los componentes de la mezcla.

Al observar las Figuras 8 y 14 se nota que luego de que la eficiencia baja drásticamente, ésta vuelve a aumentar a valores muy altos a pesar de que la Ce aumenta solo un poco. Una posible explicación de esto puede ser que luego de que la concentración de entrada disminuye (que ocasiona la disminución de la eficiencia), los microorganismos se alimentan del sustrato almacenado en la biopelícula, lo que ocasiona de que al aumentar de nuevo la Ce la tasa de difusión aumente rigurosamente y la tasa de remoción pasa a depender de los fenómenos físicos más que de los microbiológicos (Deshusses, 2000). Este último hecho es lo que produce que no exista una tendencia de la concentración de salida en relación a la concentración de entrada.

En la Figura 14 se nota que las semanas 3 a 8 presentan las diferencias más grandes entre los resultados de ambos lechos, semanas en las cuales la Ce tuvo los valores más altos. El 60 % de todos los datos del lecho sin inocular tienen eficiencias más altas que las del otro biofiltro, donde el 9,43 % tienen una eficiencia mayor al 5 %. Con esto se puede estimar de

forma preliminar que el biofiltro de compost tiene una tendencia a ser más eficiente que el de compost inoculado. Sin embargo, para comprobar esto en la sección 4.2.5 se evalúa la capacidad de eliminación, puesto que permite una mejor comparación. La tendencia del lecho sin inocular a presentar aparentemente eficiencias más altas a mayores concentraciones de entrada, puede deberse a que la cantidad de *Pseudomonas* fue en mayor proporción en el biofiltro de compost.

A pesar de que la C_e de las semanas 9 y 10 fue poco variable, la Figura 14 muestra que en ambos biofiltros, estas semanas de operación tienen eficiencia de remoción con los bigotes inferiores más largos. Posiblemente esto se presentó porque el periodo de no uso fue de 5 días antes de iniciar cada una de estas semanas, lo que señala que paros de alimentación de contaminante mayores de 4 días tienden a ser influyentes en el comportamiento de E_f .

Achipiz y López (2006) encontraron que luego de 4 días de paro, el periodo de reaclimatación fue mayor de 6 días, mientras que en este trabajo el tiempo para alcanzar un valor más cercano al promedio luego de 5 días de no uso fue de 8 horas. Esto y el hecho de que en ésta investigación hubo un crecimiento bacteriano permiten deducir que la corriente de aire generada por la bomba de bajo caudal influyó positivamente en la supervivencia de los microorganismos durante los paros.

5.2.6 Capacidad de eliminación

En las Figuras 15 y 16 se observa el comportamiento de la capacidad de eliminación de los biofiltros estudiados. Al observar estas figuras se nota que a medida que la carga másica aumenta, la CE se aleja de la CE ideal (línea de 100 % de E_f), lo cual era el comportamiento esperado según la Figura 2.

Para ninguno de los biofiltros se pudo determinar la carga crítica, punto en el cual aumentos en la carga másica originan que la eficiencia disminuya a valores por debajo de

100 %, lo cual no era el objetivo de esta investigación. Esto no se pudo lograr debido a las fluctuaciones de los variables, principalmente a la concentración de entrada.

Al comparar la CE de ambos lechos se puede visualizar que el biofiltro de compost tiene una tendencia más cercana a la línea de 100 % de eficiencia, pero al detallar la Figura 17 se nota que las diferencias son muy pocas comparadas con la alta variabilidad de la concentración de entrada. Por lo tanto se concluye que el efecto de inocular el compost con el lodo de la empresa no influye en la remoción de contaminante. Una causa posible pueden ser problemas de adaptación al ambiente de los lechos por parte de los microorganismos del lodo activado, lo cual se infiere por el poco crecimiento bacteriano del biofiltro con compost inoculado en relación al biofiltro sin inocular.

