
Eliminación de cromo utilizando humedales de flujo sub-superficial horizontal

Luisa M. Vera Cabezas*¹, Frank González Cedeño²

¹Centro de Estudios Ambientales de la Universidad de Cuenca, Ecuador,

²Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos Cuba

Removal of chromium using horizontal subsurface flow constructed wetlands

Eliminació de crom utilitzant aiguamolls de flux sub-superficial horitzontal

Recibido: 16 de septiembre de 2014; revisado: 16 de diciembre de 2014; aceptado: 18 de diciembre de 2015

RESUMEN

Los humedales se incluyen entre los llamados sistemas naturales de tratamiento, donde los contaminantes presentes en las aguas residuales son removidos a través de procesos físicos, químicos y biológicos de forma natural. Las Tenerías son industrias con grandes volúmenes de aguas residuales contaminadas. En Cuba la tenería de Caibarien de la provincia de Villa Clara no cuenta con un sistema óptimo de tratamiento para sus residuales, por lo que el vertido del mismo al medio es un problema de consideración, máxime si tenemos en cuenta la presencia de sulfuros y metales pesados como el Cromo.

En este trabajo se construye a escala de laboratorio un humedal artificial de flujo sub-superficial para su evaluación en la remoción de cromo de las aguas residuales de la industria, obteniéndose una eficiencia entre el 88 % y el 92%. Este es el elemento de mayor interés en el trabajo, ya que es conocido el daño que representa para la salud humana y el medio ambiente al ser este un elemento persistente.

Palabras Claves. Metales pesados, cromo, humedales, contaminación, aguas residuales.

SUMMARY

Wetlands are among these-called natural treatment systems where contaminants in the wastewater are removed through by physical, chemical and biological processes naturally. The Tanneries are industries with large volumes of contaminated wastewater. In Cuba the tannery Caibarien Villa Clara of province has not an optimal treatment system for its waste, so that the discharged here of to the surrounding environment is a major problem, especially if we consider into account the presence of sulphides and heavy metals such as chromium. This paper builds on

a laboratory scale artificial wetland sub-surface flow for evaluation in the removal of chromium from wastewater industry, obtaining efficiency between 88% and 92%. This is the element of interest in the work, since it is known to harm posed to human health and the environment as this is a persistent element.

Keywords: Heavy metals, chromium, wetlands, pollution, wastewater

RESUM

Els aiguamolls s'inclouen entre els anomenats sistemes naturals de tractament, on els contaminants presents en les aigües residuals són remoguts de forma natural a través de processos físics, químics i biològics. Les Adoberies són indústries amb grans volums d'aigües residuals contaminades. A Cuba l'adoberia de Caibarien de la província de Villa Clara no compta amb un sistema òptim de tractament per als seus residuals, de manera que l'abocament del mateix al medi és un problema de consideració, sobretot si tenim en compte la presència de sulfurs i metalls pesats com el Crom.

En aquest treball es construeix a escala de laboratori un aiguamoll artificial de flux sub-superficial per a la seva avaluació en la remoció de crom de les aigües residuals de la indústria, obtenint una eficiència entre el 88% i el 92%. Aquest és l'element de major interès en el treball, ja que és conegut el dany que representa per a la salut humana i el medi ambient en ser aquest un element persistent.

Paraules claus: Metalls pesants; crom; aiguamolls; contaminació; aigües residuals.

*Autor para la correspondencia: mayrav81@yahoo.es

INTRODUCCIÓN

Los Humedales presentan un atractivo potencial para el tratamiento, de aguas residuales con cargas contaminantes de metales pesados principalmente en países en vías de desarrollo: Algunas de sus ventajas son:

- Fijan físicamente los contaminantes a la superficie del suelo y la materia orgánica.
- Utilizan y transforman los elementos por medio de los Microorganismos y plantas.
- Logran niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y bajo costo por mantenimiento.

Las unidades de proceso convencionales de tratamiento primario y secundario en las plantas de tratamientos de aguas residuales municipales son inadecuadas para el tratamiento eficaz de metales pesados. Procesos avanzados, incluida la precipitación química, electrolisis, ósmosis inversa e intercambio iónico, son usados para el pretratamiento de aguas residuales industriales. El uso de estos procesos tiene la desventaja de un costo de capital alto, así como de funcionamiento y mantenimiento, las desventajas adicionales pueden ser costos de energía eléctrica relativamente altos para la osmosis inversa y electrolisis, además de la producción de grandes cantidades de lodos voluminosos con un alto tiempo de decantación en los procesos de precipitación química.

