

<i>Nereis. Revista Iberoamericana Interdisciplinar de Métodos, Modelización y Simulación</i>	6	9-17	Universidad Católica de Valencia "San Vicente Mártir"	Valencia (España)	ISSN 1888-8550
--	---	------	---	-------------------	----------------

## Evaluación de parámetros tecnológicos para la remoción de nitrocompuestos aromáticos utilizando un humedal natural de flujo sub superficial horizontal

Fecha de recepción y aceptación: 15 de enero de 2014, 10 de febrero de 2014

Yamell Jiménez Prieto,<sup>1</sup> Guillermo Esperanza Pérez,<sup>1</sup> Surey Ramírez González,<sup>1</sup> Omar García González<sup>2</sup> y Javier Delgado Santana<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro de Estudio de Química Aplicada, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas Santa Clara.

Correspondencia: 54830. Villa Clara. Cuba. *E-mail:* yamelljp@uclv.edu.cu

<sup>2</sup> Centro de Producción de Medios Ingenieros, Ranchuelo, Santa Clara, Villa Clara.



### ABSTRACT

This study is conducted in the town of Ranchuelo in the province of Villa Clara, Cuba, led to the experimental evaluation of a natural system (wetland) for tertiary treatment of industrial wastewater contaminated with aromatic nitrocompounds (NCAT), classified as toxic and hazardous waste. A characterization of wetland soil fundamental parameters is obtained, also the chemical characterization of the wastewater at the outlet of the existing treatment plant, whose toxicity is due to the presence of NCAT, salts and the concentration of total nitrogen (NT), and the evaluation of the kinetic behavior of the system. The influence of the mean flow and the initial salt concentration on percent removal of major pollutants through a design of experiment is evaluated. Finally is performed, a brief description of the treatment process that reveals the high importance of this natural environment as a technological alternative to remove toxic substances and for environmental protection.

**KEYWORDS:** *subsurface horizontal flow wetland (SSHFW), wastewater, hazardous wastes.*

### RESUMEN

El presente estudio se desarrolló en la localidad de Ranchuelo en la provincia de Villa Clara, Cuba, dirigido a la evaluación experimental de un sistema natural (humedal) para el tratamiento terciario de aguas residuales industriales, contaminadas con nitrocompuestos aromáticos (NCAT), clasificadas como residuos tóxicos y peligrosos. Se realiza una caracterización del suelo del humedal y se obtienen parámetros fundamentales, la caracterización química de las aguas residuales a la salida de la planta de tratamiento ya existente, cuya toxicidad obedece a la presencia de NCAT, sales y la concentración de nitrógeno total (NT), así como la evaluación del comportamiento cinético del sistema. Se evalúa la influencia del flujo promedio y la concentración inicial de sales sobre el por ciento de remoción de los principales contaminantes a través de un diseño de experimento. Finalmente se realiza una breve descripción del proceso de tratamiento que revela la importancia de este medio natural como alternativa tecnológica para la remoción de estos tóxicos y la protección del medio ambiente.

**PALABRAS CLAVE:** *Humedal de flujo sub-superficial horizontal, aguas residuales, residuos peligrosos.*

## INTRODUCCIÓN

A pesar del amplio conocimiento de los efectos que provoca la contaminación en la salud humana y el medio ambiente, producto de las severas condiciones económicas imperantes, la disposición final de las aguas residuales, en algunos casos, se realiza sin ningún tipo de tratamiento; en unas ocasiones, debido al alto coste que implican las tecnologías convencionales y avanzadas, en otras, debido a la falta de conciencia en cuanto al peligro que esto representa para la naturaleza y, por tanto, para la humanidad.

Por ello, se hace necesaria la búsqueda de técnicas de bajo coste de inversión y bajo consumo energético que solucionen de forma óptima este problema.



