

Humedales artificiales de flujo subsuperficial como alternativa de tratamiento de agua residual agroindustrial contaminada con un efluente de pesticidas pretratado con fotocátalisis

Sub-surface flow constructed wetlands as a treatment alternative for agro-industrial wastewaters contaminated with a pesticides effluent pretreated by photocatalysis

Teddy Arriaga-Barríos, Ing^{1,2}, Ángela Patricia León-Segura¹,
Jaime Jaramillo-Jaramillo¹, José Ángel Colina-Márquez, PhD³,
Fiderman Machuca-Martínez, PhD¹, Carlos Arturo Madera-Parra, MSc⁴

Resumen

Objetivo: Determinar si la presencia de la especie vegetal *Heliconia psittacorum* aumenta la eficiencia de remoción de carga contaminante en un humedal de flujo subsuperficial.

Materiales y métodos: En este trabajo se emplearon dos humedales artificiales de flujo subsuperficial a escala piloto (uno con plantas y otro de control sin plantas) para tratar un efluente combinado de agua residual sintética y un efluente contaminado con pesticidas tratado previamente con fotocátalisis solar. Se analizaron los efectos del bloque experimental, de la composición del efluente alimentado a los humedales y del tipo de humedal, en la degradación de la mezcla contaminante (consistente en una combinación de pesticidas comerciales usados en el cultivo de la caña de azúcar).

Resultados: No hubo incidencia significativa del tipo de humedal o de la composición del efluente alimentado a los humedales, lo que comprobó la alta robustez de este tipo de tratamiento biológico.

Conclusión: Esta clase de sistema contribuye a la descontaminación de aguas residuales contaminadas con pesticidas y/o sus derivados.

Palabras clave: *Heliconia psittacorum*; Humedales; 2,4-D; Ametrina; Diurón.

Abstract

Objective: To determine whether the presence of the *Heliconia psittacorum* increases the efficiency of removal of pollution load in a subsurface flow wetland.

Materials and methods: In this work, two pilot-scale sub-surface constructed wetlands (one with plants and the other without them) were used to treat a combined effluent of synthetic wastewater and a pesticides polluted wastewater pretreated by solar photocatalysis. The effects of the experimental block, composition of the effluent and the wetland type on the degradation of a pollutant mixture (consisting of a combination of commercial pesticides used in sugar cane crops).

Results: There was not significant incidence of the wetland type or the composition of the inlet effluent of the wetlands; this proved that this biological system is highly robust regarding.

Conclusion: This type of system contributes to the decontamination of wastewaters polluted with pesticides or their derivatives.

Keywords: *Heliconia psittacorum*; Wetlands; 2,4-D; Ametryne; Diuron.

¹ Grupo de Investigación de Procesos Avanzados para Tratamientos Químicos (GAOX), Escuela de Ingeniería Química, Universidad del Valle, Cali, Colombia. e-mail: teddy.arriaga.barríos@correounivalle.edu.co

² Grupo de Investigación en Energía Renovable y Meteorología (PSOLAR), Universidad Tecnológica del Chocó, Quibdó, Colombia.

³ Grupo de Modelado y Simulación de Procesos y Partículas, Programa de Ingeniería Química, Universidad de Cartagena, Cartagena, Colombia. e-mail: jcolinam@unicartagena.edu.co

⁴ Grupo de Investigación de Saneamiento Ambiental, Escuela de Ingeniería de los Recursos Naturales y del Medio Ambiente, Universidad del Valle, Cali, Colombia. e-mail: carlos.a.madera@correounivalle.edu.co

Fecha de recibido: Mayo 2, 2011

Fecha de aprobación: Noviembre 17, 2011

Introducción

El agua es un principio de base insustituible para los seres humanos, así como un elemento fundamental para el bienestar social. Lamentablemente, este recurso natural se ve ahora amenazado principalmente por los compuestos no biodegradables y tóxicos de carácter sintético como los pesticidas, que se generan como resultado del progreso material de la sociedad moderna (Farré *et al.* 2008).

