

ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUALES GALVÁNICOS CON ZEOLITAS NATURALES.

ALTERNATIVE FOR THE TREATMENT OF RESIDUAL GALVANIC WITH NATURAL ZEOLITAS.

Hayat Hernández Núñez ⁽¹⁾, Yamilet Zabala Martínez ⁽¹⁾ Jesús Pérez Olmo ⁽²⁾ Esteban Alfonso Olmo ⁽³⁾

En esta investigación se realiza la evaluación de una zeolita natural proveniente del yacimiento de Tasajeras, Villa Clara, para la eliminación de iones metálicos (cobre y hierro) contaminantes de aguas residuales producidas por una planta galvánica. En el trabajo se proponen alternativas de esquemas tecnológicos para la planta de tratamiento compuesta por este material de procedencia nacional, diseñados a partir de los resultados obtenidos a escala de laboratorio con estudios cinéticos, de capacidad de adsorción de la zeolita y se analiza la influencia sobre este parámetro de la granulometría del material y el flujo de entrada a la columna. Para ello se llevan a cabo ensayos experimentales que permitan realizar un estudio cuantitativo de los metales presentes en estas aguas y su comportamiento al ponerse en contacto con este material natural, estableciéndose los parámetros fundamentales para su eliminación. Al finalizar el estudio se selecciona un esquema tecnológico analizando factores económicos y las dimensiones de la planta.

Palabras clave: zeolitas, tratamiento de residuales, metales pesados.

In this research the evaluation of a natural zeolite from the site of Tasajeras, Villa Clara is done, for removing metal ion (copper and iron) of wastewater contaminants produced by a galvanic plant. At work technological schemes alternatives are proposed for the treatment plant comprising for this material from national sources, designed from the results obtained in laboratory scale with kinetic studies adsorption capacity of the zeolite and the influence on this parameter is analyzed on the granulometry of the material and the inflow to the column. For this purpose, experimental tests are carried out that allow a quantitative study of the metals present in these waters and their behavior to contact this natural material, establishing the basic parameters for disposal. At the end of the study a technology scheme is selected by analyzing economic factors and size of the plant.

Keywords: zeolites, wastewater treatment, heavy metals.

Recibido: 9 de marzo de 2016

Aprobado en su forma original: 19 de abril del 2018

(1) Centro de Investigación y Desarrollo Técnico, Calle E N^o 20724 entre carretera Varona y 1^{ra}, Trigal, Boyeros, La Habana, Cuba cidt@mn.mn.co.cu

(2) Facultad de Ingeniería Química, ISPJAE, La Habana, Cuba

(3) Centro de Investigaciones de la Industria Minero Metalúrgica, La Habana, Cuba

El término galvanoplastia se refiere al proceso en el que se recubre un metal con otro por medio de electrólisis [Ecured, 2015], es la electrodeposición de un metal sobre una superficie con el objetivo de mejorar sus características y propiedades [Wikipedia, 2015]. Es por ello que tiene gran aplicación en electrónica, joyería, industria pesada y automoción, entre otras. Esta industria es una de las que mayor cantidad de residuales de alta toxicidad produce en Cuba y el resto del mundo, lo que la convierte en un reglón de la economía ecológicamente problemático [Chabalina, 2002]. Esto se debe a la utilización de sustancias destinadas a tratamientos de recubrimientos principalmente en diferentes etapas de metalizado y ataque químico, que causa que los iones de metales pesados tales como cobre, zinc, cadmio, cromo, níquel, hierro y plata, con frecuencia estén presentes en el efluente resultante, generando una amplia afectación a los ecosistemas debido a la peligrosidad de estos elementos, algunos de ellos incluso en concentraciones muy bajas [Pavón, 2000].

En el caso particular de los suelos, suelen afectar la fertilidad y/o el uso posterior de los mismos, mientras que en el caso de los sistemas acuíferos y las aguas superficiales, pueden comprometer seriamente el uso de este recurso como fuente de agua para el consumo humano [Guillén, 2011].

La contaminación por metales pesados tiene particular incidencia sobre los medios acuáticos, que puede ser el destino final de efluentes industriales y domésticos de determinadas regiones [Rosabal, 1998]. Al ser desechados al drenaje, estos son capaces de alterar la cadena de vida de varias especies, y cuando las aguas de desecho se utilizan para el riego pueden ocasionar daños severos en la salud del hombre.

En la actualidad, la remoción de iones metálicos en efluentes líquidos industriales, representa una obligación, no solo desde el

punto de vista medioambiental, sino también social, legal y económico, por lo que a lo largo de los años se han desarrollado diferentes tecnologías con este fin.

Los procesos de remoción de metales que se emplean actualmente, permiten en su mayoría la posterior reutilización de los líquidos limpios pero algunos tiene la característica de generar residuales de regeneración con mayores índices de contaminantes que los iniciales. Entre estos métodos se encuentran la precipitación química, la recuperación con disolvente, técnicas de adsorción, de intercambio iónico, los procesos basados en la tecnología de membranas y las técnicas electroquímicas [Rojas, 2008].

