

# Evaluación de la biosorción con bagazo de palma africana para la eliminación de Pb (II) en solución

## Evaluation of the biosorption with african palm bagasse for the removal of Pb (II) in solution

Candelaria Tejada Tovar<sup>1</sup>, Erika Ruiz Paternina<sup>2</sup>, Jorge Gallo Mercado<sup>3</sup>, Jason Moscote Bohorquez<sup>3</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. en Educación, M.Sc (c) en ingeniería ambiental; Docente asociado. Universidad de Cartagena; Grupo IDAB; Cartagena, Colombia.

<sup>2</sup> Ingeniera Química; Universidad de Cartagena; Joven investigador; Grupo IDAB, Cartagena, Colombia.

<sup>3</sup> Estudiante de Ingeniería Química; Universidad de Cartagena; Semillero de investigación- Grupo IDAB, Cartagena, Colombia. E-mail: ctejadatt@gmail.com

Recibido 09/09/14, Aceptado 15/12/2014

Cite this article as: C. Tejada, E.Ruiz, J. Gallo, J.Moscote, "Evaluation of the biosorption with african palm bagasse for the removal of Pb (II) in solution", Prospect, Vol 13, N° 1, 59-67, 2015.

### RESUMEN

Se propone la adsorción de Pb (II) usando bagazo de palma tratado químicamente con ácido cítrico, se elige este material por ser un desecho agroindustrial ampliamente disponible en la región Caribe colombiana. Los experimentos fueron llevados a cabo en sistema batch en solución acuosa de plomo a una concentración de 100 ppm. La determinación de la concentración de metal al final del proceso se midió por absorción atómica. La caracterización de los materiales adsorbentes usados se hizo por FTIR encontrando que los grupos hidroxilos y carboxílicos son los principales responsables de la capacidad de adsorción. Además, fue encontrado que el pH es el factor de mayor incidencia en el proceso, siendo el de 6 el valor óptimo. Por otra parte, se encontró que el Pb (II) presenta una sorción rápida durante los primeros 10 minutos, además el modelo de Elovich fue el de mejor ajuste. La capacidad máxima de adsorción según la isoterma de Langmuir fue de 162 y 451 mg/g para el bagazo sin modificar y modificado respectivamente, estableciendo que la modificación fue altamente eficiente.

**Palabras Clave:** Adsorbente, Plomo, Residuo, Remoción, Tratamiento químico.

### ABSTRACT

It was studied the adsorption of Pb (II) using palm bagasse chemically treated with citric acid. This material is chosen due to is an available waste in the Colombian Caribbean region. The experiments were carried out in batch system in aqueous solution of lead at a concentration of 100 ppm. The determination of the heavy concentration at the end of the process was measured by atomic absorption. The characterization of adsorbent materials used was carry out using FTIR. It was found that the hydroxyl and carboxyl groups are mainly responsible of adsorption capacities. Furthermore, it was found that the pH is the most prevalent factor in the process. The optimum value was 6. Moreover, it was found that the Pb (II) exhibits rapid sorption during the first 10 minutes. The process was better fitted by the Elovich model. The maximum adsorption capacity according to Langmuir isotherm was 162 and 451 mg/g for unmodified and modified bagasse respectively. It was established that the chemical treatment was highly efficient.

**Keywords:** Chemical treatment, Lead, Removal, Waste.

## 1. INTRODUCCIÓN

El plomo es un metal pesado de símbolo Pb, número atómico 82 y peso atómico 207,19 uma, de color azulado. Es flexible, inelástico, se funde con facilidad a 327,4°C y hierve a 1725°C. Las valencias químicas normales son 2 y 4. Es relativamente resistente al ataque de los ácidos sulfúrico y clorhídrico, pero se disuelve con lentitud en ácido nítrico. El plomo es anfótero, ya que forma sales de plomo de los ácidos, así como sales metálicas del ácido plúmbico y tiende a formar muchas sales, óxidos y compuestos organometálicos [1].

Industrialmente, sus compuestos más importantes son los óxidos de plomo y el tetraóxido de plomo, además este forma aleaciones con muchos metales y, en general, se emplea en esta forma en la mayor parte de sus aplicaciones. El uso más amplio del plomo, como tal, se encuentra en la fabricación de acumuladores. Otras aplicaciones importantes son la fabricación de tetraóxido de plomo, forros para cables, elementos de construcción, pigmentos, soldadura suave y municiones. Sin embargo, todos estos usos hacen que este metal esté ampliamente disponible en el ambiente, especialmente en cuerpos de agua, y que por su alta toxicidad para el ser humano y diversos microorganismos, su remoción sea de especial cuidado [2].