El uso de pesticidas puede ser un agente importante de contaminación del recurso hídrico, del suelo y de los productos de cosechas que en su mayoría son para el consumo humano. Solo en el Valle del Cauca, donde se llevó a cabo este estudio, se emplean alrededor de 63,000 toneladas métricas (TM) anuales de pesticidas aplicados a los cultivos de caña de azúcar (Asocaña 2010). El lavado de los envases y contenedores empleados en la aspersión de cultivos es una de las formas más comunes de contaminar el agua con estas sustancias (Mendoza-Marín *et al.* 2010).

Una tecnología simple y de bajo costo para la eliminación de estos contaminantes no existe, y las tecnologías utilizadas normalmente para tratar estos efluentes suelen ser costosas. Las alternativas actuales al uso de pesticidas son los cultivos resistentes o el control biológico de plagas, sin embargo, en los países en desarrollo estos instrumentos son muy poco empleados, debido quizás a la cultura, a sus políticas agrícolas o como es muy usual, a la escasez de recursos económicos (Malato-Rodríguez *et al.* 2001).

La fotocatalisis heterogénea se ha empleado como alternativa para degradar sustancias que no se pueden descomponer mediante sistemas biológicos. Sin embargo, la mayor desventaja que presenta la aplicación de la fotocatalisis heterogénea son sus elevados costos de operación al

compararlos con los tratamientos biológicos. Por consiguiente, se ha planteado la oxidación parcial de los contaminantes mediante fotocatalisis heterogénea como tratamiento primario, con el objeto de transformarlos en intermediarios biocompatibles para después someterlos a tratamiento biológico, lo que resulta ser mucho más económico que las tecnologías convencionales para tratamiento de aguas (Mendoza-Marín *et al.* 2010, Sarria y Pulgarín 2003). En este punto se evidencia el potencial del uso de humedales artificiales como alternativa eficiente, siendo empleados en el tratamiento de efluentes secundarios para reducir los componentes orgánicos, donde los residuos son tratados por microorganismos unidos a la superficie del medio y a las raíces de las plantas (Sauter y Leonard 1997). En esta zona de transición, plantas y microorganismos interactúan con el residuo y los sedimentos reduciendo el impacto biológico, químico y físico mientras aumentan la eficiencia del humedal (Powicki 1997). El objetivo de este artículo es estudiar el comportamiento de los humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial (HFSS) para tratar agua residual agroindustrial contaminada con un efluente de pesticidas pretratado con fotocatalisis.

Materiales y métodos

Se emplearon dos humedales de flujo sub-superficial (HFSS), uno sin planta y otro se sembró con macrófitas del tipo *Heliconia psittacorum*. Las dimensiones de los HFSS fueron 0.57 m de largo; 0.37 m de ancho y 0.37 m de profundidad. El material del que está hecho el contenedor es polipropileno de color negro para evitar la presencia de algas.

Se llenó cada humedal con un medio de soporte inerte de grava (½-1½ pulgadas de diámetro) y una capa superficial de carbonilla que hizo las veces de filtro. Se plantó la especie *H. psittacorum* con una densidad de 92 plantas/m². Los

rizomas de la planta se enterraron en la grava hasta 10 cm de profundidad (Arango-Gartner 2007). Estas heliconias se tomaron del campus de la Universidad del Valle (Figura 1). Con base en las metodologías propuestas por Crites y Tchobanoglous (2000) y Delgadillo *et al.* (2010) se establecieron las variables de diseño de los HFSS (Tabla 1).

Se realizaron las siguientes adecuaciones alrededor del humedal para garantizar la homogeneidad de los tratamientos y minimizar las perturbaciones a los experimentos: Se colocó una cubierta de plástico traslúcida sobre el humedal para evitar la incidencia directa de la luz solar y la precipitación, y además se usó una malla como cubierta lateral para proteger el humedal de los vientos y las lluvias (Figura 2).