En países en vía de desarrollo ha sido un problema la implementación y sostenimiento de las tecnologías convencionales para el tratamiento de este tipo de residuales cargado fundamentalmente por metales pesados, dado el alto costo de adquisición de la tecnología, altos costos de operación y mantenimiento de las mismas, así como el nivel de preparación del personal operario de estas. (Duran, N. P.; Osorio, A, 2003)

Este trabajo aborda la evaluación de la remoción del Cromo con la tecnología de Humedales

Flujo Subsuperficial horizontal (FS) por presentar las siguientes ventajas:

- Proporcionan tratamiento eficaz utilizando mecanismos naturales, minimizando la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y alta calificación del personal de mantenimiento.
- Son muy efectivos en la disminución de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO), los sólidos suspendidos totales (SST), el nitrógeno (NT) y el fósforo (PT), además de otros compuestos orgánicos refractarios de las aguas residuales domésticas.
- No se producen biosólidos, ni lodos residuales en cortos periodos de tiempo que requerirían tratamiento subsiguiente y disposición.
- Su operación a nivel de tratamiento terciario avanzado puede realizarse durante todo el año en climas tropicales ó subtropicales.
- La configuración de los humedales FS proporciona una mayor protección térmica que los humedales FLS.
- El Proceso de construcción suele ser menos costoso, así como su mantenimiento, que los procesos mecánicos de tratamiento diseñados para un nivel equivalente de calidad de efluente
- Con una operación y mantenimiento adecuado donde se mantenga el nivel subsuperficial del agua resi-

dual a tratar, se evitan problemas de proliferación de mosquitos y otros insectos vectores.

- También se elimina el riesgo de que personas y mascotas u otros animales del entorno, tengan contacto directo con el agua residual en el proceso de tratamiento.

Desventajas:

- Estos sistemas requieren mayor área que los sistemas artificiales convencionales de tratamiento.
- Por poseer la mayor parte del agua residual interna en condiciones anóxicas, la nitrificación del amoníaco del agua residual está condicionada al dimensionamiento del sistema.
- No pueden ser diseñados para lograr una remoción completa de compuestos orgánicos, SST, nitrógeno o bacterias ya que los ciclos ecológicos en estos humedales producen concentraciones naturales de esos compuestos en el efluente.

En el estado del arte, aparecen alusiones a mediciones realizadas sobre humedales naturales capaces de remover ciertas cargas de metales pesados, así como otros humedales construidos fundamentalmente en países desarrollados con climas fríos, con el fin de tratar aguas residuales domesticas (DBO, DQO, NT, KT, SST, etc.), que han reportado también remoción de cierta cantidad de metales con una alta eficiencia. Por lo tanto la evaluación de esta tecnología bajo las condiciones climáticas en Cuba sería un gran paso de avance, para su posible generalización a las industrias que presentan entre sus limitaciones el inadecuado tratamiento de sus efluentes con cargas de metales pesados. (Vélez, M. E; Paredes, D.2005)

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la construcción del Humedal a escala de laboratorio se emplearon, dos canales de Zinc galvanizado protegidos con pintura anticorrosiva para evitar la oxidación de los mismos, formando con ellos el modelo en paralelo, para la validación de los resultados,

Se valoraron dos tipos de plantas fundamentalmente, por ser estas las mejor adaptadas al medio circundante (medio semi marino), espadañas (Typhasp) y junco (Juncuseffusscirpus), decidiéndose finalmente por la segunda por ser esta visualmente la mejor adaptada, además de ser la de mayor producción de biomasa y mayor tasa de crecimiento por lo que se asumió que genera más espacios en su estructura interna en igual tiempo para la bioacumulación del Cromo.(Romero M.2009).

Las plantas se obtuvieron de un ecosistema próximo al punto de establecimiento del experimento (la cuenca de una vaguada) y las mismas fueron sembradas en el humedal en posturas, y a una distancia aproximadamente de 30 cm una de otra.(figura 1)

Aspectos constructivos:

Los aspectos más importantes a tener en cuenta para la construcción del humedal fueron básicamente:

- La impermeabilización de la capa inferior de terreno lo cual no constituyó problema al tener el lecho canalizado, pudiéndose contactar por inspección visual la total impermeabilización del lecho soporte.