Así, dada la necesidad de reparar los daños causados a nuestro medio ambiente y especialmente a nuestros cuerpos de agua, por la importancia que estos tienen para la vida, se han desarrollado varios métodos para la remoción de contaminantes en solución acuosa, entre las que se encuentran la precipitación química, osmosis inversa, intercambio iónico, entre otras, sin embargo debido a los altos costos y subsecuentes problemas de contaminación que muchas de estas generan, otras alternativas han surgido para esta tarea, resultados de diversas investigaciones han encontrado que la biomasa residual lignocelulósica es una excelente opción para el tratamiento de aguas mediante un proceso de bioadsorción debido a sus constituyentes como lo son: la celulosa y la lignina, además de numerosos grupos funcionales [3], que facilitan y favorecen en diversos grados la tarea de adsorción de los iones metálicos, así el uso de esta técnica se presenta como un proceso pasivo de mecanismo fisicoquímico que se realiza con biomasa no viviente y que se caracteriza por la interacción de los iones metálicos con ligandos presentes en las paredes celulares de la biomasa [4] hasta alcanzar el equilibrio entre adsorbato y adsorbente [5], con la ventaja de usar generalmente materiales de desecho de las agroindustrias que permiten obtener materiales adsorbentes a bajo costo y que además permiten aliviar el problema de la acumulación de estos desechos [6].

De aquí que la búsqueda de procesos alternativos para el tratamiento de efluentes industriales en estas últimas décadas, ha permitido la implementación de residuos agroindustriales como material adsorbente de trazas de metales pesados presentes en aguas residuales [7]. Entre los más utilizados se tienen: el tallo de rosa, la cáscara de naranja, limón, coco, cacao, uvas y algunos tipos de algas, encontrándose con cada biomasa evaluada, las condiciones óptimas de operación y permitiendo con la ejecución de estos estudios probar alternativas de modificación que puedan mejorar las características del adsorbente frente a estos metales [8], y así evitar el desequilibrio que causan estos en los ecosistemas e impactan negativamente en la salud de las especies marinas que habitan las zonas afectadas [9].

Entre los estudios realizados aprovechando biomásas como adsorbente se puede destacar el uso de cáscara de naranja en la remoción de plomo encontrándose los siguientes resultados: un pH óptimo de adsorción de 4,82, un tiempo de equilibrio de 4 horas, además del tamaño de partículas entre 125  $\mu\text{m}$  y 250  $\mu\text{m}$  y un ajuste de datos descrito por modelo de Langmuir [10].

Por otra parte usando *ulva lactuca* para adsorber iones de Cd(II) y Pb(II) presentes en soluciones acuosas, bajo diferentes condiciones de pH y concentración del metal con agitación constante, se demostró la influencia del pH en la capacidad de adsorción, siendo el pH óptimo de 5,0, se determinó que los datos experimentales se ajustaron mejor al modelo de Langmuir y que para esta biomasa el tiempo de contacto óptimo fue de 6 horas [11].

En otro estudio se probó la capacidad de adsorción del kikuyo preparado por hidrólisis ácida y básica, estudiando como afectaban las distintas variables en la adsorción, se logró determinar que la capacidad de adsorción máxima fue de 139,35 mg/g con una dosis de biosorbente de 0,06 g y un pH óptimo de 6 [12], por otro lado dando respuesta a la problemática que genera el buchón de agua en algunos cuerpos hídricos, se estudió su uso para la adsorción de Pb se encontró después de la caracterización del material por espectroscopia infrarroja y otros métodos analíticos y después del respectivo pre tratamiento físico de la biomasa, a la cual se le realizó una modificación superficial térmicamente, a 200°C por 6 horas, que la mayor adsorción fue del 86,5% la cual se obtuvo con la mayor cantidad de adsorbente utilizado (2 g/L) en un tiempo de 15 minutos [13].

En general el comportamiento de la adsorción es descrito mediante el uso de los modelos cinéticos, en la tabla 1, se muestran los más usados en la remoción de metales pesados.