Se instalaron dos bombas peristálticas para garantizar un caudal constante de alimentación al humedal de 15 l/día. Para asegurar el flujo subsuperficial se utilizó un sistema de recolección con tuberías perforadas de media pulgada que se extienden a lo ancho del humedal, para la entrada y para la salida.



Figura 1. Sistema de tratamiento de humedales. a. Tubería de drenaje en HFSS. b. Estructura de los contenedores en polipropileno. c. Contenedores con el medio granular. d. Sistema de humedales de flujo subsuperficial.

La tubería de alimentación de la entrada estaba en el borde del humedal, encima de la grava; esta tubería está conectada a la bomba peristáltica. El sistema de drenaje está al final de los reactores en la parte del fondo (Figura 1), y está conectado a un sistema de tubería en forma de sifón para garantizar un flujo subsuperficial y que el agua cumpla el tiempo estipulado por TRH.



Figura 2. Sistema de tratamiento de humedales. a. Cubierta de plástico traslúcida sobre el humedal para evitar la incidencia directa de la luz solar y precipitación. b. Malla como cubierta lateral para proteger el humedal de los vientos y las lluvias.

Tabla 1
Variables de diseño del humedal de flujo subsuperficial

Variables	Unidad	Dimensión
Porosidad		0,57
Altura	m	0,5
Q*	m ³ /día	0,015
TRH*	Día	2,150
Área	m ²	0,065
Ancho	m	0,15
Largo	m	0,45
Volumen	m ³	0,032

* Q es el caudal y TRH el tiempo de retención

Tabla 2. Ensayos experimentales

	% _{pret}	% _{AR}	Vol _{pret} (l)	Vol _{AR} (l)
1	0	100	0	30
2	20	80	6	24
3	60	40	18	12

Se alimentó inicialmente el humedal con agua residual proveniente de la salida de la PTAR El Caney para introducir los microorganismos y estabilizar el sistema. Esto se hizo durante dos meses para promover su fijación y la formación de una biopelícula en el lecho filtrante del humedal. Una vez realizado este acondicionamiento, se realizaron los experimentos.

La investigación tuvo una duración de cinco meses desde la estabilización hasta el final de los experimentos. Se tomaron muestras en la entrada y salida de cada humedal con base en muestras compuestas de 24 horas hasta terminar el TRH.

Se realizaron diferentes ensayos que consistieron en tres mezclas de diferente composición de agua residual sintética (ARS) y agua pretratada con fotocátalisis (APF) con TiO₂ en un reactor

Tabla 3. Composición y concentración del agua residual sintética (ARS)

Componente	Concentración (mg/l)
Peptona universal	160.0
Extracto de carne	110.0
Sulfato de magnesio heptahidratado (MgSO ₄ *7H ₂ O)	2.0
Hidrogeno fosfato de disodio (Na ₂ HPO ₄)	33.4
Cloruro de Calcio dihidratado (CaCl ₂ *2H ₂ O)	4.0
Úrea	30.0
Sal común (NaCl)	7.0
Cloruro de amonio (NH ₄ Cl)	1.7
Dihidrogeno fosfato de potasio (KH ₂ PO ₄)	8.5
Hidrogeno fosfato de dipotasio (K ₂ HPO ₄)	21.7

solar tipo CPC. Cada experimento se realizó por triplicado como (Tabla 2).

Preparación del agua residual sintética (ARS). El ARS preparada para este estudio tiene la composición que se muestra en la Tabla 3 (Carrillo *et al.* 1998).