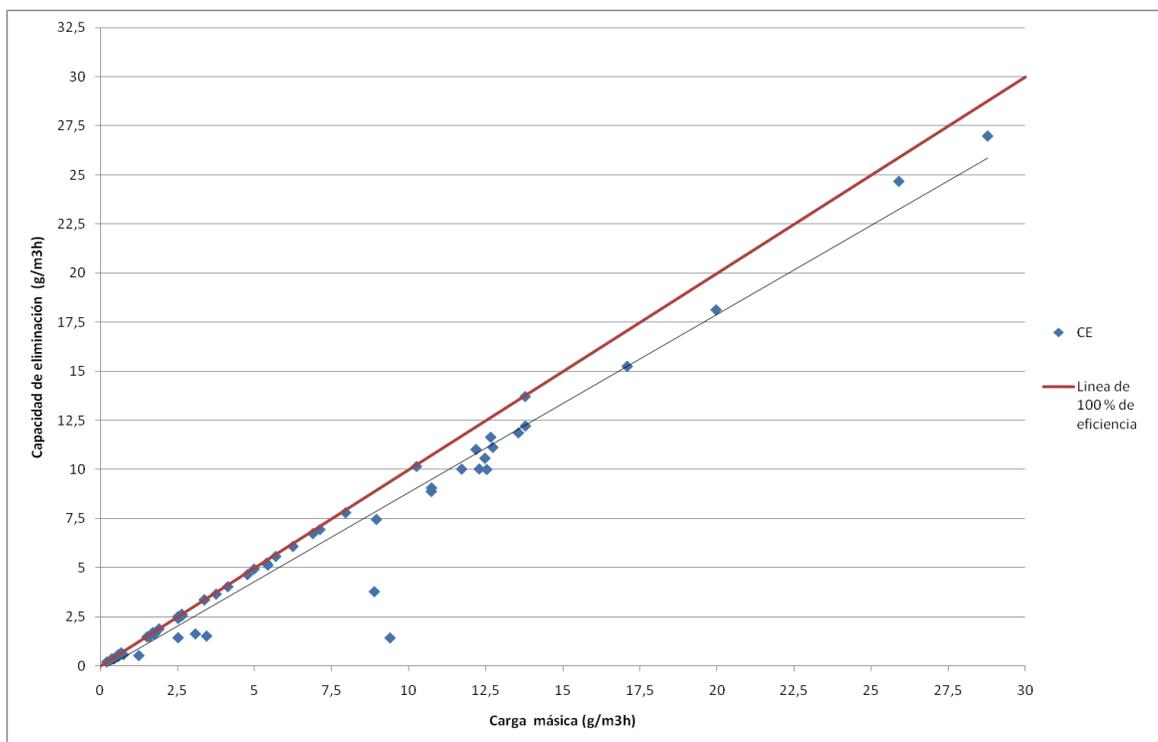


Figura 15. Capacidad de eliminación del biofiltro de compost inoculado

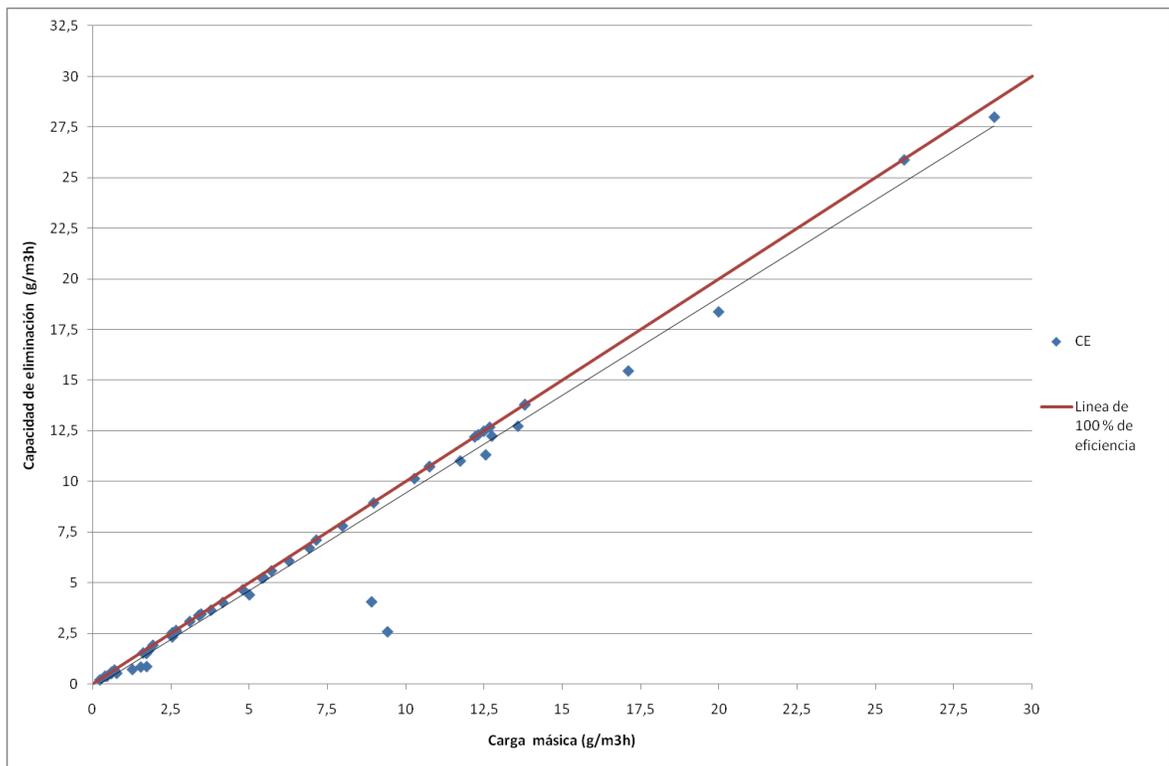


Figura 16. Capacidad de eliminación del biofiltro de compost

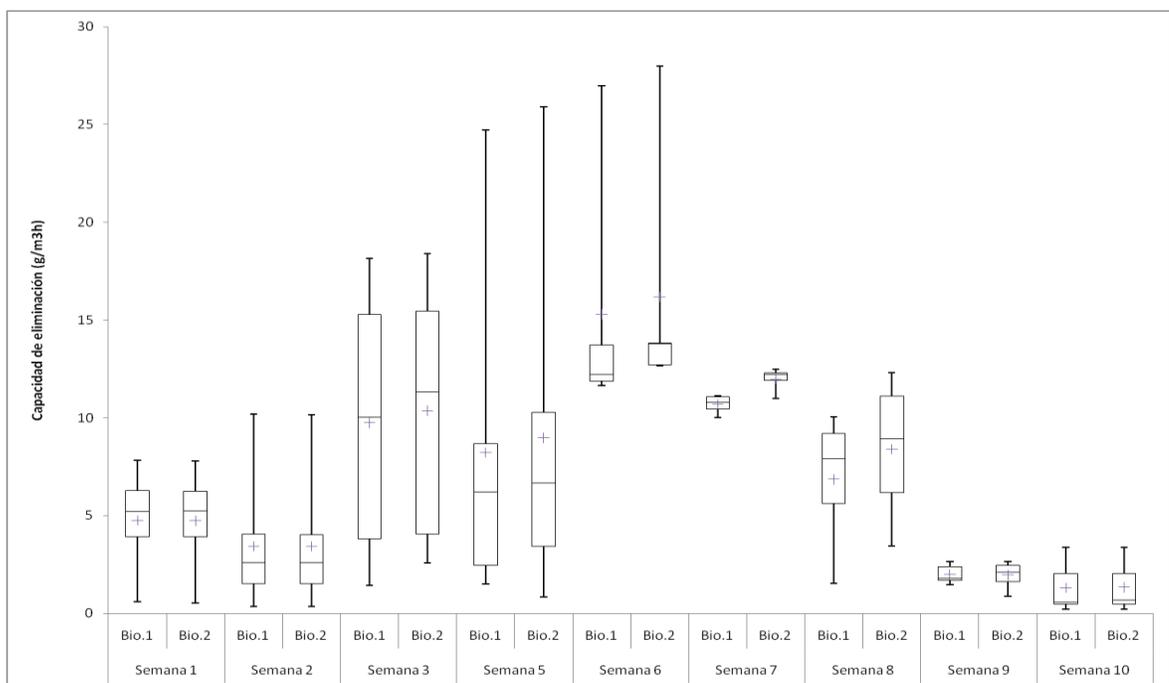


Figura 17. Diagrama de cajas y alambres de la capacidad de eliminación

6. CONCLUSIONES

Durante toda la investigación se tuvieron en cuenta las fluctuaciones del caudal, temperatura y presión de la corriente de aire como factores predominantes en el diseño y operación de la planta piloto. Esto permitió disminuir la variabilidad de las condiciones de experimentación, ya que los valores de la temperatura, presión y caudal de entrada a los biofiltros son similares a los del flujo de aire, puesto que es el componente en mayor proporción en la mezcla gas contaminante - aire (1:50 en volumen). Por lo tanto el sistema de biofiltración tuvo un control eficiente de estas variables, lo que condujo a tener una visión más clara de la influencia de la concentración de entrada y los periodos de no uso sobre el comportamiento de los lechos.

Los cambios en la remoción de alcohol isoamílico fueron menos sensibles a los periodos de no uso cortos (menores de dos días) que a la variación de la concentración de entrada. Esto produjo que se observaran rangos de concentración de salida para ciertos rangos de concentración de entrada. Para periodos de no uso mayores de 5 días se notó una ligera tendencia de la concentración de salida a salirse del rango.

En general, el comportamiento de la dispersión de concentración de salida fue similar para ambos biofiltros, por lo tanto el efecto de inocular el compost con el lodo de la empresa no influye en la remoción de contaminante. Sin embargo se notó que el biofiltro inoculado tiene una ligera tendencia a ser menos eficiente durante las fluctuaciones más grandes de la concentración de entrada de los biofiltros. Por ende se recomienda que en estudios posteriores se aumente el flujo de gas contaminante al mezclador para aumentar la concentración de entrada, y de esta manera visualizar si a mayores cargas la diferencia de eficiencias entre los lechos se hace mayor.

El pH del biofiltro de compost inoculado disminuyó tres veces más que el de compost sin inocular, lo que indica que el segundo tuvo más capacidad buffer y un ambiente más apto para los microorganismos. Por ende, un seguimiento más continuo del pH para futuras investigaciones permitirá establecer la influencia de esta variable en la remoción del contaminante.

Como se manejó un gas contaminante con varios componentes y hubo un mayor crecimiento microbiano en la parte superior de los lechos, es muy probable que se haya presentado estratificación vertical, donde en comparación con los otros contaminantes, el alcohol isoamílico al ser menos biodegradable y al estar en mayor proporción pudo tener más remoción en el sector superior. Sin embargo para corroborar esta hipótesis, en estudios posteriores se recomienda evaluar la eficiencia de cada sección por separado. De esta manera se puede determinar si es necesario aumentar la altura efectiva del lecho para tener eficiencias más altas respecto a este alcohol.

Al final de la fase experimental para ambos biofiltros se notó que hubo un crecimiento en la población de *Pseudomonas* (un orden de magnitud) y en la de bacterias heterotróficas (menos de un orden de magnitud), lo que permitió confirmar que los biofiltros tuvieron actividad biológica. Por ende el soplador de bajo caudal influyó positivamente en la supervivencia de los microorganismos, puesto que permitió mantener en condiciones aerobias el interior de los biofiltros durante los periodos de intermitencia.

Ambos lechos son aptos para tratar vapores de alcohol isoamílico en las mismas condiciones de operación del experimento, ya que a pesar de que hubo periodos de no uso y fluctuaciones de la concentración de entrada, más del 80% de los datos recolectados señalan eficiencias de remoción por encima del 80 % . Adicionalmente ninguno de los biofiltros emitió vapores con concentración mayor a $0,36 \text{ g/m}^3$ (Concentración máxima permitida en el aire).

Teniendo en cuenta que esta investigación es una primera exploración para biofiltros con periodos de no uso y concentración variable, se sugiere realizar una investigación posterior con un diseño experimental que permita evaluar estadísticamente cuál efecto es más influyente, los periodos de no uso o la variabilidad de la concentración de entrada. Además, para tener un mejor análisis de las condiciones de operación de los biofiltros, se propone:

- Monitorear con más frecuencia el pH, la humedad y la cantidad de microorganismos, primordialmente antes y después de los periodos de no uso, para así conocer la influencia de estos periodos sobre estas variables.
- Medir la variación de los demás alcoholes, para conocer cual es su influencia en la remoción de alcohol isoamílico.
- Usar medidores electrónicos para la humedad y el pH. De esta manera no se tendría que retirar partes del lecho y se evitan caminos preferenciales del flujo gaseoso.
- Adaptar un cromatógrafo a las líneas de las corrientes que se quieran analizar. Esto permite una respuesta más rápida, que en ocasiones es necesaria, puesto que reduce el riesgo de contaminación y escape de las muestras almacenadas.
- Tomar muestras de los lechos antes y después de los periodos de no uso, con el fin de determinar el comportamiento de los biofiltros durante la intermitencia.

ANEXOS

ANEXO A. CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL GAS

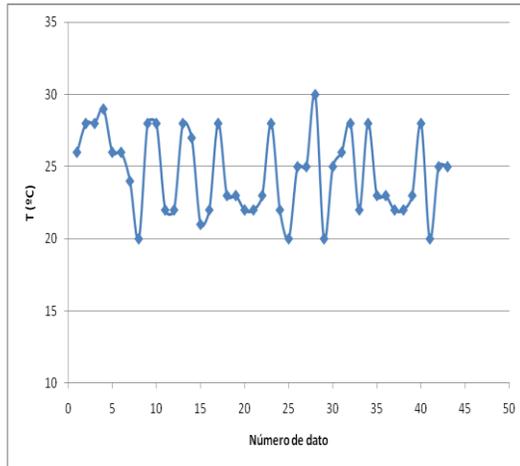


Figura A-1. Variación de la temperatura

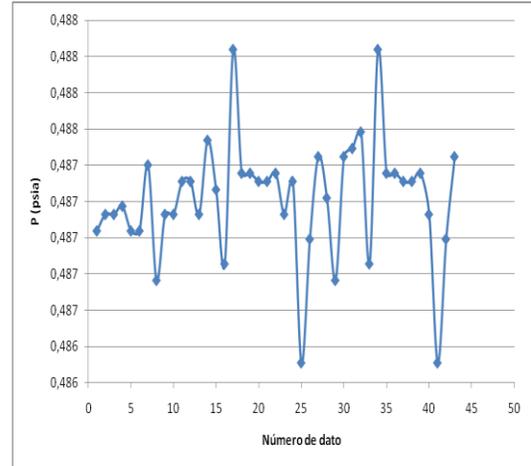


Figura A-2. Variación de la presión

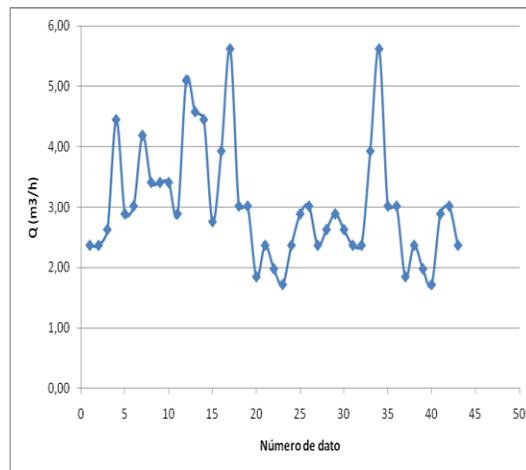


Figura A-3. Variación del caudal

Los datos recolectados durante la etapa de caracterización se encuentran en la siguiente tabla, donde T, P, Q y M.G. son la temperatura, presión, caudal y número de muestra gaseosa, respectivamente.