Como alternativa a las costosas técnicas convencionales de tratamiento de aguas residuales, los ingenieros han buscado otros caminos y se ha desarrollado una serie de sistemas basados en los mecanismos de depuración existentes en la naturaleza, denominados por esta causa “sistemas de tratamiento naturales”. Estos sistemas requieren la misma cantidad de energía por cada kilogramo de contaminante degradado que las tecnologías convencionales, sin embargo, esta fuente es tomada de la naturaleza como energía solar, energía cinética del viento, la energía química acumulada en la biomasa y en el suelo, etc. (García y col., 2010). Entre estos sistemas se encuentran las lagunas de oxidación, los filtros verdes, los humedales naturales y artificiales, etc. Todos estos no son más que ecosistemas en los que juegan un papel importante determinadas plantas y microorganismos, cuya acción biológica y eficiente simbiosis permiten la eliminación de las cantidades excesivas de nutrientes esenciales, materia orgánica, trazas de metales pesados y agentes patógenos presentes en las aguas residuales. En estos sistemas también se dan procesos físicos y químicos tales como la filtración, la sedimentación, la absorción, la foto oxidación, la fotosíntesis, etc., que contribuyen, en conjunto, a su acción depuradora (Montoya y col., 2010).

La tecnología implementada actualmente para el tratamiento de estos residuales en la localidad bajo estudio genera efluentes con una elevada concentración de nitratos, oxalatos, cloruros y otras sales, no existiendo un sistema totalmente eficaz para la remoción de los mismos. La presencia en la zona en que está ubicada la planta de un humedal natural de flujo subsuperficial horizontal (HFSSH) poblado de juncos, y su reacondicionamiento para mejorar el sistema hidráulico, podría ser una alternativa viable que estudiar con la finalidad de mejorar aún más los parámetros de vertimiento del agua residual, asimilándose como un tratamiento terciario, y proteger los ecosistemas circundantes, las aguas subterráneas y el medio ambiente en general (Vymazal y col., 2006).

El objetivo que se persigue con este trabajo es evaluar la efectividad de este tipo de tecnología emergente, natural y ambientalmente compatible, para el tratamiento de aguas residuales provenientes de plantas productivas de este tipo de industria cubana, contaminadas con residuos tóxicos y peligrosos, la que luego puede ser diversificada y aplicada a numerosas entidades del sector que presentan problemas con los actuales sistemas de tratamiento, brindando una alternativa eficaz y de muy bajo coste, idónea para países en vías de desarrollo.

## MÉTODOS

Los métodos utilizados para el análisis físico-químico de las aguas están basados en el *Standard Methods*, y lo establecido en las normas vigentes en materias de aguas residuales (APHA 2005) (NC 27/2012).

Los procedimientos analíticos y los ensayos realizados a las muestras fueron determinados por las siguientes técnicas:

Nitrógeno amoniacal (mg/L) .....	destilación y cuantificación volumétrica
pH (unidades) .....	método electrométrico
Conductividad eléctrica ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ ) .....	método electrométrico
Cloruros (mg/L) .....	método volumétrico
NCAT (mg/L) .....	método foto colorimétrico

El humedal evaluado es natural, ya que existía en ese lugar; solamente se modificó o reacondicionó, en forma de parcela rectangular. Se le hicieron muros de tierra (de 20 cm de altura), nivelado de manera tal que el agua residual corriera por gravedad, y se hizo la resiembra de las plantas (distribución más uniforme del número de plantas por metro cuadrado) (Vymazal y col., 2006; Wetzel, 2001).

La superficie de este es de aproximadamente 150 m<sup>2</sup> y está formada principalmente por junquillos (plantas remediadoras). Es utilizado sobre todo como tratamiento terciario y su profundidad varía entre los 5 y 20 cm.

El flujo de agua residual en este se gradúa para que no existan encharcamientos ni flujo superficial y que esta penetre en el suelo y se desplace gradualmente por el subsuelo, según el declive que tiene el terreno. La toma de las muestras se realiza al final del humedal en dos pozos de control que miden aproximadamente un metro y medio de profundidad y 30 centímetros de diámetro. Dentro del humedal ocurren simultáneamente varios procesos: físicos, químicos y biológicos, mediante los cuales se eliminan o remueven los diferentes contaminantes. No puede afirmarse aún que exista una vía o mecanismo predominante, pues actualmente se encuentra en proceso de evaluación, mostrando resultados muy satisfactorios (Masbough y col., 2005).