Preparación del agua residual agroindustrial sintética. El agua residual agroindustrial sintética se preparó para simular una mezcla de pesticidas típica presente en los efluentes generados en el lavado de equipos de fumigación de cultivos de caña de azúcar (Becerra *et al.* 2008). La composición de la solución madre con los pesticidas usados en el cultivo de la caña, era la siguiente:

- 2 g de Karmex® (Diurón)
- 10 ml Profiamina® (2,4-D)
- 20 ml de Agrogen 500SC® (Ametrina)
- 1 ml de Inex-A
- 0,7 g de Cosmoaguas

Estos componentes se diluyeron en un litro de agua destilada para obtener la solución madre. Alícuotas de 35 ml se diluyeron en 40 litros de agua cruda para simular los efluentes a tratar con fotocátalisis heterogénea solar. Este tratamiento fotocatalítico se realizó en un reactor solar CPC a escala piloto (Figura 3) de 22 litros de volumen iluminado y 2.5 m² de superficie expuesta a la radiación solar. Este reactor tubular consistía en una serie consecutiva de 20 tubos de vidrio Duran® (tipo borosilicato) de 1.2 m de longitud, 32 mm de diámetro externo y 1.4 mm de espesor. A través de los tubos se recircularon los 40 litros de agua residual agroindustrial sintética con 12 g de catalizador sólido (TiO₂ Degussa P25) en suspensión. El caudal de recirculación fue de 80 l/min, que se proporcionó por una bomba centrífuga March® de 0.5 HP con impulsor magnético.

La radiación UV solar (tanto flujo de radiación en W/m², como la energía acumulada en W·h/m²) se midió con un sensor UV Acadus S50 y se registraron las lecturas con un monitor FMC-3000 de Desig Instruments. Para todos los ensayos se alcanzaron valores de energía UV acumulada de 80 W·h/m².

Diseño experimental. Se empleó un diseño factorial multinivel con tres factores con réplicas, tal como se ve a continuación:

- *Factor 1:* Tipo de humedal



Figura 3. Reactor CPC fotocatalítico solar (Laboratorio Fotocátalisis Solar, Univalle)

- *Factor 2:* Proporción de agua pretratada con fotocátalisis (APF), %V/V
- *Factor Bloque:* Agua residual agroindustrial
- *Niveles Factor 1:* Con plantas (HP) y sin plantas (HS).
- *Niveles Factor 2:* 0%, 20%, 60% V/V

La variable de respuesta (Ec 1) fue el porcentaje de degradación de carbono orgánico total (TOC por sus siglas en inglés) eliminado por los dos sistemas en conjunto.

$$\text{Ec. 1} \quad \%TOC = \frac{TOC_{inicial} - TOC_{final}}{TOC_{inicial}} \times 100\%$$

En la Tabla 4 se muestran las variables y los niveles a considerar en el diseño, además de su respectiva codificación. Antes y después de cada ensayo, se debe hacer el lavado de los reactores con agua que no contenga cloro, con el fin de eliminar los residuos de los ensayos anteriores y garantizar que cada muestra sea correspondiente tanto al respectivo ensayo como a su réplica y por tal razón se debió suministrar una fuente de inóculo (microorganismos); se agregaron 275 ml

Tabla 4. Codificación de variables de estudio

	Niveles		
Codificación	-1	0	1
Tipo de HFSS	HP		HS
Composición efluente (% V/V de APF)	0	20	60