Estos métodos, generalmente son eficientes, aunque algunos, como la precipitación, no logran eliminar concentraciones bajas de metales. Su principal desventaja radica en el aspecto económico, ya que, la mayoría requiere tecnologías o materiales procedentes de países desarrollados y capitalistas, por lo que a los altos costos y fletes, se le suma el peligro de que su compra se vea afectada por el embargo económico al que nuestro país se enfrenta. De ahí la necesidad de búsqueda de materiales y tecnologías que permitan resolver el problema de la potencial contaminación que representan los residuales cargados de metales pesados y su consiguiente daño ambiental, a partir del aprovechamiento de recursos naturales y de procedencia nacional.

En los últimos años ha atraído la atención de muchos investigadores, las reconocidas propiedades físicas y químicas de los minerales zeolíticos, para múltiples usos, entre ellos la remoción de metales pesados de efluentes líquidos. Se han llevado a cabo múltiples trabajos e investigaciones en este ámbito, demostrando en diferentes condiciones que esta es capaz de ser utilizada como intercambiador catiónico para tratar residuales con estas características.

Nuestro país posee alrededor 23 yacimientos de zeolitas de gran calidad y 4 plantas procesadoras del mineral, lo que hace posible el aprovechamiento de este para diversos fines industriales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Instrumentos, materiales y equipos

La cuantificación de los iones metálicos de las muestras de agua residual, fue realizada mediante un Espectrómetro de Absorción Atómica, modelo NovAA 300 de la firma alemana AnalytikJena. La pesada del material zeolítico empleado se realizó mediante una Balanza Digital Analítica Sartorius BP61S, de precisión 0.1mg, procedente de Alemania, mientras que para las pruebas en columnas se utilizó una Bomba peristáltica MasterFlex para impulsar el fluido hacia la entrada de las columnas de laboratorio cuyas dimensiones fueron de 2,4 cm de diámetro y 15 cm de altura.

Colección, preparación de muestra, experimentación.

Las muestras de agua residual contenida en la cisterna de almacenamiento fueron extraídas en la superficie y el centro, con un recipiente de polietileno de boca ancha. Las mismas fueron filtradas en un equipo al vacío y conservadas a pH menor de 2 hasta su análisis por la técnica de Espectrometría de Absorción Atómica (EAA).

Los experimentos para determinar el tiempo de equilibrio y la construcción de las isothermas, fueron realizados empleando sistemas en batch, los datos fueron procesados utilizando el programa computacional *Microsoft Excel* así como para el ajuste de los modelos probados, para determinar los mejores ajustes fue empleado *Microsoft Excel Solver*.

Las pruebas realizadas para determinar la influencia del flujo de operación y la granulometría en la capacidad de adsorción

Este trabajo persigue el objetivo de evaluar una alternativa para el tratamiento de residuales galvánicos basada en este material natural y de producción nacional para su empleo en la remediación de los residuales de una planta de producción de circuito impreso.

del material, fueron llevadas a cabo empleando sistemas en columnas, cuyas dimensiones fueron especificadas anteriormente. Esto se realizó mediante el análisis de la información obtenida de la construcción de las curvas de ruptura, tal como el volumen o punto de ruptura (V_b), el volumen o punto de saturación (V_s), la longitud de la banda de adsorción o de intercambio (δ), entre otras.[Chudoba, 1986] De acuerdo con los resultados obtenidos de las curvas de ruptura fue calculada para cada columna, la capacidad de adsorción total (q), considerando toda la masa de iones metálicos retenidos en la columna hasta el punto de saturación de la misma y la capacidad aparente máxima ($a_{m\acute{a}x}$), para la cual se consideró la masa de los iones metálicos retenidos en la columna solamente hasta el punto de ruptura. Ambas variables se expresan en unidades de masa de metal retenido/masa de zeolita empleada.

Caracterización del agua residual proveniente de la cisterna de almacenamiento de la planta de circuito impreso.

En el año 2010 fue analizados mediante Espectroscopia de Emisión Atómica por Plasma Acoplado Inductivamente (EEA-PAI) los metales que de acuerdo con el proceso productivo pudieran formar parte del residual por [Matos, 2011], estos podían ser cobre, hierro, plata, cadmio, estaño y paladio [Matos, 2011]. Este estudio demostró que los metales que mayoritariamente se encuentran en este residual son la plata, el cobre y el hierro, siendo estos dos últimos los que se

encuentran por encima de los límites establecidos por la Norma Cubana NC24 [NC, 1999]. Mediante la técnica de EAA se analizaron los metales que mayoritariamente están presentes en el residual.

Para la medición por EAA fueron confeccionadas varias curvas de calibración para cada metal. Estas fueron preparadas a partir de patrones de referencia certificados de 1000 mg.L^{-1} cada uno, a los cuales se le realizaron diluciones hasta obtener concentraciones conocidas de 0, 1, 2, 3, 4 y 5 mg/L. Los valores de absorbancia se midieron por EAA.

Caracterización de la zeolita empleada. Acondicionamientos previos.