- La selección y colocación del medio granular utilizándose grava de tamaño medio y pequeña, además de un delgada capa de arcilla.
- El establecimiento de la vegetación,
- Y por último las estructuras de entrada y de salida, donde el diámetro de la grava utilizado fue aproximadamente de 50 mm.

Para evitar problemas hidráulicos desde el punto de vista constructivo, se diseñó el humedal con una pendiente de fondo del 5 % capaz de permitir un drenaje completo cuando sea necesario y una salida de altura variable.

Dentro del humedal se habilitó un punto intermedio de muestreo, para analizar el tratamiento a diferentes profundidades y poder valorar los efectos de la profundidad sobre los procesos de remoción y acumulación de los metales en el lecho del humedal.

Luego del montaje del lecho del humedal, se comprobó que el mismo tuviera una buena conductividad hidráulicas con agua limpia, para verificar los posibles problemas de atascamiento, las llamadas zonas muertas con el fin de probar que el nivel de agua fuera de tipo subsuperficial.

Posteriormente, se procedió con la siembra de las plantas mencionadas anteriormente, al comprobarse la adaptación de las mismas al nuevo medio y el paso del estrés postsiembra, se comenzó con el vertido del agua residual.

Modelo General de Diseño

Los humedales artificiales pueden ser considerados como reactores biológicos, y su rendimiento puede ser estimado mediante una cinética de primer orden de flujo a pistón. (González D.2011)

Para el siguiente trabajo se consideró que no existirán pérdidas por infiltración al suelo de agua residual, además de considerar una ganancia por precipitación igual a las pérdidas por evapotranspiración, por lo que para el diseño se presupuso que el caudal de entrada era igual al de salida. Para tener un punto de partida se calculó el caudal que debiera circular para obtener una eficiencia del 85%, y conociéndose todas las dimensiones, la características del medio soporte se llegó a un caudales igual a 0,108 m³/d, lo cual sugería un tiempo de retención muy elevado.

Determinación del área superficial.

Entre los parámetros fundamentales de diseño del humedal está el área superficial, el flujo promedio a través del humedal y el tiempo de retención hidráulica.

Combinando la ecuación básica de los reactores a flujo pistón $\frac{C_e}{C_o} = e^{-Krt}$ y la del tiempo de retención hidráulica $t = \frac{LW}{Q}$ llegamos al modelo de Reed, Sherwood C. para calcular el área superficial.

$$A_s = L * W = \frac{Q * [LnC_o - LnC_e]}{K_r * h * n}$$

$$A_s = \frac{Q * [Ln(6.8) - Ln(1)]}{1,104 * 0,25 * 0,38} = 0,5046 \text{ m}^2$$

$$Q = \frac{1,104 * 0,25 * 0,38}{0,5046 * [Ln(6.8) - Ln(1)]} = 0,108 \text{ m}^3 / d$$

Donde:

As: área superficial del humedal. (m²).

L: longitud de la celda del humedal. (m)

W: ancho de humedal. (m)

Q: flujo promedio a través del humedal (m³/d)

Co: concentración del contaminante a la entrada del humedal. (mg/L).

h - profundidad del lecho (m)

n - porosidad del medio (como fracción de 1)

KT - constante de velocidad de reacción del sistema (d-1)

Determinación del tiempo de retención hidráulico.

$$TRH = \frac{A_s * h * n}{Q} = \frac{0,5046 * 0,25 * 0,38}{0,108} = 0,44 \text{ días} = 10,56 \text{ horas}$$

La ley de Darcy describe el régimen de flujo en medio poroso que es lo generalmente aceptado para el diseño de humedales de flujo sub-superficial usando grava y arcilla como medio del lecho (donde se produce un flujo laminar). Los resultados de la misma dieron.

$$Q = \frac{h^2 * w * m * k_s}{L} = \frac{(0,25)^2 * 0,6 * 0,05 * 12500}{L} = 23,44 \text{ m}^3 / d$$

Para un tiempo de retención de T= 0,002 días=0,05 horas La conductividad hidráulica se obtuvo de la siguiente tabla relacionada con el tamaño del material de relleno y la porosidad. Para un diseño conservador se escogió 1/2 de la Ks.