Tabla 5. Niveles para la proporción APF en el afluente alimentado a los HFSS

Niveles	APF %V/V	ARS %V/V
-1	0	100
0	20	80
1	60	40

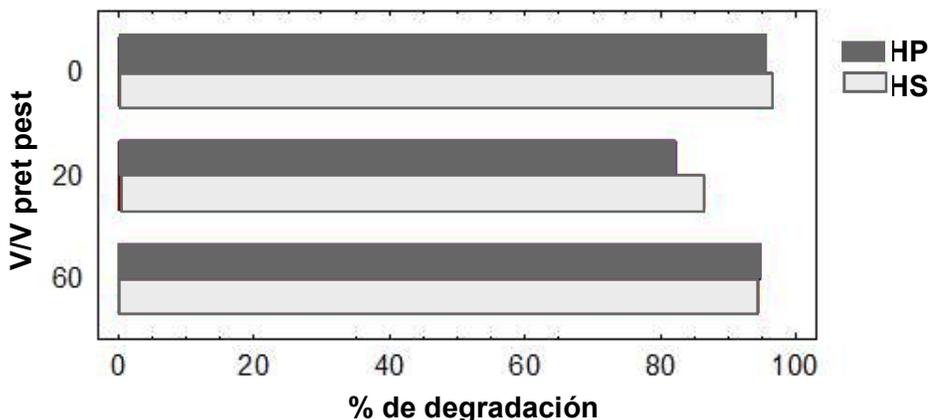


Figura 4. Diagrama de barras del % de degradación HFSS

de lodo (mezcla) por cada 30 litros de sustrato a tratar. Esta mezcla de lodo se extrajo de varias plantas de tratamiento de aguas residuales del Valle del Cauca: Ginebra, barrio El Caney (Cali). Esta última usaba como sustrato un pretratado de pesticida y lixiviado orgánico casero.

En la Tabla 5 se muestran los niveles codificados para el porcentaje de APF en el efluente alimentado a los HFSS. El tiempo de residencia de la corriente tratada en el humedal fue de 48 h y se recolectaron muestras del afluente al humedal al inicio y dos muestras (una de cada humedal) del efluente al final del tratamiento. Para caracterizar las muestras se midieron los parámetros de pH, temperatura y TOC que se midió con un analizador Shimadzu 5050.

Resultados

Se midieron concentraciones de TOC en la entrada y salida para ver el porcentaje de degrada-

ción del agua residual en los dos tipos de HFSS. En la Figura 4 se observa el promedio del porcentaje de degradación del efluente tratado con los dos sistemas acoplados (fotocatálisis solar y humedales). También se puede observar que esta clase de sistema puede terminar de degradar este clase de aguas residuales agroindustriales.

De acuerdo con el diseño experimental propuesto, los resultados obtenidos para los porcentajes de degradación del sustrato a tratar se observan en la Tabla 6. Con los resultados obtenidos, se realizó el análisis estadístico (análisis de varianza, ANOVA) con el software STATGRAPHICS Plus 5.1 en español. La Tabla 7 muestra estos resultados. Allí puede comprobarse que los efectos más significativos dentro del diseño experimental, valor *p* menor a 0.05, tienen un efecto significativo sobre la variable dependiente, con una confiabilidad del 95% (Montgomery *et al.* 1996, López 2002). Se prueba la hipótesis nula: como el valor *p* es igual a 0.2196 para el efecto de bloque, este no tiene inci-

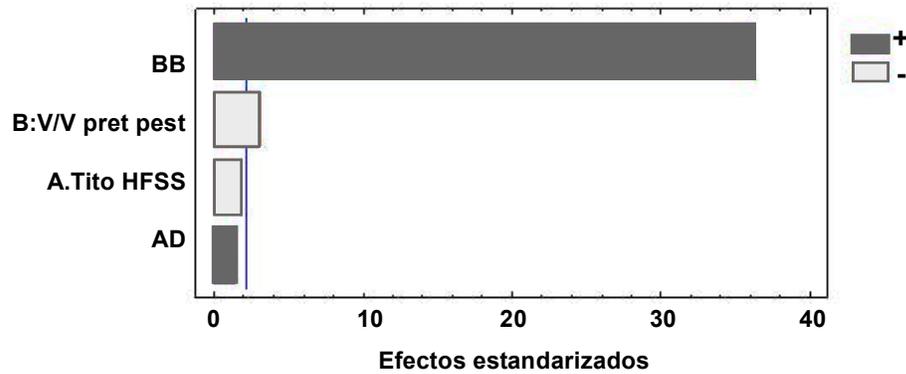


Figura 5. Diagrama de Pareto estandarizado para % de degradación HFSS

Tabla 6. Resultados de la degradación de TOC con el sistema acoplado

Experimento	Bloque	Variable/Factor (valor codificado)		% degradación experimental
		Tipo HFSS	Relación APF/ARS	
1	1	-1	-1	95.54
2	1	1	-1	95.41
3	1	-1	0	84.21
4	1	1	0	81.51
5	1	-1	1	93.94
6	1	1	1	94.09
7	2	-1	-1	96.70
8	2	1	-1	95.09
9	2	-1	0	83.83
10	2	1	0	83.02
11	2	-1	1	94.97
12	2	1	1	95.17
13	3	-1	-1	96.46
14	3	1	-1	95.54
15	3	-1	0	81.97
16	3	1	0	81.96
17	3	-1	1	94.46
18	3	1	1	94.85