Tabla A-1. Datos recolectados durante la caracterización inicial del gas

Fecha	Hora	T (°C)	P (psia)	Q (m3/h)	# de dato	M.G.	Concentración (g/m3)			
							A.I.	Isobut.	Prop.	Etanol
15/06/2010	02:00 p.m.	26	0,487	2,37	1	1	1,7	0,0353	0,0216	0,1492
	04:00 p.m.	28	0,487	2,37	2	2	1,532	0,0288	0,0148	0,1833
16/06/2010	09:00 a.m.	28	0,487	2,63	3	3	1,665	0,0884	0,0571	0,9561
	10:00 a.m.	29	0,487	4,45	4	----	----	----	----	----
	11:00 a.m.	26	0,487	2,89	5	4	1,884	0,0387	0,0346	0,1739
	12:00 p.m.	26	0,487	3,02	6	----	----	----	----	----
	01:00 p.m.	24	0,487	4,19	7	5	1,332	0,0032	0,0181	0,0581
17/06/2010	09:00 a.m.	20	0,487	3,41	8	6	2,84	0,1103	0,0817	0,5925
	10:00 a.m.	28	0,487	3,41	9	----	----	----	----	----
	11:00 a.m.	28	0,487	3,41	10	7	1,753	0,0412	0,0265	0,1435
	12:00 p.m.	22	0,487	2,89	11	----	----	----	----	----
	01:30 p.m.	22	0,487	5,10	12	8	6,579	0,8283	0,9832	0,5031
	02:30 p.m.	28	0,487	4,58	13	----	----	----	----	----
	03:30 p.m.	27	0,488	4,45	14	9	1,162	0,0254	0,0159	0,369
21/06/2010	04:30 p.m.	21	0,487	2,76	15	----	----	----	----	----
	09:00 a.m.	22	0,487	3,93	16	----	----	----	----	----
	11:00 a.m.	28	0,488	5,61	17	10	1,543	0,0098	0,0233	0,0125
	12:00 p.m.	23	0,487	3,02	18	----	----	----	----	----
	1.00 p.m.	23	0,487	3,02	19	11	4,882	0,553	0,1869	0,7315
	01:30 p.m.	22	0,487	1,85	20	----	----	----	----	----
	02:30 p.m.	22	0,487	2,37	21	12	1,276	0,0975	0,0789	0,1009
	03:30 p.m.	23	0,487	1,98	22	----	----	----	----	----
22/06/2010	04:30 p.m.	28	0,487	1,72	23	13	6,328	0,8398	0,9794	0,1145
	05:30 p.m.	22	0,487	2,37	24	----	----	----	----	----
	09:00 a.m.	20	0,486	2,89	25	----	----	----	----	----
	10:00 a.m.	25	0,487	3,02	26	14	2,816	0,144	0,1631	0,9571
	11:00 a.m.	25	0,487	2,37	27	----	----	----	----	----
	12:00 p.m.	30	0,487	2,63	28	15	6,782	0,5697	0,1874	2,742
	01:30 p.m.	20	0,487	2,89	29	----	----	----	----	----
28/06/2010	02:30 p.m.	25	0,487	2,63	30	16	0,055	0,0083	0,0029	0,0042
	03:30 p.m.	26	0,487	2,37	31	----	----	----	----	----
	04:30 p.m.	28	0,488	2,37	32	17	6,039	0,6445	0,1005	1,5492
	08:00 a.m.	22	0,487	3,93	33	----	----	----	----	----
	09:00 a.m.	28	0,488	5,61	34	18	2,482	0,2812	0,1274	0,223
	10:00 a.m.	23	0,487	3,02	35	----	----	----	----	----
29/06/2010	11:00 a.m.	23	0,487	3,02	36	19	2,685	0,2767	0,1623	0,2088
	12:00 p.m.	22	0,487	1,85	37	----	----	----	----	----
	01:00 p.m.	22	0,487	2,37	38	20	8,133	0,9868	0,2596	0,8868
	08:30 a.m.	23	0,487	1,98	39	----	----	----	----	----
	09:30 a.m.	28	0,487	1,72	40	21	2,514	0,1908	0,1941	0,1392
29/06/2010	11:30 a.m.	20	0,486	2,89	41	22	0,018	0,0016	0,0037	0,0034
	1.00 p.m.	25	0,487	3,02	42	----	----	----	----	----
	02:00 p.m.	25	0,487	2,37	43	23	4,44	0,5042	0,3938	0,6989

ANEXO B. GRANULOMETRÍA DEL COMPOST USADO

Tabla B- 1. Distribución de diámetro de partícula del compost usado.

Malla	Abertura del tamiz (mm)	% Material Retenido	% Acumulado
4	4,699	22,3	22,3
8	2,3622	19,15	41,45
16	0,9906	51,67	93,07
20	0,84	2,83	95,9
Fondo	-	4,03	100

ANEXO C. CURVAS DE PÉRDIDA DE HÚMEDAD

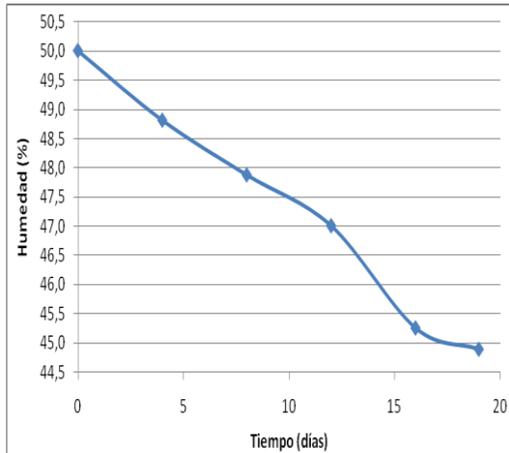


Figura C-1. Curva de secado de la sección inferior del biofiltro con compost.

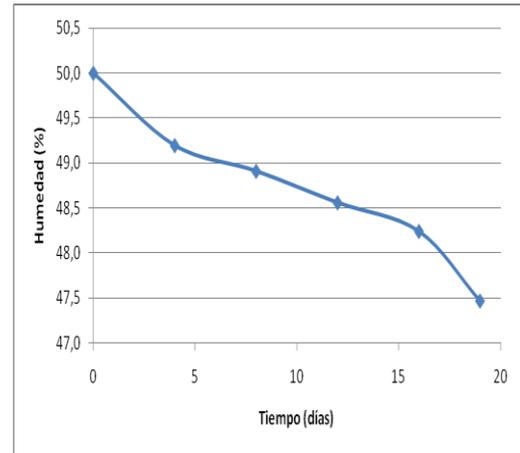


Figura C-2. Curva de secado de la sección superior del biofiltro con compost.

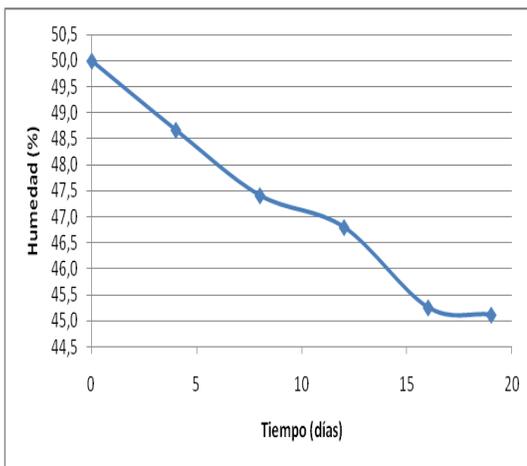


Figura C-3. Curva de secado de la sección inferior del biofiltro con compost inoculado con lodo activado.

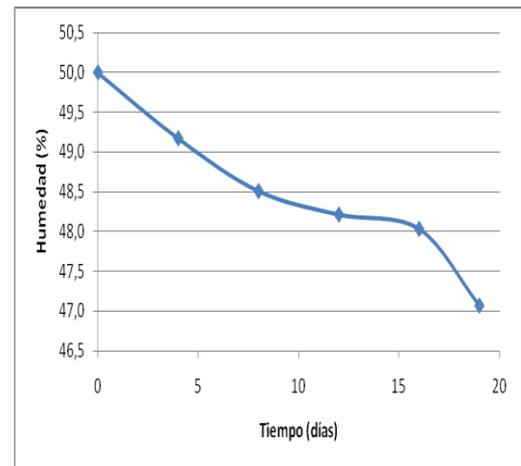


Figura C-4. Curva de secado de la sección superior del biofiltro con compost inoculado con lodo activado.

