

Remoción de Pb^{2+} en disolución acuosa sobre carbón activado en polvo: Estudio por lote

Removal of Pb^{2+} in aqueous solution on powdered activated carbon: Batch Study

Grey C. Castellar Ortega¹, Antonio A. García García²

1. Mg. Ciencias Químicas. Docente-Investigador. Universidad Autónoma del Caribe.
Grupo de Investigación de Química Ambiental. E-mail: greycastellar@gmail.com

2. Mg. Educación. Docente-Investigador. Universidad Autónoma del Caribe.
Grupo de Investigación de Química Ambiental.

Recibido 05/01/2011, Aceptado 11/06/2011

RESUMEN

Los iones Pb^{2+} en disolución acuosa se removieron sobre carbón activado (CA) a 25 ± 1 °C y a un pH de $4,0 \pm 0,1$. Experimentos por lotes se realizaron para determinar el efecto de la concentración inicial (20 – 1000 mgdm⁻³) y la cantidad de adsorbente (0,5-1,0 g) sobre la capacidad de adsorción. Los datos de equilibrio se ajustan satisfactoriamente a la isoterma de Freundlich dando una capacidad máxima de adsorción de 37,5 mgg⁻¹ de CA, para una dosis de 5 gdm⁻³. De los resultados se observa que el carbón activado mejora su capacidad de remoción cuando la concentración inicial aumenta y disminuye cuando la dosis de adsorbente se incrementa.

Palabras clave: Carbón activado, Adsorción, Plomo, Isotermas de adsorción.

ABSTRACT

Pb^{2+} ions in aqueous solution on activated carbon (AC) is removed to 25 ± 1 °C and pH $4,0 \pm 0,1$. Batch experiments were performed to determine the effect of initial concentration (20 to 1000 mgdm⁻³) and the amount of adsorbent (0,5-1,0 g) on the adsorption capacity. The equilibrium data fit well to the Freundlich isotherm giving an adsorption capacity of 37,5 mgg⁻¹ of AC, a dose of 5 gdm⁻³. The results show that activated carbon improved clearance capacity when the initial concentration increases and decreases as the adsorbent dose increases.

Key words: Activated carbon, Adsorption, Lead, Adsorption isotherms.

1. Introducción

En las aguas residuales de los efluentes acuosos se encuentran con frecuencia especies químicas como los iones metálicos que tienen una alta toxicidad e impacto en la salud humana y el ecosistema en general. Uno de los metales entre la lista potencialmente tóxicos es el plomo [1].

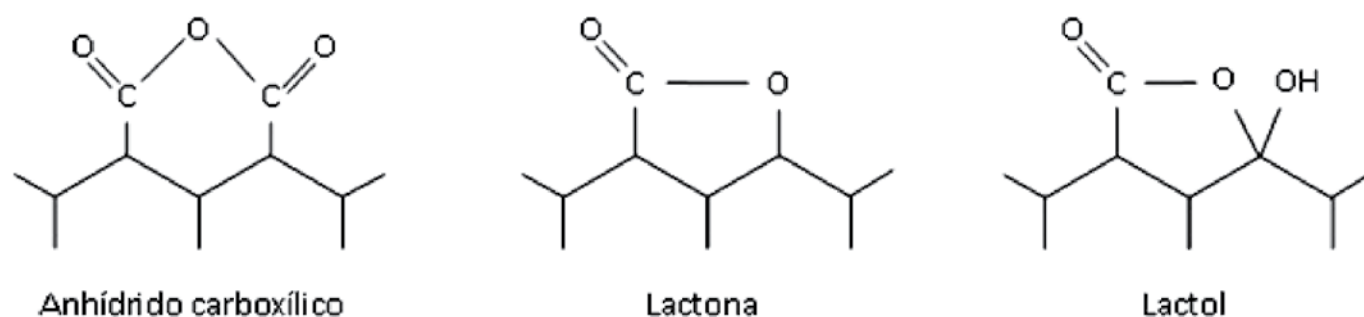
Este metal pesado puede liberarse al medio ambiente por diversas maneras, entre las que se pueden mencionar: las industrias dedicadas al procesamiento de baterías ácidas de plomo, pulpa de papel, petroquímicas, refinerías, impresión, pigmentos, material fotográfico, fabricación de explosivos, cerámica, vidrio, pintura, galvanoplastia, manufactura de tetraetilo de plomo, entre otras, representan solo algunos ejemplos de fuentes de contaminación [2].