La planta emergente usada en la resiembra del humedal fue la *Eleocharis Interstincta* perteneciente a la familia de las *Cyperaceae*, existente en el área y conocida comúnmente como *junquillo o junco*, esta generalmente crece en la zona litoral de numerosos cuerpos de agua permanentes y temporales (ríos, lagunas, morichales). Es perenne con raíces gruesas, culmos cilíndricos gruesos de hasta 1 m de alto, huecos y septados. Presenta espiguillas cilíndricas de hasta 5 cm, con muchas flores; glumas subcartilaginosas, nervadas, obovadas u oblongas con márgenes escariosos; estambres 3, estilo 2 a 3 dividido, aquenios biconvexos, amarillos, pardos o grises. Fisionómicamente, pertenece a la forma de vida de los helófitos, cuya característica más resaltante es su adaptabilidad a condiciones de inundación y sequía.



Una de las funciones de la *E. Interstincta* dentro de los ecosistemas es que, mediante su estructura vegetativa y diferenciación espacial, proporciona sustrato a organismos colonizadores. Su biomasa y su producción espacial y temporal en estos cuerpos de agua le permiten su automantenimiento, así como también es fundamental como proveedor potencial de sustrato a los organismos perifíticos; al mismo tiempo, constituye una fuente de energía y nutrientes para los diferentes niveles tróficos (Becares, 2004; (García y col., 2004).

La siembra o resiembra del humedal se inició a partir de los rizomas que fueron colocados en el humedal natural modificado de flujo subsuperficial horizontal, junto a una pequeña capa de grava (zeolita, 4 mm) colocada sobre el suelo natural (3 m<sup>3</sup> aproximadamente) y una profundidad de 2 cm para lograr su fijación. Después, al humedal se le adicionó agua de proceso por un tiempo de aproximadamente 30 días, hasta lograr la total fijación de la planta y un crecimiento parcial. La figura 1 muestra una vista parcial del humedal en estudio y las plantas emergentes utilizadas en él.



Figura 1. Muestra parcial del humedal (HFSSH) poblado de *Eleocharis Interstincta*.

Entre las principales ventajas que posee este tipo de tratamiento podemos citar que no hay gastos adicionales de energía, no se necesitan materias primas ni sistemas auxiliares, se contribuye a eliminar parte de las sales (nitratos y cloruros) que acompañan a los efluentes de la planta de tratamiento, se mejora la calidad del agua residual y se eleva la eficiencia total del sistema de tratamiento (Vivar y col., 2003).

## RESULTADOS

### Características del recurso suelo en el área de estudio

El estudio de suelos fue realizado por el Laboratorio Provincial de Suelos perteneciente al Ministerio de Agricultura en la provincia Villa Clara. Las tablas 1 y 2 muestran los principales resultados de los análisis agroquímicos obtenidos del área de estudio.



Tabla 1. Resultados de los análisis agroquímicos del suelo en el humedal objeto de estudio

Muestra	Profundidad	N.º de Lab	pH	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/100g)	K <sub>2</sub> O (mg/100g)	% MO
1	0-20	338	7.1	58.2	20,87	1,22
	20-40	339	7.05	42.3	17,82	3,39
2	0-20	340	6.9	36.9	15,0	2,98
	20-40	341	6.9	56.4	15,0	2,03
3	0-20	342	7.1	48.0	17,14	2,31
	20-40	343	6.9	61.8	20,0	1,22

*Estado hídrico del suelo*

Drenaje Superficial: Excesivo      Interno: Rápido      General: Excesivo  
 Calidad de las Aguas: Buena      Humedad General del Perfil: Ligeramente húmedo  
 Roca Madre o Formadora: Roca ígnea intermedia