La zeolita que fue empleada para realizar los experimentos en este trabajo pertenece al yacimiento de Tasajeras, Ranchuelos, ubicado en Remedios en la provincia de Villa Clara, la cual contiene 53% de clinoptilolita-heulandita y un 25 % de mordenita [Cano, 2013]. Para las pruebas realizadas en batch, fue empleado un material con un diámetro de partícula entre 1 y 3 mm, mientras que para las pruebas realizadas en columna, se utilizaron varias granulometrías para conformar los lechos empleados; estas fueron de 1-3 mm y de 0,4-1 mm.

La zeolita fue acondicionada mediante el lavado varias veces con agua para eliminar las impurezas y polvos que contiene. Seguidamente fue oreada durante 24 horas para eliminar el agua que esta absorbe durante la operación anterior.

Determinación del tiempo de equilibrio.

Para la determinación del tiempo en el cual se alcanza el equilibrio en este sistema, se tomaron alrededor de 15 muestras de 100 mL de residual cada una, las cuales se pusieron en contacto con 3g del material zeolítico a diferentes valores de tiempo mediante agitación en zaranda. Luego, fueron filtradas y medidas las concentraciones de los metales de interés

en la solución para cada uno de los tiempos seleccionados empleando la técnica de EAA. Este experimento fue realizado a temperatura ambiente en un tiempo máximo de 540 minutos (9 horas) y se analizaron las muestras en 15 intervalos de tiempo.

Construcción de la isoterma de adsorción y ajuste del modelo que describe el proceso.

La isoterma fue construida manteniendo constantes el tiempo de contacto, la concentración inicial de los metales, y el volumen de residual tomado. Para ello se puso en contacto el residual con 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6 y 6.5 g de zeolita respectivamente. Luego de transcurrido el tiempo establecido, las muestras fueron filtradas y la concentraciones de los metales presentes en la solución se determinaron por EAA. Los modelos probados fueron las isotermas de Freundlich y de Langmuir.

Efecto del flujo de operación.

Para la realización del experimento se empleó 50 g de zeolita (1-3) mm, ocupando una altura de lecho de 10 cm. Se ensayaron tres flujos de operación (1.5, 6 y 10 mL/min).

Las muestras fueron colectadas a la salida de la columna en determinados intervalos de volúmenes. Para determinar preliminarmente el punto de ruptura, se realizó un análisis cualitativo de cobre mediante la adición de algunas gotas de sulfuro de sodio (NaS) al 60%, indicando la presencia del metal en la solución por la formación de un precipitado de color negro, lo cual es señal del comienzo de la saturación del material zeolítico. Luego se analizaron las concentraciones de cobre y hierro por EAA.

Efecto de la granulometría.

Para determinar la influencia que tiene sobre la remoción de iones cobre el tamaño de la partícula de zeolita, se realizaron

pruebas con 2 granulometrías industriales del material, (1-3) mm, y (0,4-1) mm. Se ensayaron los mayores valores de flujo empleados en el experimento anterior (6 y

10 mL/min). En la experimentación se emplearon 50 gramos del material zeolítico y una altura de lecho en la columna de 10 cm.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización del agua residual proveniente de la cisterna de almacenamiento de la planta de circuito impreso.

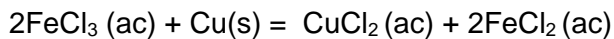
En la **tabla 1** se muestra la concentración de los iones metálicos que constituyen mayoritarios en la cisterna.

Tabla I. Concentraciones de metales en la cisterna de almacenamiento.

Metal	Concentración (mg/L)
Cu	57,725
Fe	5,560

Los metales presentes son provenientes en su mayoría de la etapa de ataque químico, en la cual se emplea el reactivo cloruro de

hierro (III) para eliminar las partes de cobre de la lámina que no han sido protegidas. En esta etapa se produce la siguiente reacción:



(1)

Los iones de cobre son aportados a la cisterna mediante el agotamiento o contaminación del baño de cobre electrolítico, lo cual justifica los altos valores de este metal en el residual.

El pH del agua residual se encuentra alrededor de los 3,45, por lo que se puede observar que es ácido.

Determinación del tiempo de equilibrio.

En la **figura 2 y 3** se puede apreciar la variación de la capacidad aparente de

adsorción de cobre y hierro respectivamente, al transcurrir el tiempo de contacto del residual con el material zeolítico empleado hasta alcanzar el equilibrio. El equilibrio en estos sistemas se alcanza al transcurrir los 360 minutos o las 6 horas de reacción para el metal cobre y a los 300 minutos o las 5 horas para el metal hierro. El modelo cinético de primer orden mostró un buen ajuste para ambos metales, como se puede observar en dichas figuras.

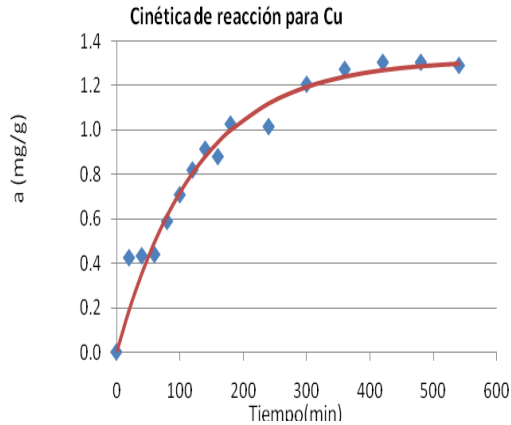


Figura 2. Capacidad aparente de adsorción de Cu vs tiempo en minutos.