Numerosos trabajos de investigación se han dedicado a establecer procedimientos y alternativas dirigidas a resolver este problema de contaminación ambiental. De modo general el método empleado para este fin ha sido la precipitación del metal, con lo cual se logra disminuir considerablemente su concentración en disolución. Sin embargo, la mayor parte de los casos, no permite disminuir el contenido del metal a niveles permisibles para vertirse, además, generalmente este tratamiento trae consigo la generación

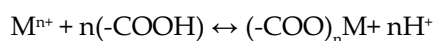
de nuevos contaminantes. En este sentido, el uso de carbón activado constituye una importante alternativa en la solución de este problema, despertando un gran interés el estudio de sus propiedades de adsorción desde el punto de vista científico y ambiental. En primer lugar, el carbón activado es un sólido poroso versátil, relativamente estable, con alta área superficial y con una estructura de microporos que no constituyen marcadas barreras de difusión aún bajo condiciones granulares compactas [3]; en segundo lugar, el carbón activado es un material renovable en la medida que se obtiene a partir de materias primas vegetales (residuos agrícolas, madera, algas, semillas, cortezas), hulla, lignitos, turba y residuos poliméricos (cauchos, plásticos, textiles); finalmente las estructuras tipo grafeno del carbón activado poseen grupos funcionales, que en virtud del método de activación o del tratamiento químico (oxidativo o reductivo) confieren al adsorbente características fisicoquímicas excepcionales que luego afectan los mecanismos de adsorción. La influencia de la química superficial de los carbones activados en las propiedades de adsorción es objeto de investigación debido a que los grupos funcionales presentes en la superficie le confieren selectividad [4-6]. Como por ejemplo, la presencia de grupos carboxílicos (también en la forma de su anhídrido cíclico), lactonas y lactoles (ver figura 1), y grupos hidroxílicos de carácter fenólico, son los responsables de las propiedades superficiales ácidas al carbón activado [7].

Figura 1. Algunos posibles grupos superficiales [7].

Figure 1. Some possible surface groups [7]



Estos grupos funcionales específicos son esenciales en la adsorción de metales pesados debido a su cualidad quelante formando complejos como se indica en la siguiente reacción [8,9]:



La reacción anterior se produce debido al mecanismo de intercambio catiónico, donde el ion de hidrógeno previamente como un grupo carboxílico (ver figura 2), intercambia su sitio con el catión del metal.

En este trabajo se estudió la capacidad de adsorción de un carbón activado comercial para el tratamiento de iones plomo en disolución acuosa; en este sentido, se realizaron varios experimentos en lotes (discontinuos), colocando una cantidad determinada de adsorbente en contacto con la disolución que contiene los iones Pb^{2+} , manteniéndola en suspensión mediante agitación el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio. El efecto de la concentración inicial y la dosis de adsorbente a temperatura y pH constante fueron examinados. Los datos de equilibrio se ajustaron a los modelos de isotermas de Langmuir y Freundlich.

Figura 2. Mecanismo de intercambio catiónico con el grupo carboxílico de la superficie del carbón [10].
Figure 2. Cation exchange mechanism with the carboxylic group of the carbon surface [10].



La isoterma de adsorción de Langmuir asume la adsorción en monocapa (la capa adsorbida es de una molécula de espesor), donde la adsorción solo ocurre en un número finito de sitios localizados, que son idénticos y equivalentes, sin interacción lateral e impedimento estérico entre las moléculas adsorbidas, incluso en los sitios adyacentes [11]. La isoterma de Langmuir puede representarse de la siguiente manera [12]:

$$q = \frac{\alpha q_{\max} b C_e}{1 + b C_e} \quad (1)$$

donde α y b son las constantes de Langmuir, y representan la capacidad máxima de adsorción de la fase sólida (mgg^{-1}) y la constante de energía relacionada con el calor de adsorción respectivamente ($\text{dm}^3\text{mg}^{-1}$). Esta ecuación puede ser rearmada de forma lineal por la conveniencia del trazado y determinación de las constantes de Langmuir, de la siguiente manera:

La isoterma de Freundlich es la más reciente relación que describe la adsorción no ideal y reversible, no restringida a la formación en monocapa. Este modelo empírico ha sido aplicado a la adsorción en multicapa, con una distribución no uniforme del calor de adsorción y mayor afinidad de la superficie heterogénea [11], se representa comúnmente como [12]:

$$\frac{C_e}{q} = \frac{1}{b q_{\max}} + \frac{C_e}{q_{\max}} \quad (2)$$

donde q es la cantidad de soluto removido por unidad de masa de adsorbente (mgg^{-1}), C_e es la concentración de soluto en el equilibrio (mgdm^{-3}), b es la constante de equilibrio

