



UNIVERSIDAD DEL MAR

Campus Puerto Ángel

Efecto de cambios de composición del efluente a tratar durante la biofiltración de Compuestos Orgánicos Volátiles

T E S I S

Que para obtener el Título Profesional de

INGENIERO AMBIENTAL

Presenta

Martín Eduardo Chan Cruz

Director

DR. AITOR AIZPURU

Puerto Ángel, Oaxaca, México, 2014.



Puerto Ángel, Oaxaca, Noviembre de 2014

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

Después de realizar una revisión detallada de la tesis “*Efecto de cambios de composición del efluente a tratar durante la biofiltración de Compuestos Orgánicos Volátiles*”, presentada por Martín Eduardo Chan Cruz, se considera que cumple con los requisitos de forma y calidad académica necesarios para ser defendida en el examen profesional.

COMISIÓN REVISORA

Dr. Aitor Aizpuru

Director de tesis

Dra. Susana García Ortega

Revisora

Dr. Eustacio Ramírez Fuentes

Revisor

M. en C. Cervando Sánchez Muñoz

Revisor

Dr. Christian E. Hernández Mendoza

Revisor

DEDICATORIA

Con muchísimo amor para:

Mamá

Papá

Ilse Karina

Juan Manuel

¡Son la fuerza de mis días, mi mayor motivación, lo más importante en mi vida!

Mis abuelitos y abuelitas

¡Sé que estarían muy orgullosos, va por ustedes!

Alejandra



AGRADECIMIENTOS

A la Universidad del Mar y a todos los que forman parte de la carrera de Ingeniería Ambiental, por el apoyo brindado a lo largo de cinco años.

Al Dr. Aitor Aizpuru por sus enseñanzas, tiempo dedicado, amistad y apoyo a lo largo de las diferentes fases de la tesis y los años en el programa de tutorías académicas.

A mis revisores de tesis: Dra. Susana García, Dr. Eustacio Ramírez, M. en C. Cervando Sánchez y el Dr. Christian Hernández por sus valiosos comentarios y tiempo dedicado.

A mis padres: Silvia y Martín, que me han guiado desde mis primeros pasos y hasta el día de hoy. Por su amor y apoyo incondicional, por compartir mis éxitos y fracasos, por entender mis errores, por todo lo bueno que son, no me alcanzaría la vida para agradecerles. ¡Los amo!

A mis hermanos: Ilse y Juan, por todo su amor, por el aguante en los momentos difíciles. Por tantos y tantos tiempos de felicidad, sonrisas y juegos. Son los mejores hermanos del mundo. ¡Los amo!

A mis adoradas tías: Rosa, Doris, Patricia, Dulce y mis tíos Ramón, Clemente, Lázaro, Julio y Christian por cuidarme con amor desde niño tanto cariño, por tantas horas de alegría en familia y apoyo. Los quiero mucho.

A mis primos: Julio, José, Juquila, Santiago, Carmen y Juan por crecer conmigo.

A mi tío, el médico Enrique Manuel Chan Manzano, por tenerme presente siempre, por ser un ejemplo para mí y por todo el apoyo brindado desde siempre.

A mi gran compañero y amigo Olmo Fernández, por todos estos años de aventuras y grandes historias compartidas, por compartir los momentos difíciles y porque a pesar de las diferencias culturales e ideológicas supimos crear una entrañable amistad, ¡te quiero carnal!

A Alejandra Honda Merino: Morch, gracias por todo tu apoyo con los datos, por compartir este viaje y ser la mejor compañera, por tanto y tanto amor.

A Ana Isabel, por siempre estar conmigo en las buenas, las malas y las peores. Por su apoyo incondicional, por los estupendos momentos en compañía de Ceci, Don Margarito y Doña Ana, ¡me hacen sentir como en casa!, ¡te quiero hermanita!

A mi gran amigo Carlos López por los estupendos momentos compartidos, por los días de estudio, los días de playa, los martes veraniegos y tantas y tantas aventuras.

A la Maestra Mar Cid por su amistad, por incluirme como un miembro más de su familia, por el apoyo y consejos en todos los sentidos, ¡gracias Mom Cid!

A Anyeli, Bibi, David y toda la familia Angelina Martínez por adoptarme y hacerme sentir como en casa, ¡puro barrio del sol, banda!

A Savilu (Lunita), por hacer mejores los días durante el experimento, por ser esa amiga en la distancia, por los días y noches junto al mar, por estar lista para la aventura siempre.