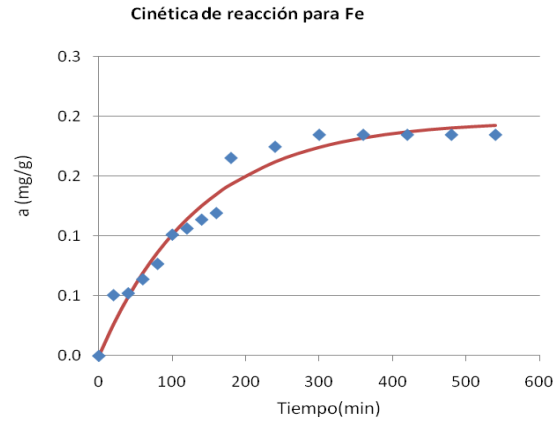


Figura 3. Capacidad aparente de adsorción de Fe vs tiempo en minutos.

La ecuación del modelo cinético de primer orden es la que se muestra a continuación en (2):

$$a = a_{m\acute{a}x} (1 - e^{-kt}) \tag{2}$$

En esta ecuación, k, es la constante cinética, t representa la variable independiente tiempo y $a_{m\acute{a}x}$ representa la capacidad aparente máxima. Las

constantes del modelo fueron calculados mediante Solver. En la tabla 2 que se muestra a continuación se pueden observar los parámetros del modelo de primer orden

Tabla 2. Parámetros obtenidos del ajuste del modelo cinético.

Cobre		Hierro	
Parámetros	Valor	Parámetros	Valor
$a_{m\acute{a}x}$ (mg/g)	1,32	$a_{m\acute{a}x}$ (mg/g)	0,19
K (min^{-1})	0,0079	K (min^{-1})	0,0072
SCD	0,084	SCD	0,002

Construcción de la isoterma de adsorción y ajuste del modelo que describe el proceso.

Con los resultados obtenidos de la variación de concentración de cobre y hierro para diferentes cantidades de zeolita, fue posible la construcción de los gráficos de capacidad aparente en función de la concentración de cobre y hierro en la solución, respectivamente (figuras 4 y 5). En ellas se observa el ajuste del modelo de Langmuir que fue realizado primeramente empleando una linealización de este para determinar la

capacidad aparente máxima de adsorción ($a_{m\acute{a}x}$) y la constante de Langmuir (b). A través de la herramienta Solver de Microsoft Excel fue posible determinar los parámetros óptimos del modelo que fueran más fieles a los datos experimentales graficados, encontrándose un buen ajuste de los valores experimentales para este modelo. En la figura 5 fueron eliminados los puntos experimentales correspondientes a las concentraciones de hierro que no son detectadas por el equipo de medición empleado.

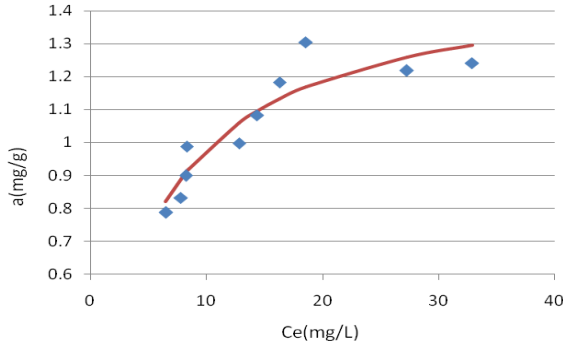


Figura 4. Capacidad aparente vs concentración de cobre de equilibrio.

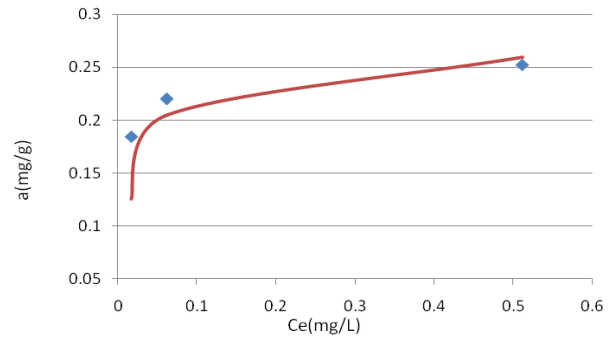


Figura 5. Capacidad aparente vs concentración de hierro de equilibrio.

En la **tabla 3** se muestran los parámetros de la isoterma de Langmuir para hierro y cobre.

Tabla 3. Parámetros de la isoterma de Langmuir.

Parámetros	$a_{m\acute{a}x}(mg/g)$	$b (L/mg)$
Cobre	1,51	0,18
Hierro	0,26	51,47

Determinación del flujo de operación.