($\text{mgg}^{-1}(\text{dm}^3\text{mg}^{-1})^{1/n}$) y n es una constante relacionada con la afinidad entre el adsorbente y el soluto.

$$q = k C_e^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

La ecuación 3 puede linealizarse aplicando logaritmo natural:

$$\ln q = \ln k + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (4)$$

2. Metodología

2.1 Caracterización del carbón activado

Para evaluar las características más importantes del carbón activado se siguió el siguiente protocolo:

2.1.1 Caracterización física

La evaluación de las características texturales del carbón activado, se realizó a partir de isotermas de adsorción-desorción de nitrógeno a 77 K. El área superficial se obtuvo mediante el modelo de BET [13]; para tal efecto, se utilizó un sortómetro Micromeritics Gemini III 2390; la cantidad de muestra fue de 0,151 g. La desgasificación del adsorbente tuvo lugar a 250°C.

2.1.2 Caracterización química

2.1.2.1 Análisis próximo y último

Se determinó el contenido de humedad, materia volátil, cenizas y carbono fijo, de acuerdo a la metodología esta-

blecida en la norma ASTM D 3173-75 y, el contenido de carbono, nitrógeno, hidrógeno, y oxígeno (por diferencia) según la norma ASTM 5373 y azufre total por la norma ASTM D 4239 (método B).

2.1.2.2 Método de Böehm

Los grupos funcionales ácidos se cuantificaron parcialmente siguiendo el método de Böehm; para tal fin, se colocó por separado un (1,0) g del adsorbente en 100 cm³ de disoluciones 0,1 N de bicarbonato de sodio, carbonato de sodio e hidróxido de sodio, durante 24 horas a 298 K. Transcurrido este tiempo se separó una alícuota de 50 cm³ y se procedió a titular la cantidad de base residual utilizando una disolución 0,1 N de HCl [14,15].

Las propiedades fisicoquímicas tales como área superficial específica, cuantificación de los grupos funcionales ácidos, materia volátil, cenizas, contenido de carbono y otras propiedades se muestran en la tabla 1.

2.2 Estudio por lotes

Para todos los efectos experimentales de este trabajo, se seleccionó un carbón activado (CA) en polvo marca Merck®, el cual, se lavó previamente con agua desionizada y luego se secó a 100 °C por 12 horas.

Para el estudio por lote, se preparó una disolución “stock” de 2000 mgdm⁻³ de Pb^{2+} , disolviendo la cantidad requerida de $Pb(NO_3)_2$ en agua desionizada; a partir de esta disolución se hicieron diluciones de concentraciones entre los 20 mgdm⁻³ hasta los 1000 mgdm⁻³, ajustándole el pH a un valor de $4,0 \pm 0,1$ con ácido nítrico diluido.

A 0,50, 0,75 y 1,00 g del carbón activado se le adicionaron 100 cm³ de cada una de las diluciones, colocándolas luego en un agitador horizontal a 170 rpm por 12 horas a la temperatura de laboratorio ($25^\circ C \pm 1^\circ C$). Finalizada la agitación, se separó la disolución por filtración y se analizó la concentración de Pb^{2+} usando un espectrofotómetro de absorción atómica (AA Spectrometer, marca Thermo) a 217 nm.

3. Resultados y discusión

3.1 Caracterización del carbón activado

La tabla 1 muestra las cantidades de grupos carboxilos, fenoles y lactonas (0,92, 0,53 y 1,72 meqg⁻¹ respectivamente), la gran cantidad de estos grupos funcionales ácidos en la superficie del carbón favorecen el intercambio de cationes y benefician la adsorción de los iones Pb^{2+} . La presencia de estos grupos funcionales oxigenados queda confirmada por los resultados del análisis elemental, considerando el porcentaje de oxígeno en el adsorbente.

Tabla 1. Principales características del adsorbente.
Table 1. Main features of the adsorbent.