ANEXO D. RESULTADOS DE LA FASE EXPERIMENTAL

Tabla D-1. Datos de temperatura, presión y caudal de las corrientes de la planta

Semana	Dia	Fecha	Hora	Tiempo (días)	Muestra Gaseosa (#)	Percolados Bio. 1 (mL)	Percolados Bio. 2 (mL)	Riego	Gas			Aire			Biofiltro Compost+ Lodos				Biofiltro Compost				
									Q (m ³ /h)	T (°C)	P (psia)	Q (m ³ /h)	T (°C)	P (psia)	Entrada		Salida		Entrada		Salida		
															T (°C)	P (psia)	T (°C)	P (psia)	T (°C)	P (psia)	T (°C)	P (psia)	
1	1	24/01/2011	10:00 a.m.	0.063	1	-----	-----	x	0.035	26	12.66	2.41	25	14.26	24	12.31	26	12.28	24	12.34	25.5	12.30	
			12:00 p.m.	0.146	-----				0.035	26	12.64	2.41	25	14.26	25.5	12.30	26	12.28	25.5	12.33	27	12.30	
			02:00 p.m.	0.229	-----				0.035	27	12.64	2.41	26	14.26	25.5	12.30	26.5	12.28	25.5	12.33	27	12.30	
	2	25/01/2011	04:00 p.m.	0.313	2	100	125	-----	-----	0.035	28	12.64	2.41	26	14.26	25.5	12.29	26.5	12.29	25.5	12.33	26.5	12.28
			12:30 p.m.	1.167	3					0.035	27	12.64	2.41	25	14.26	25	12.30	26	12.28	25	12.33	26	12.31
			02:00 p.m.	1.229	-----					0.035	26.5	12.66	2.41	26	14.26	25.5	12.29	26.5	12.28	25.5	12.32	26.5	12.29
	3	26/01/2011	05:00 p.m.	1.354	4	105	110	-----	-----	0.035	25	12.66	2.41	24	14.26	24	12.29	25	12.28	24	12.32	25	12.29
			12:00 p.m.	2.146	5					0.035	26.5	12.62	2.41	26	14.26	25	12.29	26	12.28	25	12.32	26	12.28
			02:00 p.m.	2.229	-----					0.035	26.5	12.68	2.41	26	14.26	25.5	12.29	26.5	12.28	25.5	12.32	27	12.29
	4	27/01/2011	04:00 p.m.	2.313	6	110	90	-----	-----	0.035	24	12.66	2.41	23.5	14.26	23.5	12.29	24.5	12.28	23.5	12.33	24	12.29
			05:00 p.m.	3.354	7					0.069	25	12.72	2.68	25	14.76	25	12.30	26	12.28	24	12.33	26	12.29
			10:00 a.m.	4.063	8					0.017	24	12.54	2.20	23	13.26	24	12.29	25	12.28	24	12.32	25	12.29
	5	28/01/2011	12:00 p.m.	4.146	-----	90	105	x	-----	0.035	24.5	12.64	2.41	23.5	13.86	23.5	12.30	24	12.28	23.5	12.32	24	12.29
			03:00 p.m.	4.271	9					0.035	25.5	12.62	2.20	24	14.06	24	12.32	25	12.27	24	12.31	22	12.29
			-----	-----	-----					-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
F. S. 1	6	29/01/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
	7	30/01/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
2	8	31/01/2011	10:00 a.m.	7.063	10	120	95	-----	-----	0.035	25.5	12.64	2.68	24	14.76	23.5	12.30	24.5	12.28	23.5	12.32	24	12.29
			12:00 p.m.	7.146	-----					0.035	26	12.68	2.41	25	14.26	24.5	12.32	25.5	12.29	24.5	12.34	25.5	12.31
			03:00 p.m.	7.271	-----					0.035	25.5	12.66	2.41	27	14.26	26.5	12.29	27.5	12.28	26.5	12.32	27.5	12.29
	9	01/02/2011	05:00 p.m.	7.354	11	200	200	x	-----	0.035	26	12.64	2.41	25	14.26	24.5	12.30	25.5	12.29	24.5	12.32	25.5	12.28
			10:00 a.m.	8.063	12					0.035	26	12.60	2.41	25	14.76	24.5	12.31	25.5	12.28	24.5	12.32	25.5	12.29
			12:00 p.m.	8.146	-----					0.035	26	12.62	2.41	25	14.76	24.5	12.31	25.5	12.27	24.5	12.32	25.5	12.28
	10	02/02/2011	02:00 p.m.	8.229	-----	180	200	-----	-----	0.035	27	12.64	2.41	26	14.26	25.5	12.31	26.5	12.28	25.5	12.32	26.5	12.30
			04:00 p.m.	8.313	13					0.035	26	12.66	2.41	26	14.26	25.5	12.32	26	12.30	25	12.34	26	12.31
			10:00 a.m.	9.063	14					0.035	27	12.66	2.41	26	14.26	25	12.32	26	12.30	25	12.34	26	12.31
	11	03/02/2011	03:00 p.m.	9.271	-----	250	150	-----	-----	0.035	29	12.60	2.41	27	14.26	26	12.30	27.5	12.28	26	12.32	27.5	12.29
			05:00 p.m.	9.354	15					0.035	26	12.64	2.41	25.5	14.26	24.5	12.30	25.5	12.28	24.5	12.33	26	12.30
			10:00 a.m.	10.063	16					0.035	26	12.66	2.41	26	14.26	26	12.31	26.5	12.29	26	12.33	26.5	12.30
	12	04/02/2011	12:00 p.m.	10.146	-----	250	150	-----	-----	0.035	26	12.66	2.41	27	14.26	26.5	12.32	27	12.30	26.5	12.33	27	12.30
			02:00 p.m.	10.229	-----					0.035	28	12.66	2.41	27	14.26	26.5	12.32	28	12.30	26.5	12.33	28	12.30
			04:00 p.m.	10.313	17					0.035	26	12.64	2.41	26	14.76	25.5	12.31	26.5	12.29	25.5	12.35	26	12.30
F. S. 2	13	05/02/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
	14	06/02/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
	15	07/02/2011	02:30 p.m.	14.250	19	300	300	-----	-----	0.035	23	12.64	2.41	22	14.26	22	12.34	23	12.29	22	12.35	23	12.30
05:00 p.m.	14.354	20	0.035	21.5	12.68					2.41	21	14.26	21	12.35	21.5	12.29	21	12.35	21.5	12.30			
10:00 a.m.	15.063	21	0.035	23	12.64					2.41	22	14.26	21.5	12.32	22	12.30	21.5	12.34	22	12.31			
16	08/02/2011	12:00 p.m.	15.146	-----	200	300	x	-----	0.035	24	12.66	2.41	23	14.76	22	12.32	23	12.29	22	12.33	23	12.30	
		02:00 p.m.	15.229	-----					0.035	24.5	12.66	2.41	24	14.76	22	12.32	24	12.29	22	12.33	23.5	12.30	
		04:00 p.m.	15.313	22					0.035	25	12.62	2.41	24.5	14.26	24	12.32	24.5	12.29	24	12.32	24.5	12.30	
17	09/02/2011	10:00 a.m.	16.063	23	126	100	-----	-----	0.035	23.5	12.64	2.56	22	14.76	21.5	12.32	22	12.29	21.5	12.32	22	12.30	
		12:00 p.m.	16.146	-----					0.035	24.5	12.66	2.41	23	14.76	23	12.31	24	12.29	23	12.32	24	12.30	
		02:00 p.m.	16.229	-----					0.035	25	12.66	2.41	24	14.76	23.5	12.31	24.5	12.28	23.5	12.32	24.5	12.30	
18	10/02/2011	04:00 p.m.	16.313	24	30	48	-----	-----	0.035	24.5	12.64	2.41	23	14.26	23	12.31	25	12.29	23	12.32	25	12.30	
		12:00 p.m.	17.146	25					0.035	24.5	12.62	2.68	24	14.76	23	12.36	23.5	12.29	23	12.34	23.5	12.30	
		02:00 p.m.	17.229	-----					0.035	25	12.66	2.41	24	14.76	23	12.32	24	12.29	23	12.32	24	12.29	
19	11/02/2011	04:00 p.m.	17.313	26	318	285	-----	-----	0.035	22.5	12.64	2.41	22	13.86	22	12.34	22.5	12.29	22	12.32	23.5	12.30	
		10:00 a.m.	18.063	-----					0.035	24	12.66	2.41	22	14.26	22	12.31	23	12.29	22	12.32	24	12.30	
		12:00 p.m.	18.146	27					0.035	24	12.80	2.41	23	14.26	23	12.31	23.5	12.29	23	12.32	24	12.30	
F. S. 3	20	12/02/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
	21	13/02/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
	22	14/02/2011	10:00 a.m.	21.021	29	210	177	-----	-----	0.035	22	12.72	2.41	22	14.26	21	12.39	23.5	12.28	21	12.34	23	12.30
23	15/02/2011	02:00 p.m.	25.229	-----	307	375	x	-----	0.035	26	12.68	2.50	25	14.26	24	12.33	25	12.31	24	12.36	25	12.32	
		04:00 p.m.	25.313	30					0.035	28	12.68	2.36	26	14.26	25.5	12.36	27.5	12.31	25.5	12.36	27	12.32	
		12:00 p.m.	28.146	31					0.035	26	12.76	2.41	25	14.76	25.5	12.38	26.1	12.28	25.5	12.35	26	12.30	
24	16/02/2011	02:00 p.m.	28.229	-----	302	385	-----	-----	0.035	27.5	12.80	2.41	27	14.26	27	12.38	29	12.29	27	12.34	28.5	12.30	
		04:00 p.m.	28.313	32					0.035	26	12.72	2.41	26	14.76	25	12.37	26	12.28	25	12.34	26	12.30	
		10:00 a.m.	29.063	33					0.035	23	12.70	2.41	22	14.76	22	12.35	24	12.29	22	12.36	24	12.30	
25	17/02/2011	12:00 p.m.	29.146	-----	145	95	-----	-----	0.035	25.5	12.68	2.41	24	14.76	24.5	12.35	25	12.29	24.5	12.36			