Las curvas de ruptura para los flujos de residual probados (1,5; 6 y 10) mL/min, fueron construidas a partir de

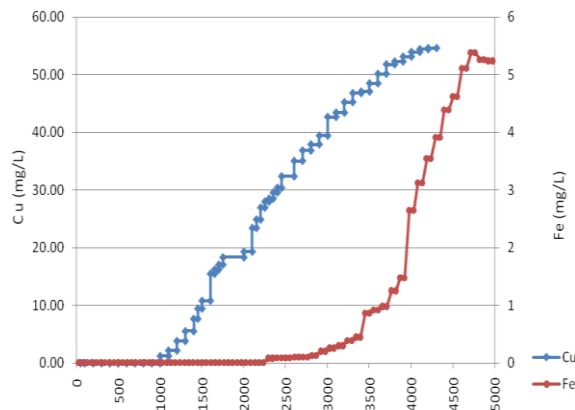


Figura 6. Concentración de los metales a la salida de la columna vs volumen para flujo de 1,5 mL/min.

concentraciones de los metales, medidas a la salida de las columnas en intervalos de 100mL. Estas curvas se muestran en las **figuras 6, 7 y 8.**

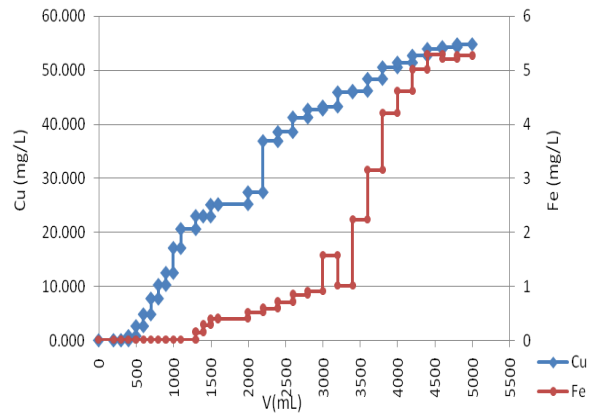


Figura 7. Concentración de los metales a la salida de la columna vs volumen para flujo de 6 mL/min.

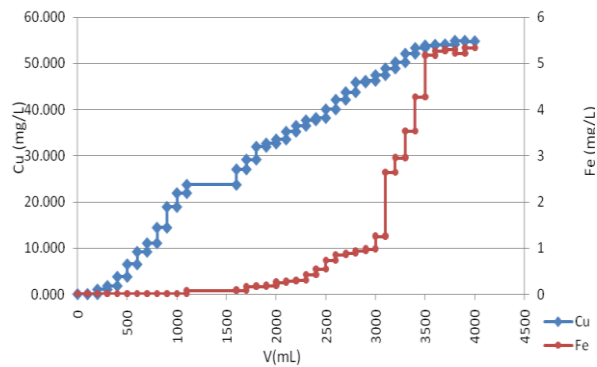


Figura 8. Concentración de los metales a la salida de la columna vs volumen para flujo de 10 mL/min.

Los resultados de los volúmenes de ruptura y de saturación de estas columnas, para ambos metales de estudio, se muestran en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Volúmenes de ruptura y saturación para los flujos probados.

Flujo	Parámetro (mL)	Cobre	Hierro
1,5 mL/min	Volumen de ruptura (Vb)	1100	2100
	Volumen de saturación (Vr)	4200	4100
6 mL/min	Volumen de ruptura (Vb)	500	1400
	Volumen de saturación (Vr)	4800	4400
10 mL/min	Volumen de ruptura (Vb)	300	1700
	Volumen de saturación (Vr)	3600	3600

De los resultados obtenidos en la experimentación del flujo de operación, se puede concluir que para flujos mayores se logra obtener menor volumen de agua totalmente libre de metales tóxicos y la curva de ruptura se hace más corta, debido a que disminuye el tiempo de contacto entre ambas fases lo cual atenta contra este proceso, ya que, como se demostró, la zeolita necesita altos tiempos de contacto para completar la reacción de intercambio. De estos resultados se pudo determinar que el mejor flujo de operación para estas condiciones es el menor de ellos de 1,5 mL/min.

En las **figuras 6, 7 y 8** se puede observar como la banda de intercambio de las

columnas de los experimentos anteriores es mayor para el metal cobre que para el hierro, esto se demuestra en los resultados que se muestran en la **tabla 5**. El aumento de la banda de intercambio afecta la operación de tratamiento a nivel industrial, ya que una mayor banda de intercambio, implica una mayor longitud del lecho de zeolita que no se puede aprovechar totalmente, debido a que se encuentra parcialmente agotado.

La **tabla V** muestra los valores calculados de capacidad de adsorción total y capacidad de adsorción aparente de cobre para los tres flujos ensayados, así como el comportamiento de la banda de intercambio para cada columna.

Tabla 5. Capacidades de adsorción y longitud de las bandas de intercambio para los flujos ensayados.

Q (mL/min)	q (mg/g)	a _{máx} (mg/g)	δ Cu(cm)	δ Fe(cm)
1,5	2,31	1,20	7,38	5,11
6	2,32	0,54	9	7,2
10	2,068	0,33	9,25	7,25

Efecto de la granulometría.