Parámetro	Valor
Área superficial (m ² g ⁻¹) (basado en BET)	690
Contenido de cenizas (base seca) (%)	1,18
Contenido de humedad (%)	13,37
Materia volátil (%)	5,03
Análisis elemental (%)	
C	95,46
H	0,30
N	0,65
O (por diferencia)	2,41
S	0,00
Grupos funcionales (meqg ⁻¹)	
Carboxílicos	0,92
Lactónicos	1,17
Fenólicos	1,72

3.2 Estudio por lotes

3.2.1 Efecto de la concentración inicial de Pb^{2+}

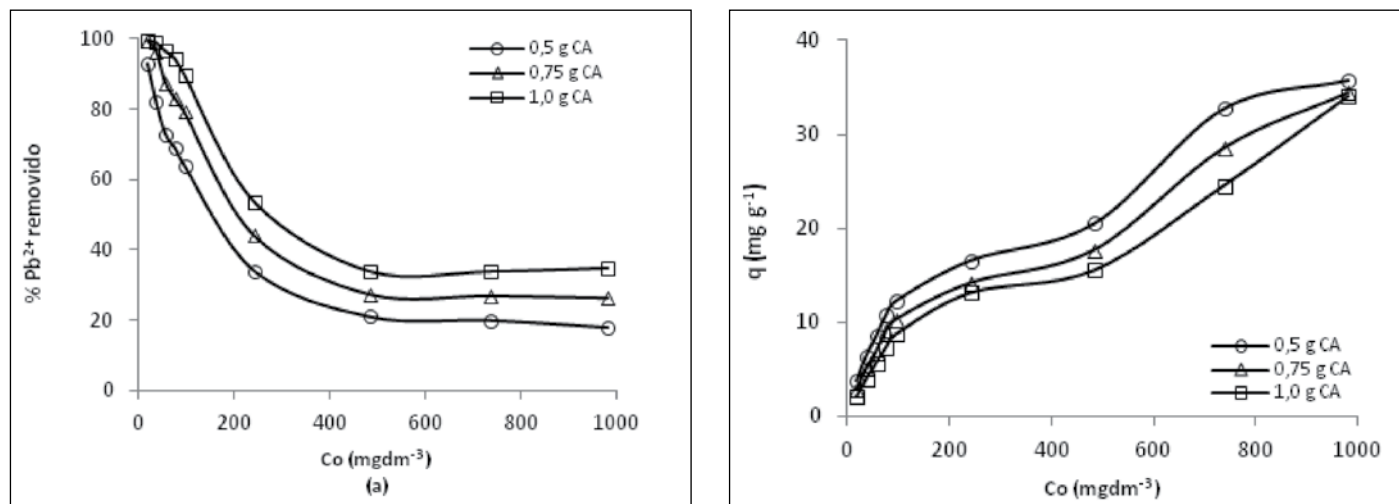
En la figura 3a y 3b se muestran los resultados experimentales variando la concentración inicial de Pb^{2+} en el rango de 20 a 1000 mgdm⁻³ empleando diferentes dosis de adsorbente a pH 4,0. Se observa que al aumentar la concentración inicial, el porcentaje de remoción de iones Pb^{2+} disminuye, pero la capacidad de adsorción del carbón activado aumenta; presentándose la misma tendencia para las tres cantidades de adsorbente utilizadas. Lo anterior puede explicarse considerando que a bajas concentraciones existe una mayor disponibilidad de sitios activos de adsorción, en consecuencia todos los iones pueden ser removidos de la disolución registrándose altos porcentajes de remoción. A medida que la concentración inicial aumenta, la cantidad de iones metálicos presentes es mayor en comparación con los sitios disponibles, aún después de haber alcanzado el equilibrio quedan iones en la disolución disminuyendo de esta manera el porcentaje de remoción. En lo que respecta a la capacidad de adsorción (relación entre la masa de iones removidos y la masa de carbón activado), a bajas concentraciones existe menor cantidad de iones Pb^{2+} en disolución que a altas concentraciones, empleando la misma masa de carbón se establece una relación cada vez mayor en la medida que aumenta la concentración inicial.

3.2.2 Isotermas de adsorción

El proceso de adsorción en este estudio tiene lugar entre una fase sólida (carbón activado en polvo) y una fase líquida (agua) que contiene disueltos los iones Pb^{2+} que

Figura 3. Efecto de la concentración inicial en la adsorción de Pb²⁺ sobre CA. (a) Porcentaje de Pb²⁺ removido, (b) capacidad de adsorción.