5	29	21/02/2011	11:00 a.m.	30,146	35	140	78	x	0,035	25	12,68	2,41	25,5	14,76	24	12,33	24,5	12,29	24	12,34	24,5	12,30		
			01:00 p.m.	30,229	-----				0,035	24	12,68	2,41	22	14,76	22,5	12,35	22	12,30	22,5	12,35	22	12,30		
			03:00 p.m.	30,313	-----				0,035	27	12,68	2,41	25	14,76	23,5	12,34	24,5	12,29	23,5	12,34	24	12,31		
			05:00 p.m.	30,354	36				0,035	23	12,68	2,41	22	14,76	22,5	12,33	23,5	12,29	22,5	12,34	23	12,30		
	30	22/02/2011	-----	-----	-----	243	313	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----		
	31	23/02/2011	-----	-----	-----	110	68	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----		
	32	24/02/2011	11:10 a.m.	31,111	37	35	25	-----	0,035	22	12,68	2,41	21	14,76	21	12,33	22,5	12,29	21	12,33	22	12,30		
			02:00 p.m.	31,229	-----				0,035	23,5	12,72	2,41	21,5	14,76	21	12,34	22,5	12,29	21	12,34	22	12,29		
			04:00 p.m.	31,313	-----				0,035	22,5	12,70	2,41	21	14,76	21	12,34	22	12,29	20	12,33	21,5	12,30		
			05:00 p.m.	31,354	38				0,035	21,5	12,68	2,41	20,5	14,76	20	12,34	22	12,29	20	12,34	20,5	12,30		
	33	25/02/2011	10:00 a.m.	32,063	39	70	55	-----	0,035	22	12,72	2,41	22	14,76	21,5	12,33	22	12,29	21,5	12,33	21	12,30		
			12:00 p.m.	32,146	-----				0,035	24	12,72	2,41	22	14,76	22	12,33	23	12,28	22	12,32	22,5	12,30		
02:00 p.m.			32,229	-----	0,035				25,5	12,72	2,41	24	14,76	23,5	12,34	24,5	12,29	23,5	12,34	24	12,30			
04:00 p.m.			32,313	40	0,035				28	12,74	2,41	27	14,76	26	12,34	27	12,28	26	12,34	27	12,30			
F. S. 5	34	26/02/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----			
	35	27/02/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----			
6	36	28/02/2011	12:00 p.m.	35,146	41	103	55	x	0,035	28	12,72	2,41	26	14,76	25	12,33	25	12,29	25	12,34	25	12,30		
			02:00 p.m.	35,229	-----				0,035	28	12,72	2,41	26	14,76	25	12,34	25	12,29	25	12,34	25	12,30		
	37	01/03/2011	10:00 a.m.	36,063	42	490	445	-----	0,035	27	12,70	2,41	22	14,76	21	12,39	22	12,29	21	12,34	22	12,30		
			12:00 p.m.	36,146	-----				0,035	28	12,66	2,41	22	14,76	21	12,39	22	12,29	21	12,35	12	12,30		
			02:00 p.m.	36,229	-----				0,035	29	12,68	2,41	22,5	14,76	21,5	12,39	21,5	12,29	21,5	12,35	21,5	12,30		
			04:00 p.m.	36,313	43				0,035	28	12,66	2,41	19,5	14,76	21,5	12,37	22,5	12,29	21,5	12,34	22,5	12,30		
	38	02/03/2011	-----	-----	-----	130	85	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----			
	39	03/03/2011	-----	-----	-----	58	50	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----			
	40	04/03/2011	10:30 a.m.	37,083	44	60	47	-----	0,035	20,5	12,76	2,41	19,5	14,76	19	12,37	19,5	12,29	19,5	12,34	20	12,30		
			01:30 p.m.	37,208	-----				0,035	22	12,72	2,41	20	14,76	19,5	12,37	20	12,30	19,5	12,35	20	12,31		
			03:30 p.m.	37,292	-----				0,035	23	12,68	2,41	21	14,26	21	12,37	22	12,30	21	12,35	22	12,31		
			05:30 p.m.	37,375	45				0,035	23	12,72	2,41	21	14,76	20	12,36	21	12,30	20	12,34	21	12,30		
F. S. 6	41	05/03/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----			
	42	06/03/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----			
7	43	07/03/2011	-----	-----	-----	412	150	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----			
			44	08/03/2011	12:30 p.m.	44,167	46	97	59	x	0,035	22,5	12,68	2,41	21	14,76	22	12,35	22	12,29	22	12,34	22,1	12,30
					2:00 p.m.	44,229	-----				0,035	24	12,67	2,32	22,5	14,76	22,5	12,35	23	12,29	22,5	12,34	23	12,30
					04:15 p.m.	44,325	-----				0,035	22,5	12,66	2,32	22	14,76	22	12,35	23,5	12,29	22	12,34	22,1	12,30
	05:15 p.m.	44,365			47	0,035	23				12,68	2,32	22	14,76	22	12,35	23,5	12,29	22	12,34	23	12,30		
	45	09/03/2011	-----	-----	-----	83	54	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----				
46	10/03/2011	12:00 p.m.	45,146	48	816	750	-----	0,035	22,5	12,80	2,32	20,5	14,76	20,5	12,46	22	12,29	20,5	12,35	21	12,30			
		02:00 p.m.	45,229	49				0,035	24	12,76	2,32	22	14,76	21,5	12,46	23,5	12,29	21,5	12,35	22	12,30			
47	11/03/2011	-----	-----	-----	167	180	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----				
F. S. 7	48	12/03/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----			
	49	13/03/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----			
8	50	14/03/2011	12:00 p.m.	52,146	50	270	130	x	0,035	27	12,68	2,32	25,5	14,76	25	12,31	26	12,28	25	12,36	25,5	12,30		
			02:00 p.m.	52,229	-----				0,035	26	12,83	2,28	26	14,76	25,5	12,52	26,5	12,29	26	12,36	26	12,30		
			04:00 p.m.	52,313	51				0,035	27	12,87	2,28	26	14,76	26	12,52	26,5	12,30	26	12,37	26,5	12,31		
	51	15/03/2011	-----	-----	-----	750	1135	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----				
	52	16/03/2011	01:30 p.m.	53,208	52	450	750	-----	0,035	27,5	12,80	2,32	27	14,76	26	12,51	27,5	12,29	26	12,36	27	12,30		
			03:30 p.m.	53,292	-----				0,035	27,5	12,80	2,32	26,5	14,76	26	12,50	26	12,29	26	12,36	26,5	12,30		
05:00 p.m.			53,396	53	0,035				26,5	12,80	2,28	25	14,26	24,5	12,50	26	12,29	24,5	12,35	25	12,30			
53	17/03/2011	-----	-----	-----	286	210	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----					
54	18/03/2011	-----	-----	-----	95	85	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----				
F. S. 8	55	19/03/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----			
	56	20/03/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----			
9	57	21/03/2011	10:30 a.m.	58,104	54	250	130	x	0,035	25	12,83	2,32	24	14,76	24	12,54	26,5	12,28	24	12,41	25	12,30		
			12:45 p.m.	58,198	-----				0,035	27	12,83	2,32	26	14,76	25,5	12,50	28	12,28	25,5	12,40	27	12,30		
			02:25 p.m.	58,268	-----				0,035	27	12,99	2,28	26	14,76	25,5	12,63	27	12,29	25,5	12,40	27	12,31		
			04:25 p.m.	58,351	55				0,035	24,5	12,99	2,28	23	14,76	24	12,63	24,5	12,29	24	12,40	25	12,33		
	58	22/03/2011	11:30 a.m.	59,146	56	93	81	-----	0,035	27	12,87	2,28	26	14,76	25,5	12,63	38	12,29	25,5	12,37	25	12,29		
			01:30 p.m.	59,229	-----				0,035	28	12,91	2,32	27	14,76	26	12,57	37	12,29	26	12,37	25	12,29		
			03:15 p.m.	59,302	-----				0,035	28	12,87	2,32	27	14,76	26,5	12,57	36	12,29	26,5	12,37	25	12,29		
			04:30 p.m.	59,354	57				0,035	28	12,87	2,32	26	14,76	20	12,57	35	12,29	26	12,37	25	12,29		
	59	23/03/2011	12:00 p.m.	60,167	58	63	54	-----	0,035	26,5	12,95	2,41	25	15,26	25	12,55	35	12,29	25	12,36	25	12,29		
			01:30 p.m.	60,229	-----				0,035	27	12,99	2,32	25	14,76	25	12,59	38	12,29	25	12,36	25	12,29		
			03:00 p.m.	60,292	-----				0,035	25,5	12,87	2,32	24	14,76	24	12,57	40	12,30	24	12,36	30	12,29		
			04:30 p.m.	60,354	59				0,035	26	12,70	2,32	24	14,76	24	12,57	38	12,29	24	12,36	28	12,29		
60	24/03/2011	-----	-----	-----	150	450	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----					
61	25/03/2011	-----	-----	-----	127	95	-----																	

Tabla D-2. Datos de concentración, eficiencia y capacidad de eliminación de los biofiltros