**Tabla 1.** Modelos cinéticos de adsorción [17].**Table 1.** Kinetic models of adsorption [17].

<b>Primer orden</b>	$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \left(\frac{k_1 * t}{2,303}\right)$	Donde $q_e$ y $q_t$ son las capacidades de adsorción en el equilibrio, y en un tiempo determinado, expresadas en (mg/g), mientras $k_1$ es la constante de pseudo primer orden ( $\text{min}^{-1}$ )
<b>Segundo orden</b>	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$	Donde $k_2$ es la constante de adsorción de segundo orden ( $\text{g}^{-1} \text{min}^{-1}$ ).
<b>Elovich</b>	$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} \ln(t)$	Donde $\alpha$ y $\beta$ son las constantes de Elovich [9-10].
<b>Difusión intraparticular</b>	$\log q_t = \log k_{int} + 0,5 \log t$	Donde $q_t$ es la cantidad de metal adsorbido, $t$ el tiempo de contacto y $k_{int}$ el coeficiente de difusión intraparticular.

Además, para describir el equilibrio del proceso, se hace uso de las isotermas, siendo las más usadas Langmuir y Freundlich. La isoterma de adsorción Langmuir asume una monocapa de adsorción, donde la adsorción sólo puede producirse en un número finito de definidos sitios localizados, que son idénticos y equivalentes. El modelo de Langmuir puede expresarse como:

$$q_e = q_{max} \frac{KC_f}{1 + KC_f}$$

Donde  $q_e$  es la concentración del metal adsorbido en el bioadsorbente,  $C_f$  es la concentración residual del metal en solución,  $q_{max}$  es la adsorción máxima correspondiente a los sitios de saturación, y  $K$  es la relación entre la tasas de adsorción/desorción. Mientras que el modelo de Freundlich, no se limita a la formación de la monocapa. Este modelo empírico se puede aplicar a múltiples capas de adsorción, con una distribución no uniforme de calor y afinidades de adsorción sobre la superficie heterogénea. Este se representa como:

$$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_{eq}$$

Aquí  $K_f$  es la constante de Freundlich,  $n$  representa la intensidad de adsorción,  $q_e$  es la cantidad de metal adsorbido en el equilibrio, y  $C_{eq}$  es la concentración residual del metal en solución [16-17].

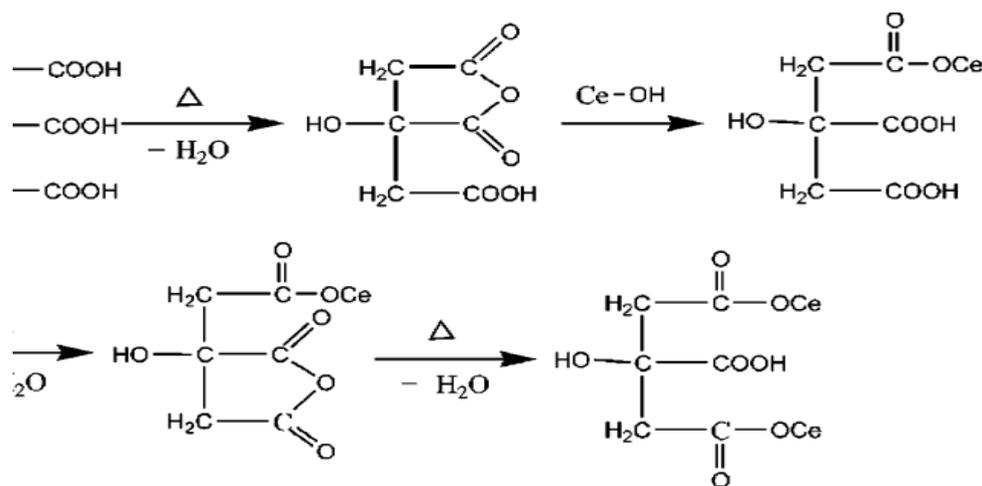
## 2. METODOLOGÍA

La materia prima para la elaboración del adsorbente se obtuvo a partir de bagazo de palma africana obtenido, como residuo del proceso en una planta extractora de aceite de palma ubicada en el departamento de Bolívar (Colombia). El material recolectado se lavó cuatro veces con agua destilada retirando toda clase de impurezas y materiales que no tuvieran participación directa en el proceso de adsorción. Luego fue secada por 24 horas en horno a una temperatura de 90°C, con el fin de retirar el exceso de agua, obteniendo un 30% del peso inicial. A continuación se molió el material y se tamizó obteniendo así las partículas de interés en los siguientes rangos: 0,355-0,5; 0,5-1; 1-2mm. Inicialmente se realizó una caracterización elemental, que además comprendía el estudio del contenido de celulosa, lignina y hemicelulosa en el material.