Figure 3. Effect of initial concentration on adsorption of Pb²⁺ on CA. (a) percentage of Pb²⁺ removed, (b) adsorption capacity.



se remueven. Cuando se establece una afinidad entre el carbón activado y los iones metálicos, estos últimos son atraídos hacia el sólido mediante diferentes mecanismos continuando el proceso hasta que se alcance un equilibrio entre ambos. Este equilibrio se describe mediante modelos matemáticos (isotermas de adsorción) que relacionan la cantidad removida de iones y la que permanece en disolución cuando se alcanza el equilibrio a una temperatura constante.

Para el estudio de equilibrio por lote se realizaron experimentos variando la concentración inicial desde 20 hasta 1000 mgdm⁻³ a un pH de 4,0 y una temperatura de 25 °C; el tiempo de contacto se mantuvo en 12 horas. La figura 4

muestra la representación de la capacidad de adsorción q frente a la concentración de iones plomo en el equilibrio en fase líquida, Ce.

Los datos de equilibrio de las isotermas de adsorción son utilizados para entender el mecanismo de adsorción [16] y varias ecuaciones están disponibles en la literatura para describirlos. En este estudio se ajustaron los datos experimentales a dos modelos ampliamente empleados en carbones activados, los modelos de isotermas de Freundlich y Langmuir. Las figuras 5 y 6 muestran los ajustes de los datos experimentales a las formas linealizadas de ambos modelos y los valores de los parámetros de estas ecuaciones se resumen en la tabla 2.

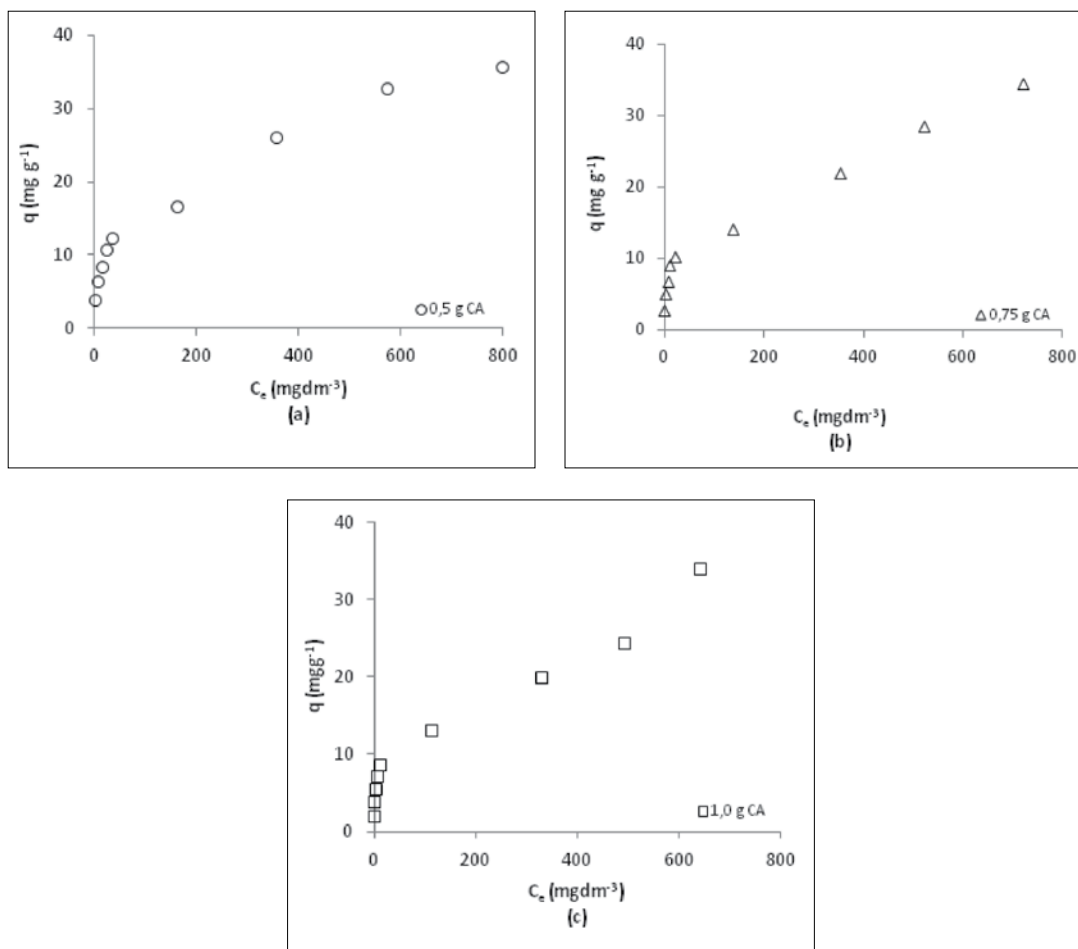
Tabla 2. Constantes de Langmuir y Freundlich