dencia significativa. Se puede observar que el efecto tipo A (HFSS) y la interacción entre AB (tipo de HFSS y concentración de APF) no tienen un efecto significativo sobre el porcentaje de degradación. Sin embargo, para el efecto B (concentración de APF) y la interacción entre los niveles de este efecto, sí existe una diferencia significativa. Esto se puede confirmar con el diagrama de Pareto para el porcentaje de degradación (Figura 5).

A partir del diagrama de Pareto se puede decir con un nivel de significancia del 95% que al menos uno de los niveles de la concentración de APF en la alimentación a los humedales (0%, 20% y 60%) presenta una diferencia significativa.

Se observó que había una gran diferencia entre la concentración del 20% con respecto a las de 0% y 60%. Sin embargo, para los niveles entre

Tabla 7. Tabla ANOVA para el diseño factorial

Fuente	Suma de cuadrados	gl	Cuadrado medio	f	p
A: Tipo HFSS	1.64772	1	1.64772	3.49	0.0884
B: Conc. APF	4.39109	1	4.39109	9.31	0.011
AB	0.95824	1	0.95824	2.03	0.1817
BB	618.525	1	618.525	1311.84	0
Bloques	1.64615	2	0.823074	1.75	0.2196
Error total	5.18645	11			
Total (corr.)	632.355	17	0.471495		

Tabla 8. Anova para los niveles de APF con el humedal con plantas (HP)

Fuente	Suma de cuadrados	gl	Cuadrado medio	f	p
Entre grupos	331.64	2	165.82	517.47	0.0000
Intra grupos	1.92266	6	0.320444		
Total (corr.)	333.563	8			

Tabla 9. Anova para los niveles de APF con el humedal sin plantas (HS)

Fuente	Suma de cuadrados	gl	Cuadrado medio	f	p
Entre grupos	292.974	2	146.487	210.74	0.0000
Intra grupos	4.17062	6	0.695104		
Total (corr.)	297.145	8			

0% y 60% no hay una diferencia muy significativa porque las medias están muy cercanas entre sí. Considerando que solo se presentó una diferencia significativa entre las concentraciones de APF, se realizó nuevamente un análisis de varianza simple donde solo se tomó en cuenta esta variable, para el tratamiento HS y HP. De estos análisis de varianza se concluyó que efectivamente sí existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias de un nivel de concentración de APF a otro nivel con un alfa del 0.05% (Tablas 8 y 9).

Para determinar entre cual o cuales de las concentraciones de APF presenta diferencia significativa se hizo una prueba post-anova para ambos casos. La prueba de Tukey permite la com-

paración entre diferentes variables. De esta manera, se concluyó que para las concentraciones de APF existe una diferencia significativa entre 0% y 60% con respecto al 20%, es decir, que al utilizarse concentraciones de APF 0% y de 60% V/V no hubo diferencia (Tablas 10 y 11).

Discusión

Las remociones de 0% y 60% probablemente se debieron a la acción conjunta de varios procesos:

1. Descomposición por microorganismos (Wickramanayake y Hinchee 1998) desarrollados tanto en la grava como en el agua, lo que condujo a la mineralización parcial de la

Tabla 10. Contraste múltiple de rango para la degradación (%V/V APF y HP)

APF (%V/V)	Frecuencia	Media	Grupos homogéneos
0	3	95.348	X
20	3	82.1607	X
60	3	94.7033	X
Contraste	Diferencias	± límites	
0-20	*13.1873	1.41817	
0-60	0.644667	1.41817	
20-60	*-12.5427	1.41817	

Tabla 11. Contraste múltiple de rango para la degradación (%V/V APF y HS)