Tabla 2. Resultados de los análisis agroquímicos. Equilibrio ácido-base y cationes intercambiables

Equilibrio ácido-base			Cationes Intercambiables							
pH		% de CaCO <sub>3</sub>	Ca	Mg	K	Na	S	T	T-S	V%
CIK	H <sub>2</sub> O									
Meq por 100 g de suelos										
6,9	7,1	-	21,67	7,08	1,94	1,82	32,51	36,68	4,17	88,64

**Caracterización de las aguas residuales a la salida de la planta de tratamiento**

Los ensayos de caracterización de los residuales líquidos efluentes de la planta de tratamiento, se realizaron en los Laboratorios del Centro de Estudios de Química Aplicada (CEQA) de la “Universidad Central Marta Abreu de las Villas”.

Los residuales líquidos que se generan en esta planta productiva poseen los códigos C<sub>47</sub> y H<sub>1</sub> (sustancias de carácter peligroso), por lo que se considera necesaria y obligatoria su caracterización y posterior tratamiento, teniendo en cuenta lo establecido en el apartado 4.1 de la (NC 27/2012) “Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado”.

En la tabla 3 se recogen los principales resultados de los parámetros de calidad medidos en las aguas residuales a la salida de la planta de tratamiento, que se consideran afluentes al humedal objeto de estudio.

Tabla. 3. Valores promedio mensual y anual de los parámetros medidos en las aguas residuales a la salida de la planta de tratamiento (entrada del humedal)

Meses de muestreo	Cloruros (mg/l)	Nitrógeno total (mg/l)	pH	Conductividad (µs/cm)	NCAT (mg/l)
enero	2176,40	15,04	8,22	6945,20	0,8
febrero	2238,40	15,30	8,26	6797,60	0,61
abril	2160,00	15,34	8,33	7028,00	0,75
mayo	2231,00	15,25	8,17	6933,80	0,64
junio	2615,80	14,99	8,09	5476,80	0,83
julio	2355,00	14,28	8,38	4652,00	0,72
octubre	2664,00	15,49	7,60	4152,00	0,69
noviembre	2477,00	15,83	7,50	5623,00	0,76
diciembre	2284,00	14,56	8,18	6622,80	0,59
<b>Promedio</b>	<b>2355,73</b>	<b>15,12</b>	<b>8,08</b>	<b>6025,69</b>	<b>0,71</b>



### Determinación de la influencia de los parámetros operacionales (flujo promedio y concentración inicial de sales), sobre el tanto por ciento de remoción de los principales contaminantes del agua residual

#### Diseño experimental

Para determinar la influencia de un grupo de parámetros sobre la efectividad del humedal en la descontaminación de estas aguas residuales, la planificación de los ensayos se realizó con la ayuda de un diseño factorial de experimentos  $2^2$ , seleccionando como variables de entrada el flujo promedio ( $X_1$ ) y la concentración de sales en el agua residual ( $X_2$ ). Como variables respuestas se tomaron el tanto por ciento de remoción de sales, de NCAT y de nitrógeno total, el cual se determina de la siguiente forma:

$$R(i) = 100 * \left[ 1 - \frac{\text{concentración final}}{\text{concentración inicial}} \right] \quad (1)$$

Como valores límites se definieron:

	Valor mínimo	Valor máximo
$X_1$ = flujo promedio	0,460m <sup>3</sup> /d	0,920m <sup>3</sup> /d
$X_2$ = concentración de sales a la entrada	850 mg/L	1500 mg/L
$R_{\text{NCAT}}$ = % de remoción de NCAT		
$R_{\text{SALES}}$ = % de remoción de sales		
$R_{\text{NT}}$ = % de remoción de nitrógeno total		

En la tabla 4 se expone una sección de la matriz del diseño experimental y los valores del tanto por ciento de conversión alcanzado en el humedal para las variables de salida.