La modificación del biomaterial se realizó usando ácido cítrico 0,6M, para ello se llevó a cabo el contacto de 40 g de biomasa con 200mL de la solución, la cual se agitó durante 2 horas a 120 rpm y 60 °C; luego, estos biomateriales fueron lavados con agua destilada para retirar restos de ácido, y secados a 55 °C por 24 horas [14-15]. En general, el mecanismo de esta modificación se basa en la combinación de los grupos hidroxil con el ácido cítrico anhidro para formar un enlace éster e introducir grupos carboxilos a la celulosa del bagazo. El mecanismo puede ser observado en la figura 1 [16], y confirmado del análisis FTIR.

**Figura 1.** Modificación de la celulosa (Ce) con ácido cítrico.

**Figure 1.** Modification of cellulose (Ce) with citric acid.



## 2.1 Pruebas de adsorción

La solución patrón de 1000 ppm de Pb(II) fue preparada usando  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  de grado analítico, diluyendo hasta llevar a la concentración necesaria. Inicialmente se estudió el efecto del tamaño de partícula del adsorbente y del pH de la solución usando una concentración inicial del metal de 100 ppm. El pH de la solución fue ajustado usando HCl y NaOH 1M. Todos los experimentos fueron llevados a cabo a temperatura ambiente ( $25^\circ\text{C}$ ) en shaker a 150 rpm por 120 minutos [14], usando una relación biomasa/solución de 5g/L.

Luego de determinar las condiciones óptimas de adsorción, se llevó a cabo la cinética del proceso para la biomasa modificada y sin modificar durante 270 minutos. El ajuste se realizó usando los modelos de primer orden, segundo orden, Elovich y difusión intraparticular. Finalmente, se estudió el comportamiento del proceso a diferentes concentraciones iniciales del metal: 25-50-75-100 ppm. Ajustando el proceso a las isotermas de adsorción de Langmuir y Freundlich usadas para describir las propiedades superficiales y los mecanismos de adsorción que toman lugar. Este proceso fue realizado a temperatura ambiente ( $25^\circ\text{C}$ ) a 150 rpm al pH y tamaño de partícula óptimo. El tiempo de este proceso se determinó del estudio cinético.

Finalmente, el análisis de Pb (II) sobrenadante en la solución se realizó mediante espectroscopia de absorción atómica al final del proceso usando un equipo iCE 3000. El análisis estadístico, y ajuste de los datos a los modelos trabajados, se realizó haciendo uso de la herramienta Solver de Excel.

## 3. RESULTADOS

Se realizó la caracterización mostrada en la tabla 2, los métodos analíticos llevados a cabo se observan en la misma.

Los resultados obtenidos muestran que es el carbono el elemento con mayor porcentaje en el bagazo de palma, haciéndola atractiva para su uso como material combustible. Además, se confirma la presencia de lignina, celulosa y hemicelulosa en el material, por lo cual se esperaría una alta eficiencia de adsorción puesto que todos estos polímeros son conocidos por la gran cantidad de grupos hidroxilos y fenólicos que pueden favorecer la adsorción de metales [18].

En la tabla 3 se muestra la influencia del pH y el tamaño de partícula en la remoción de Pb (II). Se observa que el mejor pH de adsorción es de 6, estableciendo que una carga negativa favorece la adsorción del metal ya sea por intercambio iónico o por interacción electrostática, determinada por el comportamiento de los grupos funcionales en la superficie del material sorbente. A valores superiores de pH, se incrementa la concentración de iones  $\text{OH}^-$ , induciendo cambios en la superficie del adsorbente, aumentando la adsorción de los iones metálicos. Cabe destacar que a nivel práctico, el pH es un factor determinante en la adsorción de cada metal, y no solo en la toma de este, sino también cuando se desee llevar este proceso a escala industrial, puesto que se deben cumplir con disposiciones legales referentes al pH del efluente tratado. No se realizó el estudio a valores superiores a 6, puesto que la especie dominante ya no sería el Pb (II), sino que precipitaría como hidróxido de acuerdo al diagrama de especiación del plomo [19].

**Tabla 2.** Caracterización del bagazo de palma africana.**Table 2.** Characterization of african palm bagasse.

Parámetros	Bagazo de palma	Métodos
Carbono %	38,27	AOAC 949.14
Hidrógeno %	4,71	AOAC 984.14
Nitrógeno %	2,03	AOAC 984.13 KJELDAHL
Azufre ppm	0,18	Digestión-nefelometría
Cenizas %	4,23	Termogravimetría
Pectina %	4,88	Digestión ácida-termogravimetría
Lignina %	17,11	Fotocolorimetría
Celulosa %	19,90	Digestión-termogravimetría
Hemicelulosa %	7,00	Digestión-termogravimetría
Calcio mg/g como Ca <sup>2+</sup>	1,21	EAA
Sodio mg/g como Na <sup>+</sup>	0,35	EAA
Potasio mg/g como K <sup>+</sup>	2,73	EAA
Hierro mg/g como Fe <sup>2+</sup>	0,0002	EAA
Cobre mg/g como Cu <sup>2+</sup>	0,04	EAA
Magnesio mg/g como Mg <sup>2+</sup>	0,002	EAA
Cromo mg/g como Cr <sup>3+</sup>	0,00021	EAA-Horno de grafito

**Tabla 3.** Influencia de pH y tamaño de partícula para la adsorción de Pb (II).**Table 3.** Influence of pH and particle size in the adsorption of Pb (II).