Al PhD. Gerardo Martínez, profesor y buen amigo, por todos sus consejos, por los buenos momentos compartidos.

A la M. en C. Rocío Gutiérrez, por todas las enseñanzas y consejos, por la motivación extra al comienzo de este sueño.

A Sueyleng, Rene y Arnoldo, por estar al pie del cañón desde hace muchos años, porque me enseñaron que la amistad puede prescindir de la frecuencia.

A Jared, por estar siempre, por ser un amigo incondicional.

A Diana, por brindarme su amistad y apoyo en la ciudad de Oaxaca.

A Italivi (Sirenita), por mostrarme que el mar, puede tener muchas formas y colores, por los días felices en Puerto Escondido y Huatulco.

A Laura Penagos, por ser esa amiga que siempre está al pendiente de mí, por su confianza.

A Rossana por ser esa hermana mayor que la vida me regalo, por sus consejos y cariño.

A Marisol, Maribel, Lacho y Juan por ser los mejores compañeros de viaje y de aventuras, siempre nos volveremos a encontrar.

Al Sr. Javier Ferra y la Sra. Angela por todo su cariño y apoyo desde que era un niño.

A la costa Oaxaqueña por enseñarme las estrellas más bonitas, los azules más transparentes y los mejores atardeceres de mi vida.

A Dalia, JuanMa y el Dr. Germán Enrique por los consejos y buenos momentos.

Al Q. Saúl Ramírez y todo el equipo de Gestión Ambiental Omega por todo el apoyo y confianza en la fase final de este proceso.

Al creador, Dios.

No solo no hubiera sido nada sin ustedes, sino con toda la gente que estuvo a mi alrededor desde el comienzo, algunos siguen hasta hoy. ¡LOS QUIERO MUCHO!

¡GRACIAS TOTALES!

RESUMEN

Efecto de cambios de composición del efluente a tratar durante la biofiltración de Compuestos Orgánicos Volátiles

Palabras clave: Biofiltro, COV, acetato de butilo, acetato de etilo, tolueno, cambios de composición

En el presente trabajo se estudió el tratamiento biológico por biofiltración de acetato de butilo. El biorreactor se operó a co-corriente, es decir, haciendo pasar el flujo de aire de manera descendente. El objetivo fue evaluar la adaptabilidad del biofiltro a los cambios de composición, remplazando temporalmente el sustrato original por acetato de etilo o tolueno.

El biorreactor se operó durante 151 días con acetato de butilo y se obtuvo una capacidad de eliminación mayor a la reportada en la literatura (hasta 554 g.m⁻³.h⁻¹). Posteriormente se cambió el contaminante por acetato de etilo y se operó el biorreactor durante 20 días, en los cuales el sistema se adaptó inmediatamente al nuevo contaminante. Después de este periodo se volvió a suministrar acetato de butilo, pero no se logró alcanzar las tasas de remoción observadas previamente. Esto sugiere que el sistema no es robusto ante el cambio temporal en la naturaleza del contaminante a tratar.

El sistema comenzó a presentar problemas de pérdida de presión debido al crecimiento excesivo de la biomasa. Lo anterior estuvo asociado con una acidificación duradera del medio filtrante y un cambio en la población microbiana. A pesar de los esfuerzos realizados para recuperar la eficiencia del biorreactor mediante la descompactación, el lavado y reempaquetado del soporte microbiano, no se logró obtener una mejoría significativa.

Por último, se volvió a cambiar la composición del sustrato, de acetato de butilo a tolueno, durante 7 días. En este lapso se observó que el biorreactor pudo degradar este contaminante; sin embargo, debido al mal estado del sistema no se operó durante un tiempo suficiente para que se adaptara al cambio.

El contenido orgánico del soporte empleado tuvo un doble efecto sobre el sistema, ya que además de proporcionar los nutrientes esenciales para favorecer el desarrollo de la biopelícula, también limitó el tiempo de vida útil del soporte.