Semana	Día	Fecha	Hora	Tiempo (días)	Muestra Gaseosa (#)	C Entrada (g/m3)	C Salida Bio. 1 (g/m3)	C Salida Bio. 2 (g/m3)	E Bio. 1 (%)	E Bio. 2 (%)	CM (g/m3h)	CE Bio. 1 (g/m3h)	CE Bio. 2 (g/m3h)	Observaciones
1	1	24/01/2011	10:00 a.m.	0,063	1	0,002468	0,005445	0,007913	120,60	-220,59	0,074	-0,090	-0,164	Inicio de la fase experimental
			04:00 p.m.	0,313	2	0,024987	0,005408	0,007567	78,36	69,72	0,753	0,589	0,524	
	2	25/01/2011	12:30 p.m.	1,167	3	0,179303	0,004895	0,005779	97,27	96,78	5,401	5,247	5,220	Mantenimiento caldera hasta las 10:30 a.m.
			05:00 p.m.	1,354	4	0,229195	0,004790	0,006064	97,91	97,35	6,903	6,751	6,713	
	3	26/01/2011	12:00 p.m.	2,146	5	0,207653	0,004962	0,005798	97,61	97,21	6,255	6,098	6,073	Paro por compresor hasta las 10:00 a.m.
04:00 p.m.				2,313	6	0,264292	0,004611	0,005174	98,26	98,04	7,961	7,812	7,795	
4	27/01/2011	05:00 p.m.	3,354	7	0,180603	0,009483	0,006271	94,75	96,53	5,440	5,148	5,245	Paro por compresor hasta las 3:00 a.m.	
			10:00 a.m.	4,063	8	0,058594	0,003930	0,004341	93,29	92,59	1,765	1,645		1,632
5	28/01/2011	03:00 p.m.	4,271	9	0,158691	0,003599	0,004161	97,73	97,38	4,780	4,666	4,649	-----	
			-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
F. S. 1	6	29/01/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Fin de semana
			-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
2	8	31/01/2011	10:00 a.m.	7,063	10	0,189083	0,003398	0,003684	98,20	98,05	5,695	5,586	5,578	-----
			05:00 p.m.	7,354	11	0,137459	0,002959	0,003856	97,85	97,19	4,140	4,046	4,019	
	9	01/02/2011	10:00 a.m.	8,063	12	0,124893	0,002837	0,004008	97,73	96,79	3,762	3,672	3,637	-----
			04:00 p.m.	8,313	13	0,340738	0,002823	0,003885	99,17	98,86	10,263	10,166	10,134	
	10	02/02/2011	10:00 a.m.	9,063	14	0,014753	0,003302	0,002639	77,62	82,11	0,444	0,345	0,364	-----
05:00 p.m.			9,354	15	0,053139	0,003024	0,002399	94,31	95,49	1,601	1,508	1,526		
11	03/02/2011	10:00 a.m.	10,063	16	0,019354	0,003028	0,002460	84,35	87,29	0,583	0,491	0,508	-----	
		04:00 p.m.	10,313	17	0,088149	0,002660	0,003271	96,98	97,31	2,655	2,572	2,581		
12	04/02/2011	05:00 p.m.	11,354	18	0,083978	0,003224	0,002661	96,16	96,83	2,529	2,429	2,446	Tubería del aire averiada hasta las 3:30 p.m.	
		-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----		-----
F. S. 2	13	05/02/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Fin de semana
			-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
3	15	07/02/2011	02:30 p.m.	14,250	19	0,087897	0,092668	0,070079	-5,43	20,27	2,647	-0,144	0,536	Bomba aceite caldera averiada hasta las 12:00 p.m.
			05:00 p.m.	14,354	20	0,083943	0,171639	0,089128	-104,47	-6,18	2,528	-2,638	-0,156	
	16	08/02/2011	10:00 a.m.	15,063	21	56,505823	0,083516	0,093836	99,85	99,83	1701,983	1697,422	1697,112	-----
			04:00 p.m.	15,313	22	0,663372	0,060527	0,052874	90,88	92,03	19,981	18,136	18,366	
	17	09/02/2011	10:00 a.m.	16,063	23	0,567590	0,060336	0,054146	89,37	90,46	17,096	15,260	15,447	-----
04:00 p.m.			16,313	24	0,416381	0,083573	0,040549	79,93	90,26	12,542	10,012	11,307		
18	10/02/2011	12:00 p.m.	17,146	25	0,195274	0,069047	0,060670	64,64	68,93	5,882	3,797	4,049	Problemas con la bomba de vacío hasta las 10:00 p.m.	
		04:00 p.m.	17,313	26	0,112226	0,064367	0,026743	42,65	76,17	3,380	1,440	2,572		
19	11/02/2011	12:00 p.m.	18,146	27	0,007177	0,074012	0,010815	-931,18	-50,68	0,216	-2,011	-0,109	-----	
		04:00 p.m.	18,313	28	0,000885	0,050831	1,012319	-5643,86	-114291,65	0,027	-1,503	-30,428		
F. S. 3	20	12/02/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Fin de Semana
			-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
4	21	14/02/2011	10:00 a.m.	21,021	29	0,000302	0,109908	0,785941	-36235,48	-259732,38	0,009	-3,297	-23,635	Paro a las 12:00 p.m. por destilación de ésteres
			04:00 p.m.	25,313	30	0,090163	0,001664	0,032616	98,15	63,83	2,716	2,662	1,731	
	23	15/02/2011	12:00 p.m.	28,146	31	0,001116	0,052716	0,045567	-4625,05	-3984,33	0,034	-1,552	-1,337	Problemas con Bomba aceite caldera hasta 10:30 a.m.
			04:00 p.m.	28,313	32	0,018354	0,047688	0,000190	-159,82	98,97	0,553	-0,882	0,546	
	25	17/02/2011	10:00 a.m.	29,063	33	0,002091	0,047612	0,000025	-2177,25	98,80	0,063	-1,369	0,062	-----
04:00 p.m.			29,313	34	0,001001	0,053054	0,018789	-5198,31	-1776,39	0,030	-1,566	-0,535		
F. S. 4	26	18/02/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Paro por destilación de ésteres
			-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
28	17/02/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Fin de semana
		-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	

5	29	21/02/2011	11:00 a.m	30,146	35	0,860199	0,039876	0,000403	95,36	99,95	25,910	24,679	25,866	-----	
			05:00 p.m	30,354	36	0,102543	0,047965	0,000109	53,22	99,89	3,089	1,642	3,082	-----	
	30	22/02/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Paro por destilación de ésteres
	31	23/02/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Paro por destilación de ésteres
	32	24/02/2011	11:10 a.m	31,111	37	0,165700	0,001620	0,019784	99,02	88,06	4,991	4,942	4,395	-----	Problemas con bomba de vacío hasta 9:30 a.m.
		05:00 p.m	31,354	38	0,297528	0,049485	0,000782	83,37	99,74	8,962	7,471	8,938	-----	-----	
33	25/02/2011	10:00 a.m	32,063	39	0,356894	0,055657	0,000924	84,41	99,74	10,750	9,073	10,722	-----	-----	
		04:00 p.m	32,313	40	0,050547	0,000944	0,022877	98,13	54,74	1,523	1,494	0,833	-----	-----	
F. S. 5	34	26/02/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Fin de semana
	35	27/02/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
6	36	28/02/2011	12:00 p.m	35,146	41	0,955839	0,059954	0,026958	93,73	97,18	28,790	26,984	27,978	-----	Paro por problemas con bomba despues de las 2:00 p.m.
			10:00 a.m	36,063	42	0,458013	0,052105	0,000005	88,62	100,00	13,796	12,226	13,795	-----	-----
	37	01/03/2011	04:00 p.m	36,313	43	0,457744	0,002038	0,000453	99,55	99,90	13,787	13,726	13,774	-----	-----
	38	02/03/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Paro por destilación de ésteres
	39	03/03/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Paro por destilación de ésteres
40	04/03/2011	10:30 a.m	37,083	44	0,450490	0,056197	0,028166	87,53	93,75	13,569	11,876	12,721	-----	-----	
		05:30 p.m	37,375	45	0,420602	0,033576	0,000027	92,02	99,99	12,669	11,657	12,668	-----	-----	
F. S. 6	41	05/03/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Fin de semana
	42	06/03/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
	43	07/03/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Paro por destilación de esteress
7	44	08/03/2011	12:30 p.m	44,167	46	0,422937	0,053156	0,016835	87,43	96,02	12,739	11,138	12,232	-----	-----
			05:15 p.m	44,365	47	0,389397	0,056354	0,024174	85,53	93,79	11,729	10,031	11,001	-----	-----
	45	09/03/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Paro por destilación de esteress
	46	10/03/2011	12:00 p.m	45,146	48	0,404763	0,038522	0,000022	90,48	99,99	12,192	11,031	12,191	-----	Paro a las 2:30 p.m. por destilación de esteress
			02:00 p.m	45,229	49	0,414344	0,062942	0,000197	84,81	99,95	12,480	10,584	12,474	-----	-----
47	11/03/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Paro por destilación de esteress	
F. S. 7	48	12/03/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Fin de Semana
	49	13/03/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
8	50	14/03/2011	12:00 p.m	52,146	50	0,408297	0,075036	0,000015	81,62	100,00	12,298	10,038	12,298	-----	-----
			04:00 p.m	52,313	51	0,356627	0,061340	0,000267	82,80	99,93	10,742	8,894	10,734	-----	-----
	51	15/03/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Paro por destilación de ésteres
	52	16/03/2011	01:30 p.m	53,208	52	0,114618	0,063696	0,000098	44,43	99,91	3,452	1,534	3,449	-----	-----
			05:00 p.m	53,396	53	0,236685	0,005797	0,001010	97,55	99,57	7,129	6,954	7,099	-----	-----
53	17/03/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Paro por destilación de ésteres	
54	18/03/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Paro por destilación de ésteres	
F. S. 8	55	19/03/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Fin de semana
	56	20/03/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
9	57	21/03/2011	10:30 a.m	58,104	54	0,083978	0,035833	0,000301	57,33	99,64	2,529	1,450	2,520	-----	-----
			04:25 p.m	58,351	55	0,087897	0,000057	0,000411	99,94	99,53	2,647	2,646	2,635	-----	-----
	58	22/03/2011	11:30 a.m	59,146	56	0,083943	0,000038	0,007098	99,95	91,54	2,528	2,527	2,315	-----	-----
			04:30 p.m	59,354	57	0,056506	0,000023	0,006733	99,96	88,08	1,702	1,701	1,499	-----	-----
	59	23/03/2011	12:00 p.m	60,167	58	0,063372	0,000254	0,000043	99,60	99,93	1,909	1,901	1,908	-----	-----
		04:30 p.m	60,354	59	0,056759	0,000044	0,028411	99,92	49,95	1,710	1,708	0,854	-----	-----	
60	24/03/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Paro por mantenimiento caldera	
61	25/03/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Paro por mantenimiento caldera	
F. S. 9	62	26/03/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Fin de semana
	63	27/03/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
10	64	28/03/2011	04:00 p.m	65,333	60	0,041638	0,023591	0,018025	43,34	56,71	1,254	0,544	0,711	-----	Paro por mantenimiento caldera hasta las 11:00 a.m.
			12:00 p.m	67,167	61	0,019527	0,000082	0,000250	99,58	98,72	0,588	0,586	0,581	-----	-----
	65	29/03/2011	04:00 p.m	67,333	62	0,112226	0,000018	0,000071	99,98	99,94	3,380	3,380	3,378	-----	-----
	66	30/03/2011	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Paro por mantenimiento caldera
	67	31/03/2011	12:00 a.m	70,167	63	0,007177	0,000001	0,000668	99,99	90,69	0,216	0,216	0,196	-----	-----
		04:00 p.m	70,333	64	0,112226	0,000059	0,000088	99,95	99,92	3,380	3,379	3,378	-----	-----	
68	01/04/2011	12:00 p.m	71,167	65	0,012600	0,000021	0,000003	99,84	99,98	0,380	0,379	0,379	-----	-----	
		04:30 p.m	71,354	66	0,022643	0,000027	0,000003	99,88	99,99	0,682	0,681	0,682	-----	Fin de la fase experimental	