Concentración inicial: 100 ppm			
pH	Tamaño de partícula mm	Concentración final ppm	% remoción
2	0,355	52,95	47,05
	0,5	40,25	59,75
	1	49,36	50,64
4	0,355	18,79	81,21
	0,5	24,78	75,22
	1	16,60	83,40
6	0,355	12,92	87,08
	0,5	11,13	88,87
	1	0,44	99,56

En cuanto a la influencia del tamaño de partícula se encontró de 1 mm fue el de mejor resultado, contrario a lo que se esperaría, es decir que a menor tamaño de partícula la adsorción aumentará al hacerlo la superficie de contacto con el metal. Para estos bioadsorbentes, un tamaño de partícula inferior al óptimo pudo haber disminuido ligeramente el área superficial debido al aglomeramiento de las mismas, aunque en términos generales es el pH el factor de mayor influencia.

De la cinética del proceso, tal como se muestra en la figura 2, se establece que la adsorción de Pb (II) sobre el bagazo de palma se da rápidamente, pues en los primeros 10 minutos del proceso se alcanza un porcentaje de adsorción

superior al 90%, por tanto este fue el tiempo establecido para realizar el estudio de adsorción a diferentes concentraciones sobre el material tratado y sin tratar.

Además, al realizar el ajuste de los datos experimentales tal como se observa en las figuras 3 y 4, que corresponden respectivamente al ajuste de la cinética de adsorción con la biomasa sin modificar y modificada, y a la tabla 3, se establece que es el modelo cinético de Elovich el cual se ajusta de mejor forma el proceso de adsorción, ya que el valor de  $q_e$  calculado de esta ecuación es el más cercano al experimental. Así se muestra que la superficie de los bioadsorbentes es heterogénea, exhibiendo diferentes energías de activación [20].

Figura 2. Cinética del proceso de adsorción de Pb (II) sobre bagazo de palma.

Figure 2. Kinetics of the adsorption process of Pb (II) onto palm bagasse.

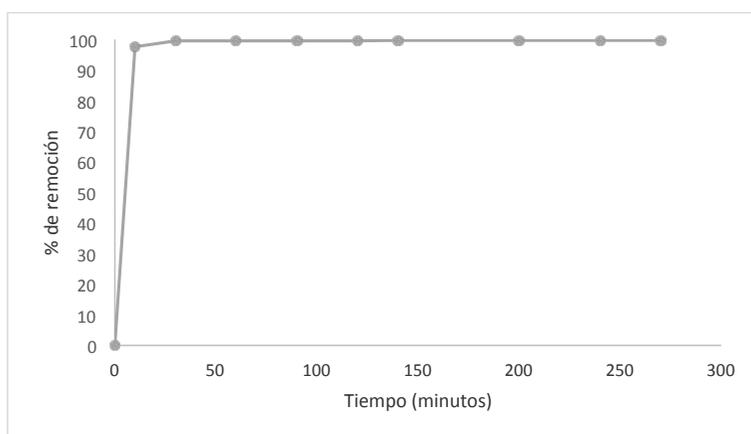


Figura 3. Ajuste de modelos cinéticos para la adsorción de Pb (II) sobre bagazo de palma

Figure 3. Kinetic models fit for the adsorption of Pb (II) onto palm bagasse.