Tabla 4. Matriz del diseño factorial  $2^2$

Exp.	$X_1$	$X_2$	$X_1 * X_2$	$R_{\text{NCAT}}$ (%)	$R_{\text{SALES}}$ (%)	$R_{\text{NT}}$ (%)
1. A	-1	-1	1	73,24	88,48	95,86
2. A	1	-1	-1	42,25	78,04	88,97
3. A	-1	1	-1	70,42	88,91	93,79
4. A	1	1	1	36,62	78,85	85,52
1. B	-1	-1	1	78,87	87,98	95,86
2. B	1	-1	-1	45,07	77,64	88,28
3. B	-1	1	-1	63,38	88,12	95,17
4. B	1	1	1	32,39	78,20	86,90

#### Análisis del diseño factorial de experimentos

El análisis estadístico del diseño se realizó mediante regresión múltiple. Se obtuvieron tres modelos matemáticos, uno para cada una de las variables respuestas definidas. La tabla 5 muestra en forma de resumen los coeficientes de regresión y de correlación ( $R^2$  ajustado) de cada uno de los modelos obtenidos.

#### Modelos matemáticos obtenidos

El modelo general analizado en la regresión múltiple tiene la siguiente forma:

$$R(i) = B_0 + B_1 * X_1 + B_2 * X_2 \quad (2)$$



Modelo 1

$$R_{\text{NCAT}} = 55,28 - 16,197 X_1 - 4,58X_2 \quad (3)$$

Modelo 2

$$R_{\text{sales}} = 83,28 - 5,095X_1 + 0,24X_2 \quad (4)$$

Modelo 3

$$R_{\text{NT}} = 91,29 - 3,876X_1 - 0,95X_2 \quad (5)$$

Tabla 5. Coeficientes de regresión y correlación de cada modelo

$R_i$	$B_0$	$B_1$	$B_2$	$R^2$	$R^2_{\text{ajustado}}$
$R_{\text{(NCAT)}}$	55,28	-16,197	-4,58	0,977	0,967
$R_{\text{(sales)}}$	83,28	-5,095	0,24	0,996	0,994
$R_{\text{(NT)}}$	91,29	-3,876	-0,95	0,979	0,971

El humedal natural provoca una remoción considerable de los contaminantes presentes en el mismo, lo que se refleja en la disminución de la conductividad, los cloruros, el NT y los NCAT, mejorando significativamente su calidad. La tabla 6 muestra los resultados obtenidos de los parámetros medido a la salida del humedal y los pozos de control.

Tabla 6. Resultados obtenidos de los parámetros medido a la salida del humedal y los pozos de control

Parámetros Salida del humedal	pH	Conductividad ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	Nitrógeno total ( $\text{mg}/\text{l}$ )	Cloruros ( $\text{mg}/\text{l}$ )	NCAT ( $\text{mg}/\text{L}$ )
Muestra 1 (0,920 $\text{m}^3/\text{d}$ ) y (850 $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	7,34	350	1,64	34,49	0,40
Muestra 1 (0,460 $\text{m}^3/\text{d}$ ) y (850 $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	7,04	336	0,65	19,71	0,12
Muestra 2 (0,920 $\text{m}^3/\text{d}$ ) y (1500 $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	7,16	781	1,59	68,98	0,50
Muestra 2 (0,460 $\text{m}^3/\text{d}$ ) y (1500 $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	7,03	629	0,60	49,15	0,20
Pozo de control 2 Muestra 1	7,03	231	0,42	15,71	0,1
Pozo de control 2 Muestra 2	7,01	450	0,35	30,50	0,1

Para la determinación de los coeficientes cinéticos se partió de los resultados obtenidos de la evaluación experimental desde 2 hasta 6 días de tiempo de retención en el humedal, comparando los resultados para cada orden y el ajuste de los mismos. La tabla 7 muestra diferentes datos de concentración de nitrocompuestos (NCAT) y nitrógeno total (NT) que fueron usadas para determinar las constantes cinéticas, mientras que la tabla 8 expone las constantes cinéticas para la remisión de NT y NCAT.