Nomenclatura

ϵ	Grado de vacío (%)
Φ_{real}	Densidad real ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
Φ_{aparente}	Densidad aparente ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
AB	Acetato de butilo
AE	Acetato de etilo
CE	Capacidad de eliminación ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$)
CIT	Carbono inorgánico total
CO	Monóxido de Carbono
COT	Carbono orgánico total
COV	Compuestos orgánicos volátiles
CV	Carga másica volumétrica ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$)
EBRT	Tiempo de residencia en lecho vacío (por las siglas en inglés de Empty Bed Retention Time)
ER	Eficiencia de remoción (%)
FID	Detector de ionización de llama (por las siglas en inglés de Flame Ionization Detector) /
LMPE	Límite máximo permisible de exposición
NH_3	Amoniaco
NOM	Norma oficial mexicana
NO_x	Óxidos de Nitrógeno
PCO_2	Producción de dióxido de carbono ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$)
PDA	Papa dextrosa agar
$\text{PM}_{2.5}$	Partículas sólidas suspendidas de diámetro menor a 10 μm
PM_{10}	Partículas sólidas suspendidas de diámetro menor a 2.5 μm
Q	Caudal total del gas ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales

SO₂	Dióxido de azufre
TCD	Detector de conductividad térmica (por las siglas en inglés de Thermal Conductivity Detector)
UFC	Unidades formadoras de colonias
VR	Volumen del lecho de soporte (m ³)

ÍNDICE GENERAL

Resumen	V
Nomenclatura.....	VII
Índice general	IX
Índice de tablas	XIII
Índice de figuras	XIII
I. INTRODUCCIÓN	1
I.1 Los compuestos orgánicos volátiles	1
I.1.1 Ejemplos de compuestos orgánicos volátiles en industria de pinturas	2
I.1.1.1 Acetato de butilo	3
I.1.1.2 Acetato de etilo	3
I.1.1.3 Tolueno	3
I.2 Tratamiento de emisiones de compuestos orgánicos volátiles	4
I.2.1 Métodos fisicoquímicos de tratamiento.....	5
I.2.2 Métodos biológicos de tratamiento.....	5
I.2.2.1 Biolavador.....	5
I.2.2.2 Biofiltro de lecho escurrido	5
I.2.2.3 Biofiltro.....	6
I.3 Biofiltración	6
I.3.1 Mecanismos de la biofiltración	7
I.3.2 Condiciones de operación de un sistema de biofiltración	8
I.3.2.1 Características del soporte	8
I.3.2.2 Población microbiana	9
I.3.2.3 Parámetros fisicoquímicos	10
a) pH	10
b) Temperatura.....	10
c) Contenido de humedad	11
I.4 Problemas comunes en la biofiltración	11

I.4.1	Caídas de presión.....	11
I.4.2	Tratamiento de efluentes variables.....	12
I.4.2.1	Paros de alimentación.....	12
I.4.2.2	Cambios cuantitativos o cualitativos de composición.....	13
II	ANTECEDENTES.....	14
III	Justificación del estudio.....	16
IV	Hipótesis y objetivos.....	17
IV.1	Hipótesis.....	17
IV.2	Objetivo general.....	17
IV.2.1	Objetivos particulares.....	17
V	MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
V.1	Sistema de biofiltración.....	18
V.1.1	Características del biorreactor.....	19
V.1.2	Características del soporte.....	19
V.1.2.1	Caracterización del soporte.....	20
V.1.3	Inoculación e introducción del soporte.....	21
V.1.4	Generación del aire contaminado.....	21
V.1.5	Medio mineral.....	22
V.2	Técnicas analíticas.....	22
V.2.1	Análisis de la fase gaseosa.....	22
V.2.1.1	Determinación de los compuestos orgánicos volátiles.....	23
V.2.1.2	Determinación de la concentración de CO ₂	23
V.2.2	Mediciones en la fase líquida.....	23
V.2.2.1	Carbono orgánico total.....	24
V.2.2.2	pH del lixiviado.....	24
V.2.3	Mediciones en la fase sólida.....	24
V.2.3.1	Determinación de la biomasa cultivable.....	25
a)	Preparación del medio de cultivo y extracto.....	25
b)	Siembra y conteo.....	25
V.3	Fases experimentales.....	26