Tabla 1 Características de los medios empleados en los sistemas con flujo subsuperficial (Reed et al, 1995)

Tipo de medio	Tamaño efectivo D ₁₀ (mm)	Porosidad (n)	Conductividad hidráulica (ks) m ³ / m ² . d
Arena gruesa	2	28-32	100-1000
Arena gravosa	8	30-35	500-5000
Grava fina	16	35-38	1000-10000
Grava media	32	36-40	10 000-50 000
Roca gruesa	128	38-45	50 000-250 000

Por lo que se analizó el resultado para 10 horas; 5 horas; 1 hora; 30 min y 5 min de tiempo de retención.



Figura 1 Humedal a escala de laboratorio.

Caracterización del Residual de la Tenería

La caracterización del agua residual de la Industria fue realizada por el Laboratorio de calidad del agua de la UEB Análisis y Servicios Técnicos de Villa Clara y la misma está basada en el Estándar Methods for Examination of Water and Wastewater. El método para la determinación del Cromo fue el de Absorción Atómica, sin proceder a la determinación de la concentración de las especies del mismo, sino como Cromo total.

Los resultados obtenidos por el laboratorio se reflejan a continuación:

La Zanja (A) vierte las etapas de pre-curtido, curtido y pre-acabado y en zanja (B) vierte la etapa de acabado y cocción de la carnaza.

Tabla. 2 caracterización del agua residual de la tenería

PARAMETRO	ZANJA A	ZANJA B
pH	8.85	7.63
Grasas (mg/L)	692	9033
DQO (mg/L)	9991	2055
DBO ₅ (mg/L)	4076	9357
Nt (mg/L)	36	138
Conductividad μ mhos/cm ²	4480	3550
S ⁻² (mg/L)	158	23
Ca ⁺² (mg/L)	159	165
Cr (total) (mg/L)	7.3	1.5
ST(mg/L)	8868	20199
Alcalinidad	617	2586

Como se observa en la tabla 3 los caudales en las tres zanjas presentan variabilidad, ya que la producción es irregular con muchas paradas en el proceso de producción y los caudales obtenidos son función de la cantidad de materia prima procesada en los instantes de la medición por lo que fueron resumidos y promediados para la obtención de datos guías, los que deben ser precisados para la ejecución de un proyecto ejecutivo, en función de la capacidad máxima de producción de la planta y la norma de consumo para cada proceso.

Tabla 3 Caudales a Procesar.

Caudales	Zanja A	Zanja B	total
Q mínimo (L/s)	0.55	0.45	1.00
Q promedio (L/s)	5.79	1.37	7.16
Q máximo (L/s)	10.25	5.90	16.15

Debe señalarse la alta concentración de grasas en los residuales, lo que hace que la actividad biológica se inhibe por la limitación de la transferencia de oxígeno al agua residual, trayendo consigo la no obtención de los resultados esperados del sistema de tratamiento diseñado, por lo que se deberá construir como pretratamiento una trampa de grasa, la cual debe recibir mantenimiento periódico, con el fin de eliminar dichas grasas de los vertimientos.

RESULTADOS OBTENIDOS

Las mediciones fueron realizadas para los diferentes tiempos de retención expresados en la tabla:

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Como se puede apreciar en la tabla 4, el humedal presenta una alta eficiencia en la remoción del Cromo total, notán-

dose una pequeña variación en descenso en la medida en que disminuyó el tiempo de retención., observándose una mayor eficiencia para 10 horas del 91,1 % y la menor eficiencia para 5 min de 79,3 %. Por lo que se puede apreciar una alta estabilidad en la remoción del Cromo total prácticamente independiente del tiempo de retención lo que puede estar asociado a la gran capacidad de acumulación de este metal en el lecho soporte debiéndose experimentar a más largo plazo el comportamiento del humedal, puede inferirse la alta remoción de la concentración de Cromo asociada a la alta eficiencia de la remoción de sólidos totales siempre por encima del 93 %, conociéndose que una porción del Cromo total puede estar expresada en sólidos solubles o en compuesto de este elemento fácilmente eliminados a través de los procesos de Filtración, sedimentación y precipitación por lo que se debe estudiar el comportamiento de las diferentes especies del Cromo en el Proceso de Remoción. Otra hipótesis de los resultados, podría estar asociada con la afinidad molecular por ciertas partes de la planta (raíz-hojas y tallos) preferiblemente por acumularse en la raíz en el caso del junco, lo cual ha sido planteada por diferentes autores