Tabla 7. Datos experimentales de concentración de NCAT y NT para determinar las constantes cinéticas

Tiempo (días)	NCAT mg/l	NT mg/l
0	0,8	16,50
2	0,70	3,56
3	0,46	1,69
4	0,35	1,35
5	0,24	1,10
6	0,12	0,65

En las figuras 2, 3 y 4 se muestran de forma gráfica los resultados alcanzados y el ajuste para cada modelo matemático obtenido.

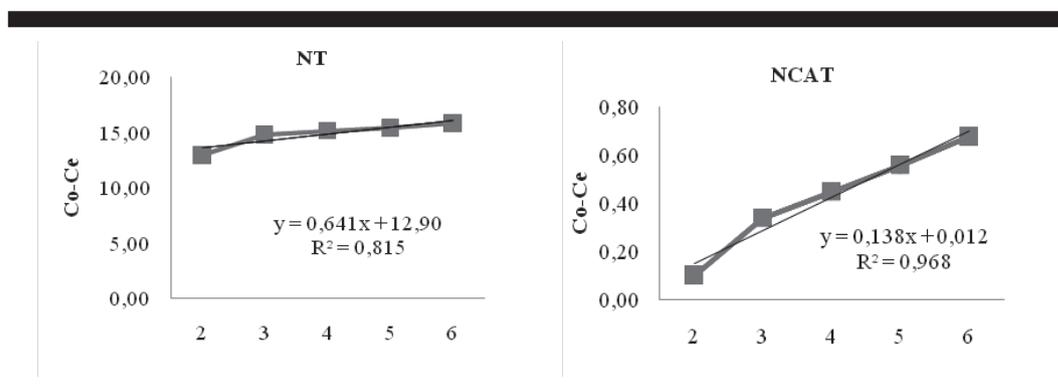


Figura 2. Gráfico de (Co-Ce) versus tiempo para concentración de NT y NCAT (Orden cero).

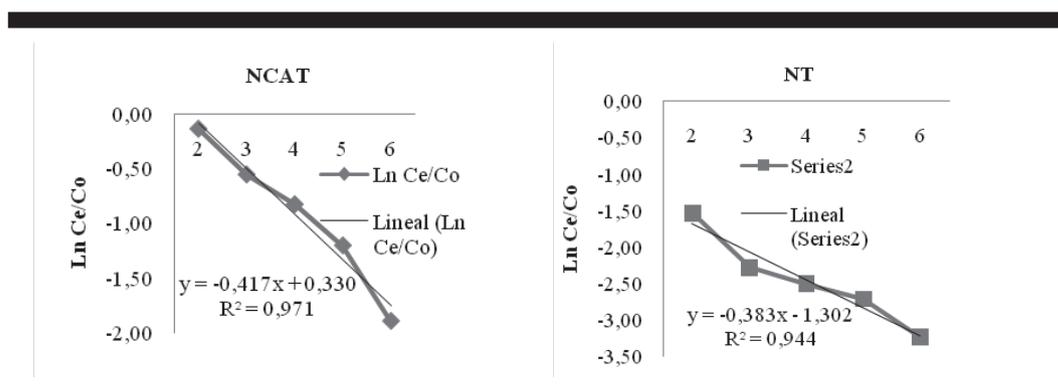


Figura 3. Gráfico de Ln(Ce/Co) versus tiempo para concentración de NCAT y NT (Primer orden).