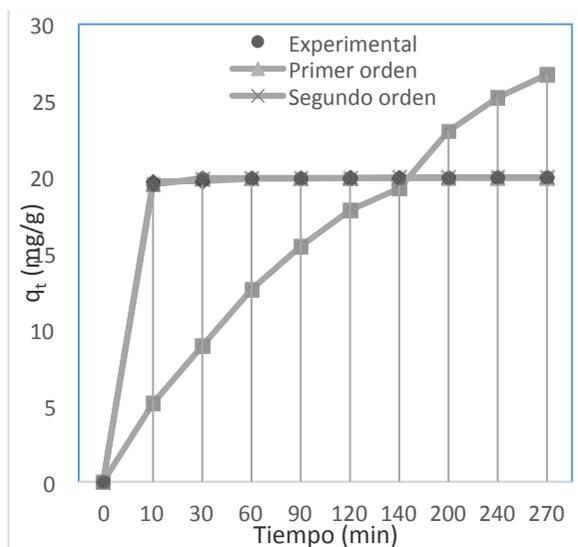
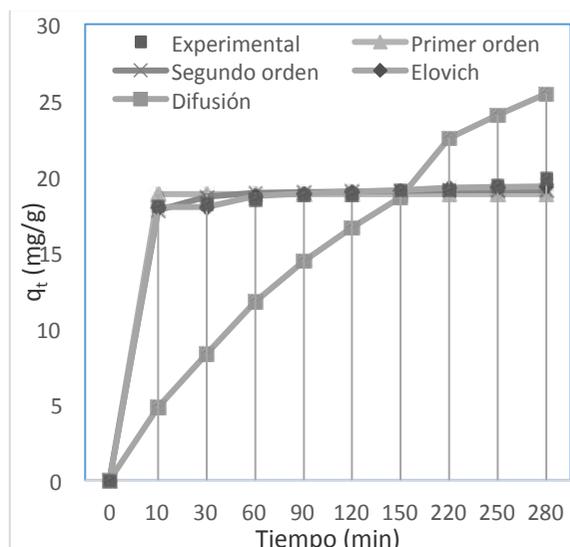


Figura 4. Ajuste de modelos cinéticos para la adsorción de Pb (II) sobre bagazo modificado.

Figure 4. Kinetic models fit for the adsorption of Pb (II) onto modified bagasse.



Además, como puede observarse en la tabla 4, los valores de la velocidad inicial de adsorción, son mayores en el bagazo sin modificar, al igual que  $\beta$ , lo que muestra que a pesar de que el plomo es tomado más rápidamente por el bagazo sin modificar, es sobre la superficie modificada que hay mayor disponibilidad para la toma del metal.

Además, de acuerdo a la suma de errores al cuadrado determinada con solver de Excel, se establece la alta correlación de los datos experimentales con los modelos de Langmuir y Freundlich para el bagazo sin modificar, aunque para la biomasa tratada la suma de errores es mayor. Así se establece que el enlace se da principalmente por fuerzas físicas, la adsorción está limitada a la formación de una monocapa, el número de especies adsorbidas no excede el total de sitios disponibles, e inicialmente todos los sitios están disponibles, además no se considera ninguna reacción de desorción que pueda tener lugar durante el proceso de remoción [20]. Asimismo, se demuestra que el tratamiento químico del material mejora notablemente el proceso de remoción de plomo, por cuanto se alcanza una capacidad máxima de 451,07 mg/g, y al comparar con resultados de otros autores, también se obtienen mejores eficiencias; bagazo de caña modificado con trietilentetramina (222,22 mg/g) [21], con nanotubos de carbono (56,60mg/g)

[20], con anhídrido succínico/1,3 diisopropilcarbodimida (313 mg/g) [22], rosa bourbonia (120,48 mg/g) [23].

En la figura 5 se muestran los FTIR de los adsorbentes usados antes y después del proceso de adsorción de Pb (II) con el fin de identificar los grupos funcionales presentes en la biomasa y que participan en el proceso de remoción metálica.