Dada la incógnita del comportamiento en el proceso de remoción del Cromo con la presencia de alta carga orgánica (DBO₅ > 5000) se hace necesario evaluar este obteniéndose como resultados altas eficiencias para la DBO₅ no obstante esto nos sugiere que los procesos físicos, químicos y biológicos que intervienen en la remoción de uno no interfieren con los ocurridos en la remoción del otro más bien parecen complementarse.

CONCLUSIONES

Del trabajo realizado resulta oportuno destacarlos siguientes aspectos y consideraciones:

- La tecnología de humedales de flujo subsuperficial horizontal propuesta para el tratamiento de aguas residuales cargadas con Cromo, en base a la cual se efectuarán los procesos de depuración y remoción de los residuales líquidos provenientes de la Tenería Caibarién, garantiza la reducción y disminución de los niveles de contaminación iniciales, hasta niveles permisibles establecidos por las Normas Vigentes.
- Se considera que la remoción de metales es semejante a la remoción del fósforo; sin embargo, poco se conoce acerca de los mecanismos que ocurren. Entre los mecanismos propuestos se incluyen la adsorción, sedimentación, precipitación química y toma por las plantas. Al igual que lo que se plantea para el caso del

Tabla 4 Parámetros a la salida del humedal en función del tiempo de retención.

Parámetros	Ce	TR=10 h		TR=5 h		TR=1 h		TR=30 min		TR=5 min	
		Cs	%	Cs	%	Cs	%	Cs	%	Cs	%
Temperatura (°C)	20.5	20.2	-	20.5	-	20.8	-	20.4	-	20.5	-
pH	8.61	8.54	0.9	8.50	0.86	8.58	0.58	8.58	0.58	8.60	0.59
Sólidos totales mg/L	11036	30	99,7	185	98,3	252	97,7	248	97,7	678	93,8
Grasas y Aceites mg/L	1734	776	55,2	838	51,6	852	50,9	869	49,9	1056	39,1
Conductividad μ mhos/cm ²	4302	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DBO ₅ mg/L	5087	407	92	493	90,3	610,4	88	549,4	89,2	712,18	86
DQO mg/L	8473	895,4	89,4	1183,2	86	1538,2	81,8	1346	84,1	1566,8	81,51
Cromo total mg/L	6,19	0,55	91,1	0,71	88,6	0,68	89	0,84	86,4	1,28	79,3
Sulfuros mg/L	132,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

fósforo, los metales pueden liberarse durante cierto periodo, los cuales se han asociado a cambios en los potenciales redox dentro del sistema.

- Según estudios reportados por diferentes autores la eliminación de los metales será por absorción de la planta lo cual se ha corroborado en el caso del junco (*Juncus effusus*) que es mayor en la raíz, y por precipitación en el lecho soporte.
- La tecnología propuesta aporta nuevos valores estéticos a la instalación, siendo congruente en la visual del área, dando tratamiento a las aguas residuales con la mínima introducción de tecnologías agresivas al medio y al entorno natural, abriendo espacios además para el desarrollo de la biodiversidad en el área.
- El nivel de agua sub-superficial en este tipo de humedal no provoca la proliferación de mosquitos y otros vectores

RECOMENDACIONES

- Se debe continuar con la experimentación de este tipo de tecnologías para evaluar su funcionamiento a largo plazo, ya que los resultados obtenidos pudieran estar sujetos a la disponibilidad de espacios para la absorción y disposición del metal en el medio utilizado como lecho soporte, por lo que la eficiencia puede disminuir una vez alcanzado el estado de equilibrio, en seno del humedal.
- La utilización de macrófitas en el tratamiento de aguas residuales con contenido importante de metales pesados, debe ser manejada con responsabilidad, por un lado no deben estar expuestas a los animales que hacen parte de la cadena alimenticia de los seres humanos y por otro lado cuando se evalúe la disposición de macrófitas que hicieron parte del tratamiento de aguas residuales con contenido de metales pesados se deben realizar ensayos que muestren la acumulación total que alcanzaron las macrófitas tanto raíz como en hojas y tallos.
- Se debe evaluar la eficiencia en la remoción de las diferentes especies del Cromo, haciendo énfasis en el Cromo VI.
- Como plantas emergentes para la depuración en el humedal se pueden emplear las llamadas ornamentales, siempre que sean plantas adaptables a la humedad.
- Evaluar la tecnología a escala Piloto, y a escala natural.