V.3.1	Arranque del biorreactor.....	26
V.3.2	Cambios de composición.....	27
a)	Descompactación.....	27
b)	Reempaque con soporte sin inóculo.....	27
c)	Ajuste de pH.....	28
V.4	Estimación del desempeño del biofiltro.....	28
V.4.1	Eficiencia de remoción y capacidad de eliminación.....	28
V.4.2	Producción de CO ₂	29
V.4.3	Mineralización y balance de Carbono.....	29
VI	Resultados y discusión.....	32
VI.1	Monitoreo del biofiltro durante la operación con acetato de butilo.....	32
VI.1.1	Eficiencia al arranque y posterior al aumento de carga.....	32
VI.1.2	Degradación del contaminante a lo largo del lecho filtrante.....	35
VI.1.3	Producción de CO ₂	37
VI.1.4	Efecto de la carga sobre la capacidad de eliminación.....	39
VI.2	Cambios de composición.....	42
VI.2.1	Primer cambio: Seguimiento del biofiltro con acetato de etilo.....	42
VI.2.1.1	Eficiencia del biofiltro.....	42
VI.2.1.2	Degradación del contaminante a lo largo del lecho filtrante.....	45
VI.2.1.3	Producción de CO ₂	47
VI.2.1.4	Efecto de la carga sobre la capacidad de eliminación.....	48
VI.2.2	Regreso al contaminante inicial.....	50
VI.2.2.1	Eficiencia del biofiltro.....	50
VI.2.2.2	Degradación del contaminante a lo largo del lecho filtrante.....	54
VI.2.2.3	Producción de CO ₂	55
VI.2.3	Tercer cambio: seguimiento del biofiltro con tolueno.....	56
VI.2.3.1	Eficiencia del biofiltro y producción de CO ₂	56
a)	<i>Eficiencia del biofiltro</i>	56
b)	<i>Producción de CO₂</i>	60
VI.3	Seguimiento de la biomasa y caídas de presión.....	61

VI.4	Análisis de los lixiviados	63
VI.4.1	Seguimiento global del pH	63
VI.4.2	Seguimiento global del COT	67
VI.5	Balances de carbono	69
VII	Conclusiones y recomendaciones.....	74
VII.1	Conclusiones	74
VII.2	Recomendaciones.....	75
	Referencias bibliográficas.....	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Características de los sistemas de tratamiento biológico de COV.....	6
Tabla 2.- Características del material de empaque.....	20
Tabla 3.- Condiciones operatorias a lo largo del experimento.....	26
Tabla 4.- Ecuaciones estequiométricas y PCO ₂ teóricas por COV utilizado.....	30
Tabla 5.- Referencias con respecto a la biofiltración de AB.....	40
Tabla 6.- Referencias para la biofiltración de acetato de etilo.....	49
Tabla 7.- Referencias para la biofiltración de tolueno.....	58
Tabla 8.- Balances de carbono para cada etapa de operación.....	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Distribución de los contaminantes atmosféricos emitidos en México.....	2
Figura 2.- Rango de aplicabilidad de los diferentes tratamientos de COV.....	4
Figura 3.- Mecanismos de degradación del contaminante en la biofiltración.....	7
Figura 4.- Materiales comúnmente utilizados como soporte.....	9
Figura 5.- Diagrama del proceso de biofiltración.....	18
Figura 6.- (a) Biofiltro. (b) Empuja jeringa.....	19
Figura 7.- Aclimatación del inóculo.....	21
Figura 8.- Variación de la carga y la CE diaria con acetato de butilo.....	33
Figura 9.- ER diaria con acetato de butilo.....	33
Figura 10.- Perfiles de concentración de acetato de butilo a lo largo del lecho filtrante.....	35
Figura 11.- CE y PCO ₂ respecto al tiempo de operación.....	37
Figura 12.- Relación entre la CE y PCO ₂	38
Figura 13.- Efecto de la CV sobre la CE de acetato de butilo.....	39
Figura 14.- Seguimiento de la CV y la CE.....	43
Figura 15.- Seguimiento de la ER respecto al tiempo de operación.....	43
Figura 16.- Perfil de concentración del acetato de etilo a través del lecho filtrante.....	45
Figura 17.- CE y PCO ₂ respecto al tiempo de operación.....	47
Figura 18.- Efecto de la CV sobre la CE de acetato de etilo.....	48
Figura 19.- CV y la CE con respecto al tiempo de operación.....	51
Figura 20.- ER con respecto al tiempo de operación.....	51
Figura 21.- Fibra de coco sin inocular y después de 226 días de operación.....	53
Figura 22.- Perfil de concentración a lo largo del lecho filtrante tras el regreso del acetato de butilo.....	54
Figura 23.- Seguimiento de la PCO ₂ después del regreso con acetato de butilo.....	55
Figura 24.- Seguimiento de la CV, CE y ER diarias para tolueno.....	57
Figura 25.- Seguimiento de la PCO ₂ para el tolueno.....	60
Figura 26.- Seguimiento de la caída de presión y del contenido de biomasa.....	61
Figura 27.- Seguimiento del pH a lo largo del experimento.....	63
Figura 28.- Hongos presentes en la biopelícula (día 194).....	66
Figura 29.- Seguimiento del COT a lo largo del experimento.....	67