Table 2. Langmuir and Freundlich constants

Masa de carbón activado (g)	Constantes de Langmuir			Constantes de Freundlich		
	Coefficiente de correlación (R ²)	q _{max} (mgg ⁻¹)	b (dm ³ mg ⁻¹)	Coefficiente de correlación (R ²)	K	1/n
0,5	0,96	37,5	0,014	0,99	2,3	0,35
0,75	0,90	34,5	0,017	0,97	4,6	0,28
1,0	0,95	33,0	0,050	0,95	4,8	0,25

Figura 4. Isotermas de adsorción para la remoción de iones Pb^{2+} sobre diferentes masas de carbón activado en polvo. (a) 0,5 g CA, (b) 0,75 g CA y (c) 1,0 g CA.

Figure 4. Adsorption isotherms for the removal of Pb^{2+} ions on different mass of powdered activated carbon. (a) 0,5 g CA, (b) 0,75 g CA and (c) 1,0 g AC.



Para todas las dosis utilizadas, los valores de k (tabla 2) están en el rango entre 0 y 1, el cual, es una medida de la intensidad de la adsorción o de la heterogeneidad de la superficie, siendo más heterogénea si su valor se acerca a cero, mientras que, un valor cercano a la unidad implica procesos de quimiadsorción indicando una adsorción cooperativa [17]. Los altos valores observados para k (tabla 2) muestran la fácil captación de los iones Pb^{2+} sobre el carbón activado.

Los valores de n están en el rango de 33,0 a 37,5 mgg^{-1} y 0,014 y 0,015 dm^3mg^{-1} respectivamente. Resultados similares han sido reportados por otros investigadores [1, 2, 18].

Los coeficientes de correlación R^2 (tabla 2) y la comparación de los datos de equilibrio con los modelos empleados (ver gráfica 7), indican que el modelo de ecuación de Freundlich se ajusta mejor a los resultados experimenta-

les; lo anterior sugiere, que existe una distribución heterogénea de los sitios activos en la superficie del carbón activado.

Los valores encontrados por otros investigadores para la capacidad máxima de adsorción de iones plomo sobre carbón activado son muy diversos, dependiendo principalmente del tipo de precursor utilizado para obtener el carbón activado y las condiciones de operación. En la tabla 3 se recogen algunos de los resultados reportados en la bibliografía para la remoción de iones plomo sobre carbón activado.

3.2.3 Efecto de la dosis de adsorbente

En la figura 8 se muestra el efecto de la dosis de adsorbente en el porcentaje de remoción de Pb^{2+} y la capacidad de adsorción en el equilibrio para una concentración ini-

Figura 5. Comparación entre la ecuación linealizada del modelo de Freundlich y los datos experimentales. (a) 0,5 g CA, (b) 0,75 g CA y (c) 1,0 g CA

Figure 5. Comparison between the equation linearized Freundlich model and the experimental data. (a) 0,5 g CA, (b) 0,75 g CA and (c) 1,0 g CA