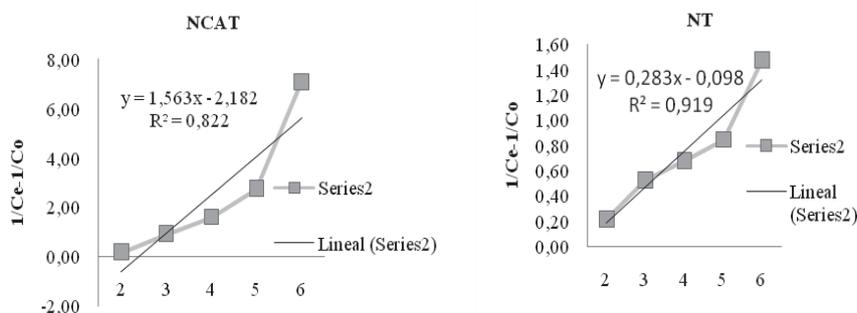


Figura 4. Gráfico de  $(1/C_e - 1/C_o)$  versus tiempo para concentración de NCAT y NT (Segundo orden).

## DISCUSIÓN

El estudio suelo del área del humedal arrojó como resultados que este es poco desarrollado sobre ígneas intermedias, poco profundo, pero con buena fertilidad, ya que el contenido de los elementos fósforo ( $P_2O_5$ ) y potasio ( $K_2O$ ) están en categoría de alto, mientras que el tanto por ciento de materia orgánica, a pesar de sus niveles medios y bajos, es adecuado para el buen desarrollo de los cultivos. El nitrógeno total se encuentra por encima de los LMPP para el vertimiento a un cuerpo receptor tipo B cuyo valor mínimo es de (10 mg/l), según norma cubana. NC 27/2012, y los valores de los nitrocompuestos (NCTA) salen de la planta de tratamiento con una concentración de 0,7 mg/L aproximadamente, por lo que, teniendo en cuenta que la toxicidad ambiental de este residual está dada principalmente por el contenido de los mismos y sus isómeros, podemos decir que la planta de tratamiento actual no cumple con los requisitos de vertimientos para este tipo de sustancia, ya que son productos tóxicos y peligrosos para el hombre y el medio ambiente por presentar códigos  $C_{47}$  y  $H_1$ , cuyo valor máximo permisible para cuerpo receptor tipo B es de 0,1mg/L. El análisis integral de los modelos obtenidos permite afirmar que para  $R_{NCAT}$  y  $R_{NT}$  las variables de entrada  $X_1$  y  $X_2$  poseen una influencia significativa, pero negativa, sobre la variable respuesta. De manera similar, en el caso del modelo  $R_{sales}$  el flujo promedio ( $X_1$ ) también posee una influencia significativa y negativa sobre la variable respuesta, no siendo así el comportamiento de la variable  $X_2$ , que resultó no significativa. La variable de mayor influencia en los modelos es el flujo promedio, y la de menor significación es la concentración de sales a la entrada del humedal.

Tabla 8. Constantes cinéticas para la remoción de NT y NCAT

Orden	NCAT	Nitrógeno Total K
<b>Orden cero</b> $Co - Ce = -kt$	$y = 0,138x + 0,012$ $R^2 = 0,968$	$y = 0,641x - 12,90$ $R^2 = 0,815$
<b>Primer orden</b> $\ln Ce/Co = -kt$	$y = -0,417x + 0,330$ $R^2 = 0,971$	$y = -0,383x - 1,302$ $R^2 = 0,944$
<b>Segundo orden</b> $1/C_e - 1/C_o = -kt$	$y = 1,563x - 2,182$ $R^2 = 0,822$	$y = 0,283x - 0,098$ $R^2 = 0,919$
Para NCAT	$k = 0,417 \text{ d}^{-1}$ No hay referencias	
Para NT	$k = 0,383 \text{ d}^{-1}$ Según autores como Kadlec y Knight (0,3 – 6,11 $\text{d}^{-1}$ )	