APF (%V/V)	Frecuencia	Media	Grupos homogéneos
0	3	96.2317	X
20	3	83.339	X
60	3	94.4567	X
Contraste	Diferencias	± límites	
0-20	*12.8927	2.0887	
0-60	1.775	2.0887	
20-60	*-11.1177	2.0887	

- mezcla de pesticidas
- Degradación química del pesticida por hidrólisis (Mathur *et al.* 2008).
 - Adsorción del agroquímico al medio granular y a las raíces de las macrófitas.
 - Absorción a las raíces y rizomas de las plantas (Wolff *et al.* 1993, Simone 2005) y
 - Descomposición del COT generado por la mezcla (Agudelo *et al.* 2010).

A pesar de que los diferentes pesticidas usados en esta mezcla son tóxicos y de amplia acción contra muchos microorganismos, las comunidades microbianas presentes en los HFSS parecen haberse adaptado a este pretratado de pesticida y creado resistencia en la misma medida en que se aumentó su concentración (Salas *et al.* 2009); esto también se atribuye a que el pretratamiento de pesticidas fue empleado como fuente de carbono y energía tal como enuncian Papanastasiou

y Maier (1982) porque no se muestran diferencias significativas entre los tratamientos de 0% y 60%.

La influencia del tratamiento de 20% sugiere que a mayor cantidad de materia orgánica disuelta se pudo incrementar la dinámica de las comunidades microbianas, favoreciendo el consumo del material orgánico (ARS) o también facilitando que mayor cantidad del plaguicida se adhiriera a coloides orgánicos y a diferentes componentes de los humedales (Agudelo *et al.* 2010, Becerra *et al.* 2008, Papanastasiou y Maier 1982).

Conclusiones

Con el diagrama de Pareto y el análisis de varianza se comprobó que el tipo HFSS y la concentración de APF en el afluente alimentado a los humedales no inciden en el porcentaje de

degradación para esta clase de mezcla de sustrato. Por otro lado, con la prueba de Tukey se confirmó que no hay una diferencia significativa entre los ensayos con 0% y 60% de APF en afluente, por lo que se pudo concluir que los sistemas de tratamiento con HFSS están en la condición de acoplarse exitosamente con tratamientos fotocatalíticos para reducir la contaminación en aguas agroindustriales con residuos de pesticidas.

Agradecimientos

El autor principal de este trabajo agradece al Dr. Fiderman Machuca, al MSc. William Murillo López, a la Universidad del Valle, a la Universidad Tecnológica del Chocó, a los Grupos de Investigación GAOX (Univalle) y Psolar (UTCH), a los laboratorios de Microbiología Ambiental de la EIDENAR, y al de Investigación y Docencia de Ingeniería Química de la Universidad del Valle.