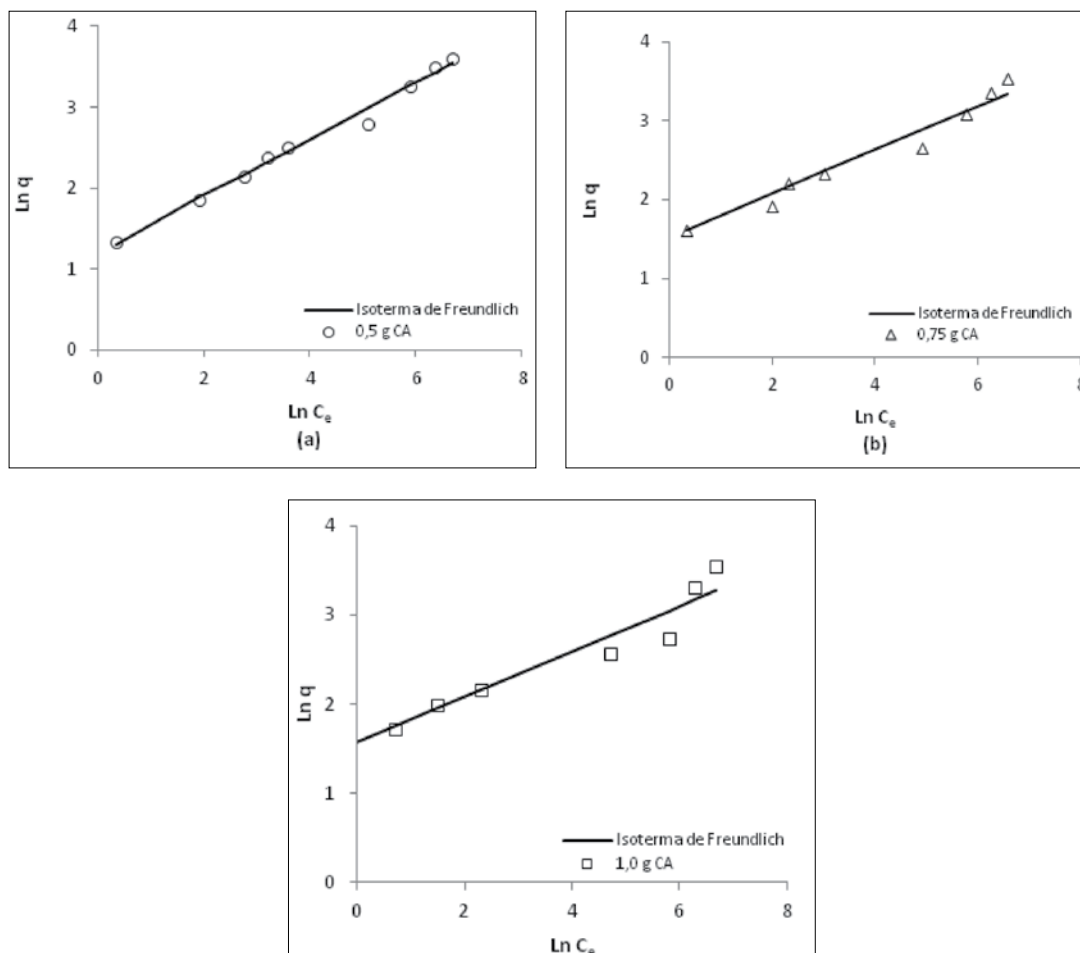
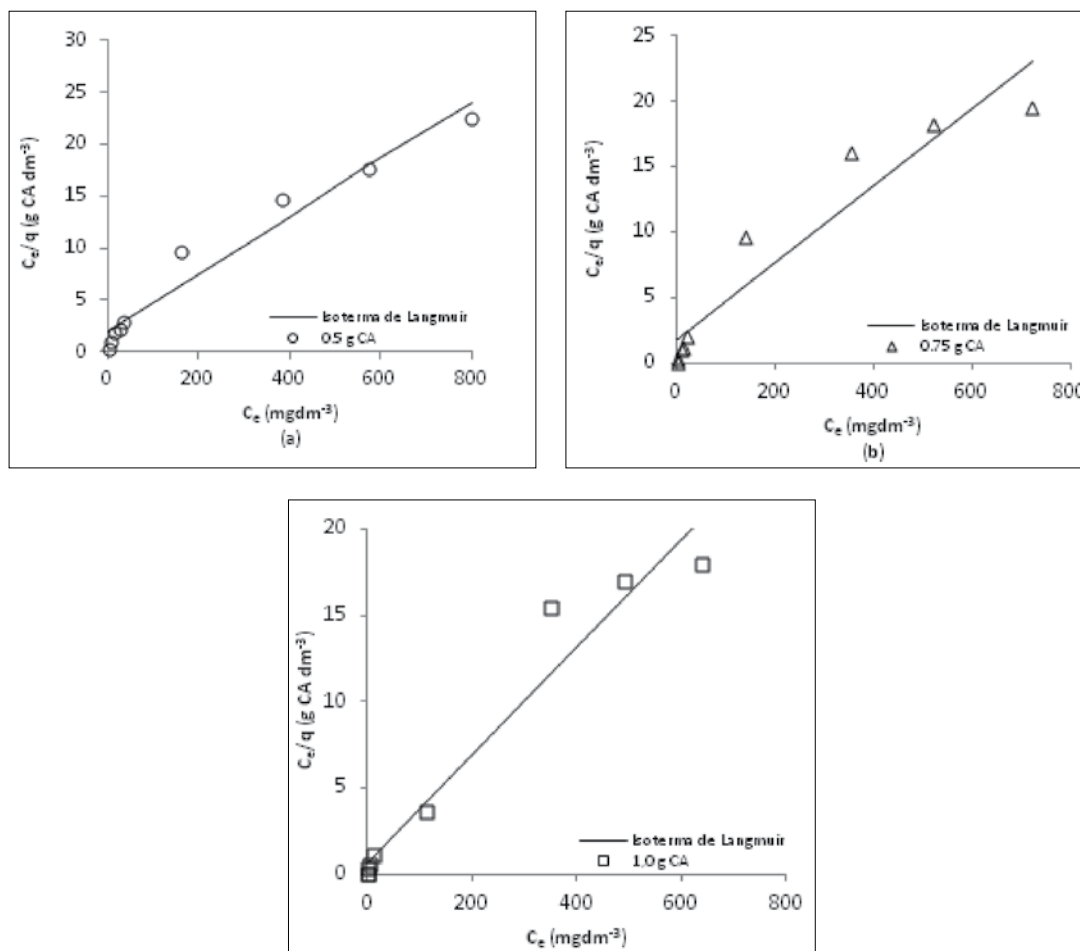