En las **figuras 9, 10, 11 y 12**, se observa una comparación de las curvas de ruptura para ambos metales analizados y ambas granulometrías estudiadas (1mm-3mm y 0.4mm-1mm), lo que indica el aumento de los tiempos de ruptura al disminuir los tamaños de las partículas de zeolita que componen el lecho. Eso se debe a que con una reducción del tamaño de partícula se

logra un aumento del área superficial del material adsorbente.

En las mismas, se puede apreciar como al emplear una menor granulometría, se obtiene una zona de transferencia de masa más amplia, lo que favorece la operación. Las capacidades calculadas para cada una de las condiciones ensayadas en este experimento se pueden observar en la **tabla 6** que se muestra a continuación:

Tabla 6. Comparación de las capacidades de adsorción total y aparente y de los volúmenes de ruptura para el metal cobre y las granulometrías estudiadas.

Q (mL/min)	Vb (mL)		q (mg/g)		amáx(mg/g)		
	Dp(mm)	(0,4-1)	(1-3)	(0,4-1)	(1-3)	(0,4-1)	(1-3)
6	1500		500	4,018	2,32	1,64	0,54
10	1050		300	4,12	2,068	1,15	0,33

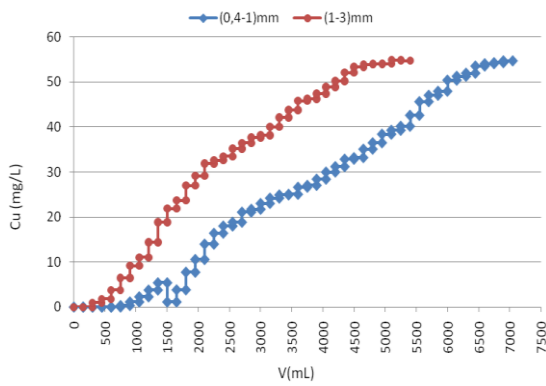


Figura 9. Comparación de las curvas de ruptura para Cu y ambas granulometrías estudiadas para flujo de 10 mL/min.

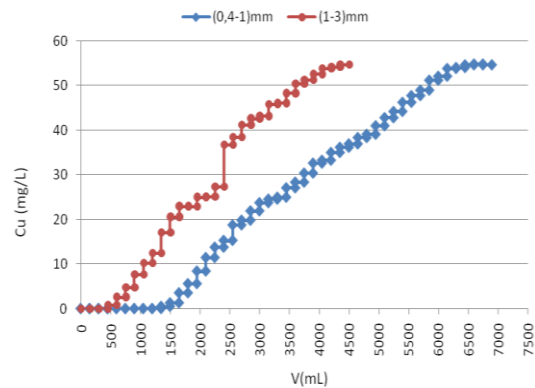


Figura 10. Comparación de las curvas de ruptura para Cu y ambas granulometrías estudiadas para flujo de 6 mL/min.

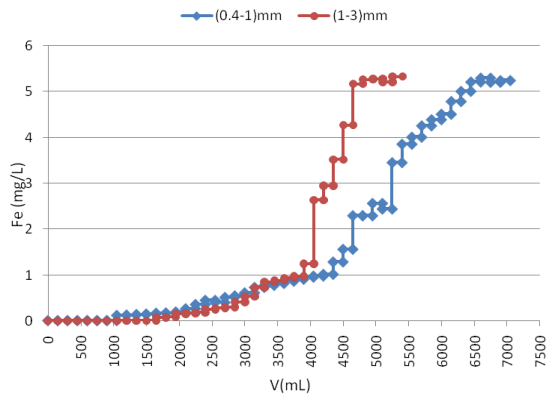


Figura 11. Comparación de las curvas de ruptura para Fe y ambas granulometrías

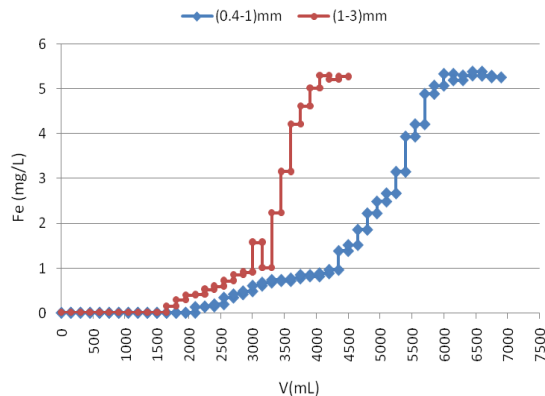


Figura 2. Comparación de las curvas de ruptura para Fe y ambas granulometrías

estudiadas para flujo de 10 mL/min.

estudiadas para flujo de 6 mL/min.

Diseño de la instalación para el tratamiento del residual mediante zeolitas naturales.

El diseño de la instalación para tratar los residuales provenientes de la planta de circuito impreso, se realizó mediante el método de escalado desde los resultados

obtenidos en el laboratorio hacia la instalación industrial, la cual, por sus dimensiones se puede considerar una planta piloto. Las condiciones que fueron establecidas para el escalado, se muestran a continuación:

Tabla 7. Condiciones establecidas para el escalado de la columna.