Tabla D-3. Estadísticos de temperatura, presión y caudal de las corrientes de la planta

Corriente		Variable	Promedio	Mediana	Des. Est.	CV	Mínimo	Máximo	Rango
Gas		Q (m3/h)	0,035	0,035	0,004	0,104	0,017	0,069	0,052
		T (°C)	25	26	2	0,082	21	31	11
		P (psia)	12,76	12,68	0,18	0,014	12,54	13,38	0,83
Aire		Q (m3/h)	2,381	2,406	0,075	0,032	2,196	2,678	0,482
		T (°C)	24	24	2	0,089	20	29	10
		P (psia)	14,59	14,76	0,33	0,022	13,26	15,26	2
Bio. 1	Entrada	T (°C)	24	24	2	0,086	19	28	9
		P (psia)	12,32	12,32	0,03	0,003	12,21	12,42	0,21
	Salida	T (°C)	25	25	2	0,082	20	30	11
		P (psia)	12,29	12,29	0,01	0,001	12,27	12,31	0,04
		ΔT (°C)	1,01	1,00	0,98	0,976	-2,00	4,00	6,00
		ΔP (psia)	-0,03	-0,03	0,03	-0,942	-0,13	0,07	0,20
Bio. 2	Entrada	T (°C)	24	24	2	0,086	20	29	9
		P (psia)	12,34	12,34	0,02	0,002	12,31	12,42	0,11
	Salida	T (°C)	24	25	2	0,094	12	30	18
		P (psia)	12,30	12,30	0,01	0,001	12,28	12,33	0,05
		ΔT (°C)	0,59	1,00	1,62	2,744	-9,00	6,00	15,00
		ΔP (psia)	-0,05	-0,04	0,02	-0,471	-0,13	-0,02	0,12

Tabla D-4. Estadísticos de concentración, eficiencia y capacidad de eliminación de los biofiltros

Variable	Semana	Promedio	Mediana	Des. Est.	CV	Mínimo	Máximo	Rango
Cs Bio. 1 (g/m3)	1	0,0052	0,0048	0,0018	0,3497	0,0036	0,0095	0,0059
	2	0,0030	0,0030	0,0002	0,0800	0,0027	0,0034	0,0007
	3	0,0676	0,0644	0,0096	0,1424	0,0603	0,0836	0,0232
	5	0,0326	0,0439	0,0248	0,7600	0,0009	0,0557	0,0547
	6	0,0408	0,0521	0,0239	0,5864	0,0020	0,0600	0,0579
	7	0,0527	0,0548	0,0103	0,1957	0,0385	0,0629	0,0244
	8	0,0515	0,0625	0,0310	0,6029	0,0058	0,0750	0,0692
	9	0,0060	0,0001	0,0146	2,4158	0,0000	0,0358	0,0358
	10	0,0034	0,0000	0,0089	2,6189	0,0000	0,0236	0,0236
	Cs Bio. 2 (g/m3)	1	0,0056	0,0058	0,0011	0,1944	0,0042	0,0076
2		0,0031	0,0027	0,0007	0,2329	0,0024	0,0040	0,0016
3		0,0470	0,0529	0,0135	0,2863	0,0267	0,0607	0,0339
5		0,0075	0,0009	0,0108	1,4408	0,0001	0,0229	0,0228
6		0,0111	0,0005	0,0150	1,3501	0,0000	0,0282	0,0282
7		0,0103	0,0085	0,0122	1,1788	0,0000	0,0242	0,0242
8		0,0003	0,0002	0,0005	1,3080	0,0000	0,0010	0,0010
9		0,0072	0,0036	0,0109	1,5223	0,0000	0,0284	0,0284
10		0,0027	0,0001	0,0067	2,4722	0,0000	0,0180	0,0180

ANEXO E. CURVAS DE CALIBRACIÓN DE LOS MEDIDORES DE CAUDAL

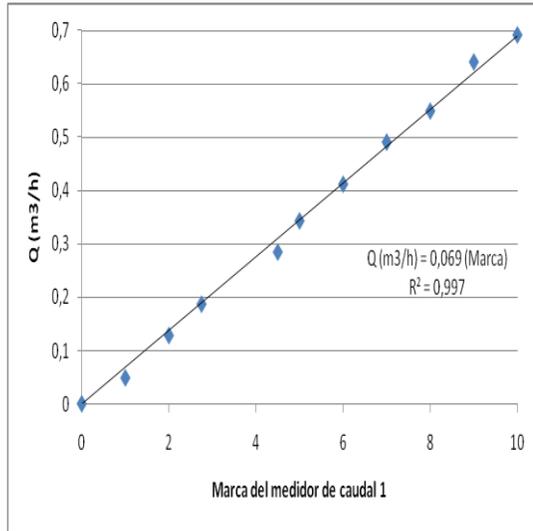


Figura E-1. Curva de calibración medidor de caudal 1.

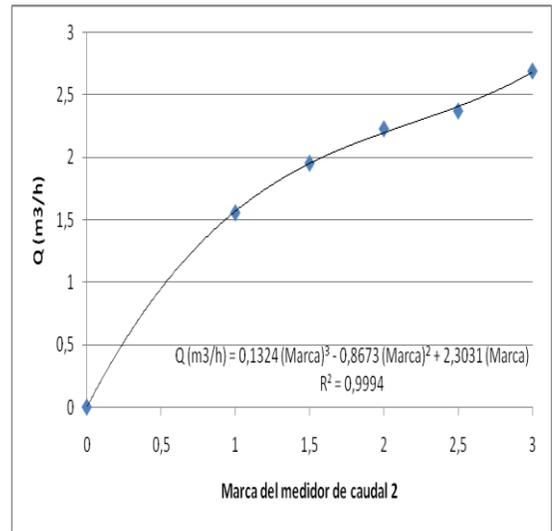


Figura E-2. Curva de calibración medidor de caudal 2.

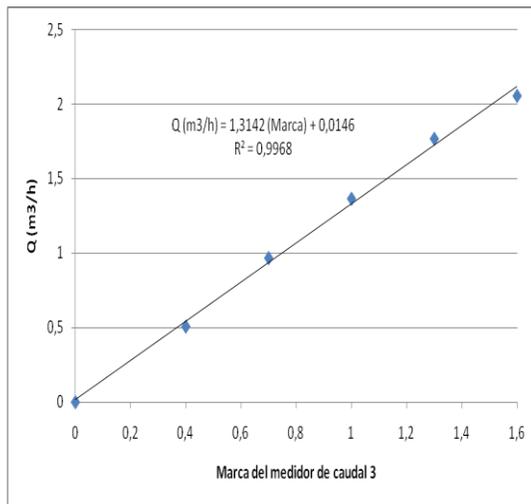


Figura E-3. Curva de calibración medidor de caudal 3.

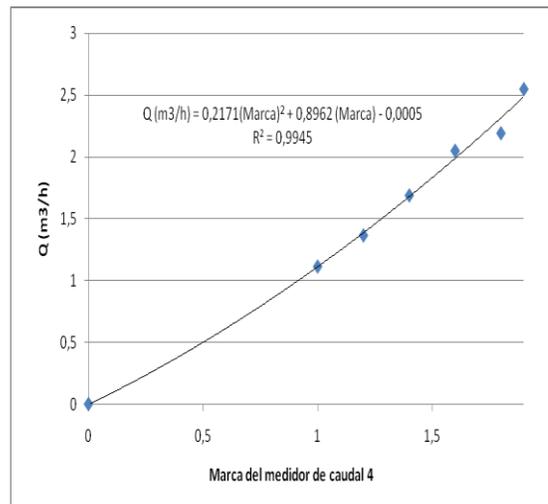


Figura E-4. Curva de calibración medidor de caudal 4.