Literatura citada

- Agudelo RM, Peñuela G, Aguirre NJ, Morató J, Jaramillo ML. 2010. Simultaneous removal of chlorpyrifos and dissolved organic carbon using horizontal subsurface flow pilot wetlands. *Ecolo Engineer*. 36 (10): 1401-8.
- Arango-Gartiner AM. 2007. *Biosistema integral de tratamiento de aguas residuales domésticas. Diseño, construcción y evaluación* (MSc tesis). Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Manizales: Universidad de Manizales. 118 p.
- ASOCAÑA. 2010. *Informes técnicos de reporte anual*. Cali: Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia. 102 p.
- Becerra D, Barba LE, Gutiérrez HM. 2008. Alternativas de tratamiento biológico de plaguicidas usados en caña de azúcar para el acople con sistemas fotocatalíticos. *Revista EIDENAR*. 8: 4-12.
- Carrillo A, Puente E, Castellano T, Bashan Y. 1998. *Curso taller Aplicaciones biotecnológicas de ecología microbiana. Manual de Laboratorio. Énfasis en aplicaciones ambientales*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana y Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, México. p 51.
- Crites R, Tchobanoglous G. 2000. *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados*. Volumen 1. Bogotá: Mc Graw Hill. 1108 p.
- Delgadillo O, Camacho A, Pérez LF, Andrade M. 2010. *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochabamba: Centro Andino para la Gestión y el Uso del Agua (Centro AGUA). 99 p.
- Farré MJ, Maldonado MI, Gernjak W, Oller I, Malato S, Domènech X, et al. 2008. Coupled solar photo-Fenton and biological treatment for the degradation of diuron and linuron herbicides at pilot scale. *Chemosphere*. 72: 622-9.
- López CP. 2002. *Estadística práctica con STATGRAPHICS®*. Madrid: Pearson Educación. 712 p.
- Malato S, Blanco J, Estrada C, Bandala E. 2001. Degradación de plaguicidas. En: Blesa MA. *Eliminación de contaminantes por fotocatalisis heterogénea*. Capítulo 12. La Plata: Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED). p. 269-81.
- Mathur V, John PJ, Soni I, Bhatnagar P. 2008. Blood levels of organochlorine pesticide residues and risk of reproductive tract cancer among women from Jaipur, India. In: Mohla S, Rochefort H, Maudelonde T. (Eds.) *Hormonal carcinogenesis*. New York: Springer. 387-94.
- Mendoza-Marín C, Osorio P, Benítez N. 2010. Decontamination of industrial wastewater from sugarcane crops by combining solar photo-Fenton and biological treatments. *Hazardous Materials*. 177(13): 851-5.
- Montgomery DC, Runger GC. 2003. *Applied statistics and probability for engineers*. 3ª ed. Inglaterra: John Wiley & Sons, Inc. p 976.
- Papanastasiou AC, Maier WJ. 1982. Kinetics of biodegradation of 2,4-dichlorophenoxyacetate in the presence of glucose. *Biotechnol Bioengineer*. 24 (9): 2001-11.
- Powicki PR. 1997. Constructed wetlands-treat wastewater naturally. *EPRI*. (22): 16-25.
- Salas W, Chicaiza LD, Márquez JC, Machuca F. 2009. Evaluación de un sistema fotocatalítico solar heterogéneo acoplado a un sistema biológico para el tratamiento de aguas contaminadas con una mezcla de pesticidas comerciales. En: Sánchez-T LD, Galvis-CA, Restrepo-T I, Peña-V. MR. (Eds.). *Libro de Memorias Aguas 2009. La gestión integrada del recurso hídrico frente al cambio climático*. Cali: Cinara. p. 633-42.
- Sarria V, Pulgarín C. 2003. Desarrollo de procesos

- fotoquímicos y biológicos acoplados como una alternativa natural para el tratamiento de aguas. *En: Memoria de resúmenes del Seminario Internacional sobre Métodos Naturales para el Tratamiento de Aguas Residuales*. AGUA 2003. Cali, septiembre 29-30, 2003. p. 108-15. Compilador.
- Sauter G, Leonard K. 1997. Wetland design methods for residential wastewater treatment. *JAWRA* (33): 155-62.
- Simone S, Jakomin LM, Murias M, Pertusi L. 2005. *Desarrollo de niveles guía nacional de calidad de agua ambiente correspondientes a clorpirifos*. República Argentina, Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación. 19 pp. Disponible en <http://www.pnuma.org/agua-miaac/CODIA%20CALIDAD%20DE%20LAS%20AGUAS/MATERIAL%20ADICIONAL/PONENCIAS/PONENTES/Tema%205%20Niveles%20Guías%20Calidad%20de%20Aguas/NIVELES%20GUIA/4%20-%20Desarrollos/clorpirifos.pdf>
- Wickramanayake GB, Hinchee RE. 1998. *Designing and applying treatment technologies: Remediation of chlorinated and recalcitrant compounds*. Columbus: Battelle Press. 366 p.
- Wolff MS, Toniolo PG, Lee EW, Rivera M, Dubin N. 1993. Blood levels of organochlorine residues and risk of breast cancer. *J Nat Cancer Inst.* 85 (8): 648-52.