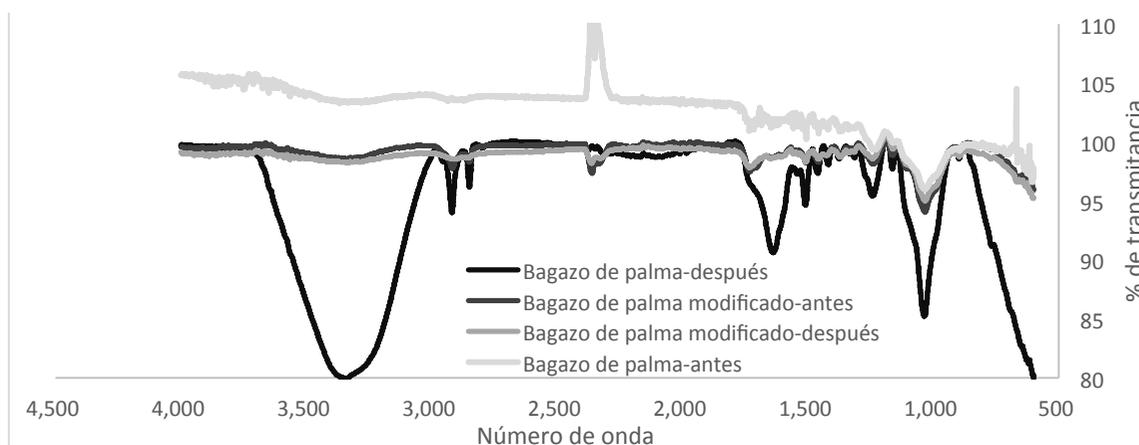
Del análisis FTIR en el bagazo de palma antes del proceso se observa un pico alrededor de  $3367\text{ cm}^{-1}$ , que corresponde al vibramiento de los grupos hidroxilo. Los picos entre  $1600$  y  $1700\text{ cm}^{-1}$  corresponden a la señal del grupo carbonilo  $\text{C}=\text{O}$ , y a la presencia  $\text{C-H}$  en la lignina. La vibración alrededor de  $1450$  a  $1540\text{ cm}^{-1}$  podría atribuirse a los grupos alifáticos y aromáticos, la banda en el rango entre  $1050$  y  $1450\text{ cm}^{-1}$  puede ser asignada a la vibración de los ácidos carboxílicos y alcoholes, mientras que el espectro del bagazo modificado, conserva los grupos hidroxilos correspondientes a la banda de adsorción entre  $3300$  y  $3560\text{ cm}^{-1}$ , aunque además, se observan unos picos de  $3000$  a  $2800\text{ cm}^{-1}$  correspondientes a la vibración de  $\text{C-H}$ , y a  $2360$  que indica el grupo funcional de ácidos carboxílicos. Siendo principalmente los grupos correspondientes a la vibración de los hidroxilos y los ácidos carboxílicos los que participan principalmente en la adsorción del metal sobre ambos biomateriales.

**Tabla 4.** Parámetros cinéticos calculados en la adsorción de Pb (II).

**Table 4.** Kinetic parameters calculated in the adsorption of Pb (II).

Modelo cinetico	Parametros	Bagazo de palma	Bagazo de palma modificado
Primer Orden	$q_e$	19,92	18,83
	$k_1$	0,387	1,53
	Suma	0,001	2,62
Segundo Orden	$k_2$	0,224	0,068
	$q_e$	19,97	19,12
	Suma	0,009	1,226
Elovich	$\beta$	12,78	2,43
	$\alpha$	1,9 E+107	4,2 E+17
	Suma	0,086	0,454
Difusión	$k_{int}$	1,63	1,52
	Suma	488,77	404,865
Langmuir	$q_{max}$	162,63	451,07
	$KC_f$	0,054	0,013
	Suma	0,536	12,60
Freundlich	$K_f$	8,38	5,49
	$1/n$	0,921	1,06
	Suma	0,463	13,06

**Figura 5.** Análisis FTIR de los adsorbentes usados antes y después de la adsorción.  
**Figure 5.** FTIR analysis of the adsorbents used before and after of the adsorption.



#### 4. CONCLUSIONES

Se estudió el uso de bagazo de palma tratada químicamente con ácido cítrico encontrando que esta modificación es altamente eficiente en la remoción de plomo presente en solución acuosa. De los estudios de adsorción se estableció que un pH de 6, tamaño de partícula de 1mm y tiempo de 10 minutos son las condiciones óptimas para alcanzar porcentajes de remoción superiores al 90% del metal.

De la cinética del proceso se encontró que es el modelo de Elovich el que mejor ajusta el comportamiento de los materiales, tanto modificado como sin modificar, indicando así que la superficie de los bioadsorbentes es heterogénea exhibiendo diferentes energías de activación, mientras que del análisis FTIR se concluyó que son los grupos hidroxilo y carboxílicos los responsables de la toma del metal.

#### REFERENCIAS

[1] J. Emsley, *Nature's Building Blocks*. 1<sup>era</sup> edición. Estados Unidos: Oxford University Press, 2001.

[2] J. Wright, *Environmental Chemistry*. 1<sup>era</sup> edición. Estados Unidos: Editorial New York, 2003.

[3] K. Krishnan, K. Sreejalekshmi, R. Baiju, "Nickel(II) adsorption onto biomass based activated carbon obtained from sugarcane bagasse pith", *Bioresource Technology*, 102, 10239–10247, 2011.

[4] N. Cuizano, A. Navarro, "Biosorción de metales pesados por algas marinas: posible solución a la contaminación a bajas concentraciones", *An. Química*, 2, 120-125, 2008.

[5] I. Acosta, J. Cárdenas, V. Martínez, "El uso de diferentes biomazas para la eliminación de metales pesados en sitios contaminados", *Ide@s CONCYTEG*, 7(85), 911-922, 2012.