BIBLIOGRAFÍA

1. Duran, N. P.; Osorio, A.; García, L. M. Evaluación de la remoción de cromo hexavalente y zinc en agua residual sintética utilizando humedales de flujo subsuperficial plantados con typha, junco y heliconia usando como medio soporte arena y grava. Tesis. Universidad Tecnológica de Pereira. Escuela de Química. Programa en Química Industrial. Pereira. 2003.
2. González D. Metodología para el diseño de humedales con flujo subsuperficial horizontal INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL, VOL. XXXII, No. 1, Ene-Abr 2011, p. 61-70
3. Estrada G Islena Monografía sobre humedales artificiales de flujo de subperficial para remoción de metales pesados en aguas residuales.<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/1833/1/333918E82.pdf> 2010
4. Fernández, J.; De Miguel, E.; De Miguel, José; Curt, M. D.; Manual de fitodepuración. Filtros de macrófitas en flotación. Fundación Global Nature. Universidad Politécnica de Madrid. 2001. p. 31-39.
5. Garcia, J., Aguirre, P., Mujeriego, R., Huang, Y., Ortiz, L. y Bayona, J.M. Initial contaminant removal performance factors in horizontal flow reed beds used for treating urban wastewater. *Wat. Res.* 2004, 38 (7), 1669 -1678
6. Hoffmann H., Platzer C, Winker M. echnology Review of Constructed Wetlands Subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/Revisi%C3%B3n%20T%C3%A9cnica%20de%20Humedales%20Artificiales.pdf Febrero 2011
7. Jacob, D.L., Otte, M.L. 2003. Conflicting processes in the wetland plant rizosphere: metal retention or mobilization? *Water Air Soil Pollut.* 3: 91- 104.
8. Mara, DD. Domestic wastewater treatment in developing countries. *Earthscan*, Londres. pp. 85? 187. (2003).
9. Mays, P.A., Edwards, G.S. 2001. Comparison of heavy metal accumulation in a natural wetland and constructed wetlands receiving acid mine drainage. *Ecol. Eng.* 16: 487-500.
10. Romero, J. A. Tratamiento de Aguas Residuales Teoría y Principios de Diseño. 3 ed. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería. 2008. p. 17-899. ISBN: 958 -8060-13-3.
11. ROMERO M.- COLÍN-A. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES POR UN SISTEMA PILOTO DE HUMEDALES ARTIFICIALES: EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE LA CARGA ORGÁNICA *Rev. Int. Contam. Ambient.* 25 (3) 157-167, 2009
12. Sasaki, K., Origo, T., Endo, Y., Kurosawa, K. 2003. Field study on heavy metal accumulation in a natural wetland receiving acid mine drainage. *Mater. Trans.* 44(9): 1877-1884.
13. United States Environmental Protection Agency (US EPA). Manual: Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. Office of Research and Development. Cincinnati. 2000. p. 12-97. EPA/625/R 99/010.
14. US EPA. Design Manual Constructed Wetlands for Municipal Wastewater Treatment, US EPA CERL, Cincinnati, Ohio, 2000.
15. Vélez, M. E; Paredes, D. Efecto de la adición de materia orgánica y tipo de flujo en la remoción de cromo y zinc mediante humedales. Tesis Maestría en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. 2005
16. Valles A. Retención de arsénico en humedales construidos *Rev. Int. Contam. Ambie.* 30(2)143-148, 2014 Water Environment Federation. Natural Systems for Wastewater Treatment, MOP *FD-16, WEF, Alexandria, Virginia*, 2000.
17. Ye, Z.H., Whiting, S.N., Lin, Z.Q., Lytle, C.M., Qian, J.H., Terry, N. 2001. Removal and distribution of iron, manganese, cobalt and nickel within a Pennsylvania constructed wetland treating coal combustion by-product leachate. *J. Environ. Qual.* 30: 1464-1473.