Flujo de entrada a la columna(L/h)	20
Capacidad de la cisterna (L)	5000
Tiempo de ruptura escala productiva (h)	8h/día x15 días = 120

Los datos de la escala de laboratorio fueron extraídos de las curvas de ruptura correspondientes a cada alternativa estudiada. Para facilitar la visualización de los resultados del escalado, fue empleada

una nomenclatura para cada alternativa estudiada de acuerdo con las condiciones fundamentales probadas a escala de laboratorio la cual se muestra en **tabla 8**.

Tabla 8. Condiciones y principales resultados de laboratorio.

Nomenclatura	Q _L (mL/min)	D _p (mm)	Mz(g)	H(cm)	B _A (m ³ /m ² h)
Columna 1	1,5	(1-3)	50	10	0,198
Columna 2	6	(1-3)	50	10	0,796
Columna 3	10	(1-3)	50	10	1,326
Columna 4	6	(0,4-1)	50	8	0,796
Columna 5	10	(0,4-1)	50	8	1,326

El procedimiento de escalado empleado se muestra a continuación:

Tabla 9. Procedimiento de escalado.

N _o	Procedimiento	Ecuación
1	Determinar el criterio de escalado. En este caso se mantuvo constante la carga hidráulica superficial (B _A) de la escala de laboratorio a la escala productiva. Esta variable no es más que la relación entre el flujo y el área transversal de la columna.	$B_{AL}=B_{Ap}$ (3)
2	Calcular el área de las columnas a escala industrial (A _p), a partir del flujo fijado. A partir de ahí determinar el diámetro de las columnas a escala productiva (D _c).	$D_c=\sqrt{\frac{4A_p}{\pi}}$ (4)
3	Calcular el tiempo de residencia del residual en el lecho (τ) en la escala de laboratorio, donde V _z (m ³) es el volumen ocupado por la zeolita y Q _r es el flujo de residual en la escala productiva (m ³ /h).	$\tau=\frac{V_z}{Q_r}$ (5)

4	Calcular la densidad aparente del lecho de zeolita (ρ_z), donde Mz es la masa de zeolita (g).	$\rho_z = \frac{M_z}{V_z}$ (6)
5	Calcular la altura del lecho de zeolita para las columnas propuestas para la planta (Hz). Debido a que $B_{AL}=B_A$, así como τ para ambas escalas, la altura del lecho de la columna de laboratorio (H), es la misma que en la escala productiva (Hz).	$H_z = \tau * B_A$ (7)
6	Calcular el volumen del lecho de zeolita para las nuevas condiciones en la escala productiva (Vc).	$V_c = H_z * A_p$ (8)
7	Debido a que mediante la (7) $H=H_z$, fue necesario el establecimiento de un criterio que permitiera el aumento de la altura de cada columna escalada, hasta un valor lógico. La nueva altura del lecho en la escala productiva se denominará H_L , mientras que los términos tb_p y tb_L de (9) se refieren a los tiempos de rupturas en la escala productiva y de laboratorio respectivamente.	$H_L = \frac{H * tb_p}{tb_L}$ (9)
8	Entonces la altura de la columna (Hc), sería la altura del lecho aumentado en un 20%.	$H_c = 1,2 * H_z$ (10)

Las dimensiones de las columnas escaladas se pueden observar en la **tabla 10** en la cual se señalan las alternativas en las que se considera se obtuvieron mejores resultados desde el punto de vista de

dimensiones de las columnas realizables a partir del espacio disponible en la planta y de la cantidad de material zeolítico a emplear para el tiempo de trabajo establecido

Tabla 10. Principales resultados del escalado.

	D (m)	Hz (m)	Hc (m)	Mz (kg)
Columna 1	0,36	1,00	1,20	111,69
Columna 2	0,18	4,35	5,22	242,80
Columna 3	0,14	24,00	28,80	402,08
Columna 4	0,18	1,44	1,73	53,44
Columna 5	0,14	4,00	4,80	133,38

Aspectos económicos.

Los aspectos económicos analizados en este acápite, estarán dirigidos fundamentalmente a la selección de las dimensiones de la columna de intercambio, mediante el costo que tendrá el tratamiento con cada una de las alternativas seleccionadas para un año de trabajo de la planta.

El costo de la operación de tratamiento de los residuales galvánicos mediante las

alternativas estudiadas, se debe fundamentalmente al precio del mineral zeolita empleado para el relleno de las columnas de intercambio. El precio establecido para el material zeolita es de 10,35 \$/ton en CUC y 19,65 \$/ton en CUP. El costo de los materiales para las condiciones establecidas para el análisis, son las que se muestran en la **tabla 11**. Para ello, fue considerado un volumen de residual que se procesa en un año de trabajo, 8 horas diarias y para el flujo de operación de 20 L/h.

Tabla 11. Costo de los materiales para cada columna escalada.

	Masa (kg)		Costo / kg
	Zeolita	CUC	CUP
Columna 1	111,69	27,74	52,67
Columna 4	53,44	13,27	25,20

Teniendo en cuenta que las dimensiones de la columna son aceptables y el precio es casi la mitad de lo que cuesta la columna 1, se puede tomar esta alternativa de la columna 4 como la mejor para tratar el residual.

Propuesta de esquema tecnológico de la planta de tratamiento de residuales galvánicos mediante zeolitas naturales.