[6] S. Kalyani, P. Srinivasa, A. Krishnaiah, "Removal of nickel (II) from aqueous solutions using marine macroalgae as the sorbing biomass", *Chemosphere*, 57(9), 1225–1229, 2004.

[7] J. Febrianto, N. Indraswati, S. Ismadji, Y. Ju, N. Kosasih, J. Sunarso, "Sequestering of Cu(II) from aqueous solution using cassava peel (*Manihot esculenta*)", *Journal of Hazardous Materials*, 180, 366–374, 2010.

[8] I. Castro, G. Manjarrez, L. Utria, "Bioacumulación de Cd en ostras de la bahía de Cartagena", *Revista ingenierías Universidad de Medellín*, 7(13), 11-20, 2008.

[9] J. Ordoñez, R. Moreno, *Estudio del aprovechamiento de residuos orgánicos de cultivos de flores (tallos de rosas) como biosorbente de cadmio para el tratamiento de aguas residuales*. [Tesis de pregrado]. Universidad politécnica salesiana, Ecuador, 2013.

[10] J. Muñoz, *Biosorción de Plomo (II) por cáscara de naranja "citrus sinensis" pretratada*. [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional mayor de San Marcos, Perú, 2007.

[11] K. Vallejo, *Estudio de la adsorción de Cd (II) y Pb (II), usando como adsorbente la ulva lactuca (lechuga de mar)*, [Tesis de pregrado]. Universidad de Oriente, Venezuela, 2008.

[12] A. Maldonado, C. Luque, D. Urquiza, "Biosorción de plomo de aguas contaminadas utilizando *pennisetum clausenii*"

*destinum hochst (kikuyo)*", *Rev. LatinAm. Metal. Mat.*, S4, 52-57, 2012.

[13] E. Atehortua, C. Gartner, "Estudios preliminares de la biomasa seca de *eichhornia crassipes* como adsorbente de plomo y cromo en aguas", *Revista colombiana de materiales*, 4, 81-92, 2013.

[14] K.K. Krishnani, X. Meng, L. Dupont, "Metal ions binding onto lignocellulosic biosorbent", *J. Environ. Sci. Heal. A*, 44, 688-699, 2009.

[15] K.K. Krishnani, X. Meng, C. Christodoulatos, V.M. Boddu, "Biosorption mechanism of nine different heavy metals onto biomatrix from rice husk", *Journal of Hazardous Materials*, 153, 1222-1234, 2008.

[16] B. Zhu, T. Fan, D. Zhang, "Adsorption of copper ions from aqueous solution by citric acid modified soybean straw", *Journal of Hazardous Materials*, 153, 300-308, 2008.

[17] K.Y. Foo, B.H. Hameed, "Preparation, characterization and evaluation of adsorptive properties of orange peel based activated carbon via microwave induced K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> activation", *Bioresource Technology*, 102 (20), 9814-9817, 2011.

[18] W.S. Wan Ngah, M.A.K.M. Hanafiah, "Removal of heavy metal ions from wastewater by chemically modified

plant wastes as adsorbents: A review", *Bioresource Technology*, 99, 3935-3948, 2008.

[19] K. Anoop, K.G. Sreejalekshmi, R.S. Baiju, "Nickel (II) adsorption onto biomass based activated carbon obtained from sugarcane bagasse pith", *Bioresource Technology*, 102, 10239-10247, 2011.

[20] L.V. Alves, L.F. Gil, "Adsorption of Cu(II), Cd(II) and Pb(II) from aqueous single metal solutions by succinylated twice-mercerized sugarcane bagasse functionalized with triethylenetetramine", *Water research*, 43, 4479-4488, 2009.

[21] Q. Manzoor, R. Nadeem, M. Iqbal, R. Saeed, T.M. Ansari, "Organic acids pretreatment effect on *Rosa bourbonia* phyto-biomass", *Bioresource Technology*, 132, 446-455, 2013.

[22] I.A.A. Hamza, B.S. Martincigh, J.K. Ngila, V.O. Nyamori, "Adsorption studies of aqueous Pb(II) onto a sugarcane bagasse/multi-walled carbon nanotube composite", *Physics and Chemistry of the Earth*, 66, 157-166, 2013.

[23] O. Karnitz, L.V. Alves, J.C. Perin de Melo, V.R. Botaro, T.M. Sacramento, R. Pereira, L.F. Gil, "Adsorption of heavy metal ion from aqueous single metal solution by chemically modified sugarcane bagasse", *Bioresource Technology*, 98, 1291-1299, 2007.