Es evidente que a medida que disminuye el flujo aumenta el porcentaje de remoción, ya que este es inversamente proporcional al tiempo de retención hidráulica, lo que ofrece valores de este parámetro satisfactorios desde el punto de vista ingenieril. Este comportamiento, aunque desde el punto de vista fenomenológico es extremadamente complejo, se describe de manera adecuada



a través de un modelo lineal simple con elevado coeficiente de correlación. Como se puede apreciar en la tabla 6, el humedal provoca una remoción considerable de los contaminantes presentes en él, lo que se refleja en la disminución de la conductividad, los cloruros, el NT y los NCAT, que mejoran significativamente su calidad. Se demostró, a partir de los análisis de regresión múltiple, que el flujo promedio es la variable que tiene una influencia significativa sobre el tanto por ciento de remoción de los NCAT, la conductividad y el nitrógeno total, siendo la mejor condición valorada para maximizar el rendimiento en la eliminación de los principales contaminantes: flujo promedio de 0,460 m<sup>3</sup>/d. Según resultados del diseño se alcanza cerca de un 80% de eliminación de los NCAT, por lo que la efectividad global del sistema de tratamiento de estas aguas (planta y humedal juntos), con la incorporación de esta etapa, se incrementa hasta cerca de un 99,5%. Finalmente, el comportamiento cinético del humedal de flujo subsuperficial horizontal se ajusta preferentemente a una cinética de primer orden para un reactor con flujo pistón, según se reporta en la literatura, obteniéndose modelos lineales con elevados coeficientes de correlación para la remoción del NCAT y el NT.

## CONCLUSIONES

La implementación del humedal como tratamiento terciario a la planta de tratamiento ya existente le confiere una efectividad global a su sistema, alcanzando porcentajes de remoción elevados, llevando los tóxicos del mismo a niveles permisibles de la norma para su vertimiento y evitando así la contaminación ambiental y el peligro a la salud del hombre. En general, este resultado tiene aplicación práctica en las diferentes industrias del país, reduciendo de ese modo los impactos ambientales negativos por estos tóxicos, mediante el uso de la *Eleocharis interstincta* como planta emergente en humedales naturales para las condiciones experimentales fijadas en el tratamiento de los NCAT.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] APHA, AWWA, WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21<sup>th</sup> ed. Washington DC: American Public Health Association, 2005.
- [2] Becares, E. (2004). Función de la vegetación y procesos de diseño de humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal y flujo superficial. En: J. García, J. Morató y J. Bayona (Ed.), Nuevos criterio para el diseño y operación de humedales construidos (1.<sup>a</sup> Edición), 51-62. Barcelona, España: CEPET.
- [3] García, J.; Morató, J.; J. Bayona (Ed.). (2004). "Nuevos criterio para el diseño y operación de humedales construidos (1.<sup>a</sup> Edición), 51-62. Barcelona, España: CEPET".
- [4] García, J.; Rousseau, D. P. L.; Morató, J.; Lesage, E.; Matamoros, V.; Bayona, J. M. "Contaminant removal processes in subsurface-flow constructed wetlands: a review". *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, (2010) vol. 40, 7 (July), 561-661.
- [5] Masbough, A.; Frankowski, K.; Hall, K.; Duff, S. "The effectiveness of constructed wetland for treatment of wood waste leachat". *Ecological Engineering*, (2005) vol. 25, 5, 552-566.
- [6] Montoya, J. I.; Ceballos, L.; Casas, J. C.; Morató, J. "Estudio comparativo de la remoción de materia orgánica en humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial usando tres especies de macrófitas", *Revista EIA*, ISSN 1794-1237 Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia). (Diciembre 2010), 14, 75-84.
- [7] ONN: NC27/2012. Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado. Oficina Nacional de Normalización. La Habana, 2012.
- [8] Vivar, J.; García, J.; Aromir, M.; Mujeriego, R. Role of hydraulic retention time and granular médium in microbial renewal of indicador in tertiary treatment reed beds. *Water Research*, (2003) 37, 2645-2653.
- [9] Vymazal, J.; Greenway, M.; Tonderski, K.; Brix, H.; Mander, Ü. "Constructed wetlands for wastewater treatment". *Wetlands and Natural Resource Management*, (2006) vol. 190, Section II, 69-96.
- [10] Wetzel, R. G. "Fundamental processes within natural and constructed wetlands ecosystems: short-term objectives". *Water Science and Technology*, (2001) vol. 44, 11-12, 1-8.