La planta de tratamiento de residuales galvánicos estará compuesta por una cisterna de almacenamiento de capacidad 5000 L, una bomba encargada de impulsar el líquido residual con un flujo de 20 L/h seguido de un sistema de una columna de intercambio catiónico compuesta por zeolita natural de granulometría de (0,4-1) mm. Esta columna tendrá un diámetro de 0,18 m y una altura de 1,73 m y estará implementada otra columna con iguales características para ser conectada al cumplirse el tiempo de trabajo determinado y reemplazar el lecho agotado sin detener la planta.

La disposición final de los lodos compuestos por zeolita y metales pesados podrá ser su empleo como aditivos de la construcción, para la fabricación de azulejos, baldosas, elementos prefabricados, etc. Trabajos del

Centro de Materiales de la Construcción demostraron el adecuado encapsulado de estos metales y los despreciables niveles de lixiviación que ellos sufren con el tiempo en condiciones acelerada de laboratorio [Licea, 2010].

Se han realizado estudios que demuestran la posibilidad de sustitución de fertilizantes tradicionales en el cultivo de diferentes especies de maíz por lodos procedentes de la purificación de aguas residuales cargadas de metales pesados entre los que se encuentra el cobre. En estos estudios fue probado que es posible el empleo de compost de lodos residuales para estos cultivos sin la afectación de la calidad del mismo y sin ocasionarse efectos adversos al medio ambiente como la lixiviación de los metales al suelo o la absorción por la planta [Cuevas, 2012].

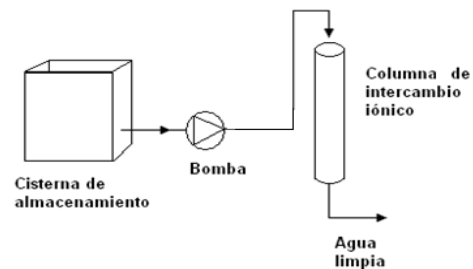


Figura 13. Esquema tecnológico propuesto.

CONCLUSIONES

1. Se caracterizó el efluente galvánico proveniente de la planta de circuito impreso, determinándose que contiene altas concentraciones de cobre y de hierro.
2. El estudio del tiempo de equilibrio demostró que la zeolita necesita altos tiempos de contacto (6 horas para el cobre y 5 horas para el hierro) para remover exitosamente los contaminantes metálicos.
3. Se determinó la capacidad aparente máxima de adsorción mediante la construcción de la isoterma y el ajuste del modelo de Langmuir.
4. Empleando un sistema dinámico fue posible la construcción de las curvas de ruptura para estudiar el efecto del flujo y de la granulometría.
5. Las mejores propuestas obtenidas mediante el escalado fueron comparadas mediante el análisis de algunos aspectos económicos.
6. La opción del empleo de zeolitas naturales constituye, no solo una tecnología limpia para tratar los residuales galvánicos, sino que además brinda la posibilidad de sustituir importaciones y eliminar la dependencia de los países y empresas capitalistas.

BIBLIOGRAFÍA

- Cano K. 2013. Síntesis y caracterización de catalizadores metálicos con diferentes soportes para las reacciones de hidrogenación de aromáticos. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Chudoba J.; Menéndez C.; Olmo JP 1986. Fundamentos teóricos de algunos procesos para la purificación de agua residual. Editorial, CUJAE.
- Chabalina L. 2002. Manejo de residuales galvánicos en Cuba con vistas de tecnologías limpias. Cuba: Centro de Ingeniería y Manejo Ambiental de Bahías y Costas (CIMAB).
- Cuevas G. 2012. Metales pesados en maíz (*Zea mays* L.) Cultivado en eun suelo enmendado con diferentes dosis de compost de lodo residual. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, México. Vol.20, No2.
- Galvanoplastia. 2015. EcuRed Enciclopedia cubana.
- Galvanoplastia. . 2015. Wikipedia-Kiwix Enciclopedia libre.
- Guillén YL. 2011. Alternativas de solución para tratar los residuales líquidos en la planta de circuito impreso del CIDT-MININT. Ciudad de La Habana, Cuba: CUJAE.
- Licea VO. 2010. Propuesta de Esquemas tecnológicos para el tratamiento y la disposición de los residuales del Taller Galvánico de la EMI " Yuri Gagarin". La Habana, Cuba: CUJAE.
- Matos AR. 2011. Puesta en Marcha y Evaluación de la Planta de Tratamiento de Residuales Líquidos Galvánicos del CIDT. La Habana: CUJAE.
- Norma Cubana. 1999. Eliminación de contaminantes en talleres galvánicos. Parámetros de vertimiento.
- Pavón T. 2000. Remoción de níquel, cadmio y zinc del agua utilizando clinoptilolita heulandita. México: Universidad Autónoma del estado de México.
- Rosabal MMV. 1998. Hidrodinámica y separaciones mecánicas Tomo 3. México.
- Rojas AM. 2008. Estudio de la eliminación de Cd, Hg y Pb utilizando materiales mcm-41 puro óxido de silicio y funcionalizado con 3-metoxi-mercaptopropilsilano. Venezuela.