ANEXO F. MANUAL DE OPERACIÓN DE LA PLANTA PILOTO

Para tener un correcto funcionamiento de la planta piloto de biofiltración se deben seguir los siguientes pasos:

1. Para dar inicio con la operación se debe observar que los destiladores y la bomba vacío de la empresa estén en funcionamiento.
2. Verificar que todo el montaje esté en perfectas condiciones antes de empezar, como por ejemplo, observar que toda la red de tuberías y mangueras estén debidamente conectadas, los biofiltros estén sellados, los tapones de los humidificadores y el mezclador estén asegurados, los otros equipos estén en buen estado y conectados a sus respectivos toma corrientes, etc.
3. Verificar que las válvulas 1, 5, 7, 9 y 10 estén abiertas, y que las válvulas 2, 3, 4, 6, 8, 11 y 12 estén cerradas.
4. Observar si el nivel de agua de los humidificadores está en el rango adecuado, sino es así, agregar agua por medio de un embudo hasta alcanzar éste rango de nivel, el cual se encuentra marcado como máximo y mínimo en un costado. Por lo general la adición de agua se hace cada 4 días.
5. Apagar el interruptor del aireador, abrir la válvula 6 y cerrar la válvula 7. Con esto se deja de agregar el aire auxiliar transportado por el soplador de bajo caudal, y se completa el camino de tuberías para alimentar la mezcla aire-gas contaminante a los biofiltros.
6. Agregar la cantidad de agua respectiva a cada una de las partes de los lechos a través de las duchas de los biofiltros. Ésta cantidad y los días que se debe realizar éste procedimiento están dados por el estudio realizado de las curvas de secado.
7. Extraer los percolados de los biofiltros a través de la apertura de las llaves 11 y 12. Estas sustancias se recogen en envases y se envían a la planta de tratamiento de aguas

residuales de la empresa porque son contaminantes del agua, ya que causan eutrofización.

8. Abrir la llave 4 lentamente para evitar que la presión del aire aumente dentro del sistema de biofiltración y cause el derramamiento de los fluidos manométricos. Después de 10 minutos la presión del aire comprimido se estabiliza y se puede abrir totalmente la llave 4 y cerrar la llave 5. Esta sirve de control de la cantidad de aire que se va a inyectar a los biofiltros mientras se estabiliza la presión del aire comprimido, pues al disminuir la presión disminuye el flujo másico. Por lo general después de la estabilización del flujo de aire el compresor mantiene su presión en 40 psig. El set point del compresor es 60 psig.
9. Abrir las válvulas 2 y 3 y cerrar la válvula 1, para permitir el paso del gas contaminante a través del sistema de biofiltración. Con la observación del manómetro 1 y el medidor de caudal 1 se regulan las aperturas de las dos primeras. Esto se hace para controlar la cantidad de gas a mezclar con el aire comprimido.
10. Abrir la llave 8 y regular la abertura de las válvulas 9 y 10., con el fin de controlar el flujo de mezcla aire-gas contaminante que entra a cada biofiltro. Para realizar este control se visualizan los medidores de caudal 3 y 4 y los manómetros 3 y 4.
11. Controlar cada cierto tiempo que las condiciones establecidas por el balance de materia se cumplan para el correcto funcionamiento de los biofiltros.
12. Una vez los destiladores hayan dejado de funcionar y la bomba de vacío esté apagada, se cierran las llaves 2, 3, 4 y 8; y se abren las válvulas 1 y 5.
13. Para evitar que el número de los microorganismos de los lechos disminuya notablemente se agrega aire por medio del aireador, motivo por el que se cierra la llave 6 y se abre la llave 7 antes de prender este equipo.

ANEXO G. REGISTRO FOTOGRÁFICO



Figura G-1. Planta piloto para la biofiltración de vapores de alcohol isoamílico.



Figura G-2. Bomba de vacío.



Figura G-3. Compresor de aire.



Figura G-4. Regulador de presión



Figura G-5. Bomba de aire de bajo caudal.



Figura G-6. Lugar de muestreo a la salida de los biofiltros y sistema de riego de los lechos



Figura G-7. Sistema de recolección condensados de las tuberías



Figura G-8. Bocatoma de los gases producto de la destilación



Figura G-9. Medidor húmedo de gases



Figura G-10. Primera etapa del sistema de biofiltración



Figura G-11. Segunda etapa del sistema de biofiltración

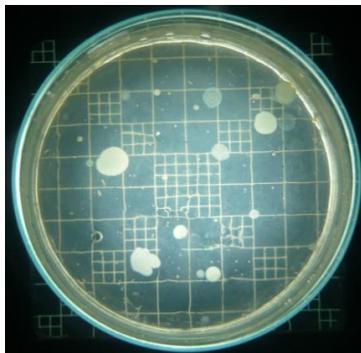


Figura G-12. Siembra microbiológica



Figura G-13. Vial sellado y jeringa para gases

BIBLIOGRAFÍA

1. ACHIPIZ, A.; LÓPEZ, M.; “Remoción de vapores de alcohol isoamílico de corrientes gaseosas residuales mediante biofiltración”; Tesis de grado en Ingeniería Química, Universidad del Valle; Cali, Colombia, 2006.
2. AGUAYO, P.; “Optimización de un sistema de tratamiento biológico de aire tipo airlift para la eliminación de vapores contaminados con hidrocarburos volátiles”; Tesis en Licenciatura en ciencias de la ingeniería, Universidad Católica de Temuco; Temuco, México, 2005.
3. ALTAMAR, A.; “Tratamiento biológico de compuestos orgánicos volátiles: dimensionamiento de un sistema de biofiltración de gases”; En: AVANCES Investigación en ingeniería, No. 6; 2007.
4. CÁRDENAS, B.; GUTIERREZ, V.; MARTÍNEZ M.; REVAH, S.; “Tratamiento biológico de compuestos orgánicos volátiles de fuentes fijas”; INE-SEMARNAT; México, 2003.
5. CARO, J.; GALLEGO, F.; MONTERO, R.; “Metodologías para la evaluación de riesgos originados por compuestos orgánicos volátiles (VOC's) en ambientes laborales”; En: Seguridad y medio ambiente, No. 113; Enero de 2009.
6. CAVASA S.A.; Informes. [En línea] [Colombia] [visitado en 2009]; Disponible en internet: <URL:http:// http://www.cavasa.com.co/informes.php>.

7. CÍA. QUÍMICA Y AGROQUÍMICA ARGENTINA S.A.; Hoja de seguridad del alcohol isoamílico. [En línea] [Argentina]: 2005 [visitado en 2009]; Disponible en internet: <URL:http://www.ciaquimica.com.ar/ALCOHOL_AMILICO.pdf>.
8. DESHUSSES, M.; “Biotrickling filters for air pollution control”; University of California; California, 2000.
9. DESHUSSES, M.; SAKUMA, S.; “Comparison of different packing materials for the biofiltration of air toxics”; En: Journal air & waste management association, Vol. 56, pág. 1567-1575; Noviembre de 2006.
10. ETCHARREN, P.; “Diseño de un sistema de biofiltración para la eliminación de olores en la fábrica “Lubascher y Krause” Temuco”; Tesis en Licenciatura en ciencias de la ingeniería, Universidad Católica de Temuco; Temuco, México, 2005.
11. ELIAS, A.; GALLASTEGUI, C.; ROJO, N.; “Utilización de lodos de EDAR como inóculo de biofiltros para el tratamiento de olores”; Universidad el país Vasco; 2010.
12. GRANT, W.; LONG, P.; “Microbiología ambiental”; Editorial Acripa S.A.; España, 2008.
13. HÉRNADEZ, S.; “Biofiltración de malos olores y su posible aplicación a los olores de interiores”; Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental, CENICA; México, 2001.
14. IDEAM; [En línea] [Colombia]: 2012 [visitado en 2012]; Disponible en internet: <URL: <http://institucional.ideam.gov.co/jsp/loader.jsf?lServicio=Busquedas.html>>

15. INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA; Biofiltración. [En línea] [México]: 2007 [visitado en 2011]; Disponible en internet: <URL:<http://www.ine.gob.mx/ueaje/publicaciones/libros/396/biofiltra.html>>.
16. JIMENEZ, E.; VILLEGAS, A. “Diseño de un sistema de biofiltración para la remoción de estireno”; En: Revista EIA, No. 3, pág. 9-20; Junio de 2005.
17. KENNES, C.; VEIGA, N.; “Fungal biocatalysts in the biofiltration of VOC-polluted air”; En: Journal of biotechnology, Vol. 113, pág. 305-319; 2004.
18. NADAL, S.; “Tratamiento de olores en infraestructuras ambientales mediante tecnologías avanzadas”; En: Revista Infoenviro, No. 33, pág. 105-177; España
19. PINEDA, R.; THALASSO, F.; “Biofiltración: tratamiento biológico de aire contaminado”; En: Avance y perspectiva, Vol. 21, pág. 325-329; 2002.
20. PIROL, I.; “Tecnologías de depuración de emisiones atmosféricas de COV”; En: Ingeniería química, No. 460, pág. 178-191; Madrid, 2009.
21. SHAREEFDEEN, Z.; SLINGH, A.; “Biotechnology for odor and air pollution control”; Editorial Springer; Berlin, 2005.
22. TREYBAL, R.; “Operaciones de transferencia de masa”, segunda edición; Mc Graw-Hill; 1988.
23. YVES, A.; DUMONT, E.; “Characterization techniques of packing material colonization in a gas of biofiltration”; NRC Research Press; 2009.