Tabla 3. Comparación de las capacidades de adsorción de Pb^{2+} para varios precursores del carbón activado.
Table 3. Comparison of adsorption capacities of Pb^{2+} for various activated carbon precursors.

Fuente del carbón	Condiciones experimentales					Ref.
	Dosis (gdm ⁻³)	pH	Temperatura (°C)	Concentración (mgdm ⁻³)	qmax (mgg ⁻¹)	
Madera del árbol de tamarindo	1-5	6,5	30	10-50	43,85	[19]
Cáscaras de avellanas	0,5-5	6,7	18	5-200	13,05	[20]
Residuos de café (material lignocelulósico)	1	2-7	25-60	10-90	63	[21]
Melocanna baccifera Roxburgh (Bamboo)	1-5	2-6	29	50-90	53,76	[22]
Este trabajo	5-10	4	25	20-1000	375	

Figura 6. Comparación entre la ecuación linealizada del modelo de Langmuir y los datos experimentales. (a) 0,5 g CA, (b) 0,75 g CA y (c) 1,0 g CA

Figure 6. Comparison between the linearized equation of Langmuir model and experimental data. (a) 0,5 g CA, (b) 0,75 g CA and (c) 1,0 g CA



cial de 20 mgdm⁻³. La figura 8a indica que al aumentar la dosis de adsorbente desde 5 a 10 gdm⁻³, el porcentaje de remoción de Pb^{2+} se incrementa desde 93 a 99,6 %; esta tendencia se debe a la disponibilidad de más sitios activos cuando se aumenta la masa de carbón activado y por lo tanto, una mayor cantidad de iones Pb^{2+} se fijan a la superficie del adsorbente. Por otro lado, la figura 8b muestra que la capacidad de adsorción en el equilibrio disminuye con un aumento en la dosis de adsorbente, esto se debe a que a bajas dosis, todos los sitios activos del carbón activado están totalmente expuestos, al aumentar la dosis solo una parte de los sitios activos están expuestos y ocupados disminuyendo la capacidad de adsorción [23].

4. Conclusiones

- La metodología experimental desarrollada en este trabajo consistió en determinar la capacidad de adsorción de un carbón activado comercial marca Merck®

en la remoción de iones Pb^{2+} en disolución acuosa bajo condición discontinua, a diferentes concentraciones iniciales y dosis de adsorbente, manteniendo constante la temperatura y a un pH inicial de 4,0. Este estudio permitió formular las siguientes conclusiones:

- La superficie del carbón activado estudiado muestra un gran número de grupos funcionales ácidos que permiten fijar por intercambio catiónico los iones Pb^{2+} .
- La capacidad de adsorción del carbón activado depende entre otros factores, de la concentración inicial y de la dosis de adsorbente.
- Los datos de adsorción se ajustan significativamente al modelo de Freundlich.
- La capacidad máxima de adsorción obtenida (37,5 mgg⁻¹) es comparable con la de otros carbones activados.

Figura 7. Comparación entre las ecuaciones de los modelos y los datos experimentales. (a) 0,5 g CA, (b) 0,75 g CA y (c) 1,0 g CA

Figure 7. Comparison between the equations of the models and experimental data. (a) 0,5 g CA, (b) 0,75 g CA and (c) 1,0 g CA

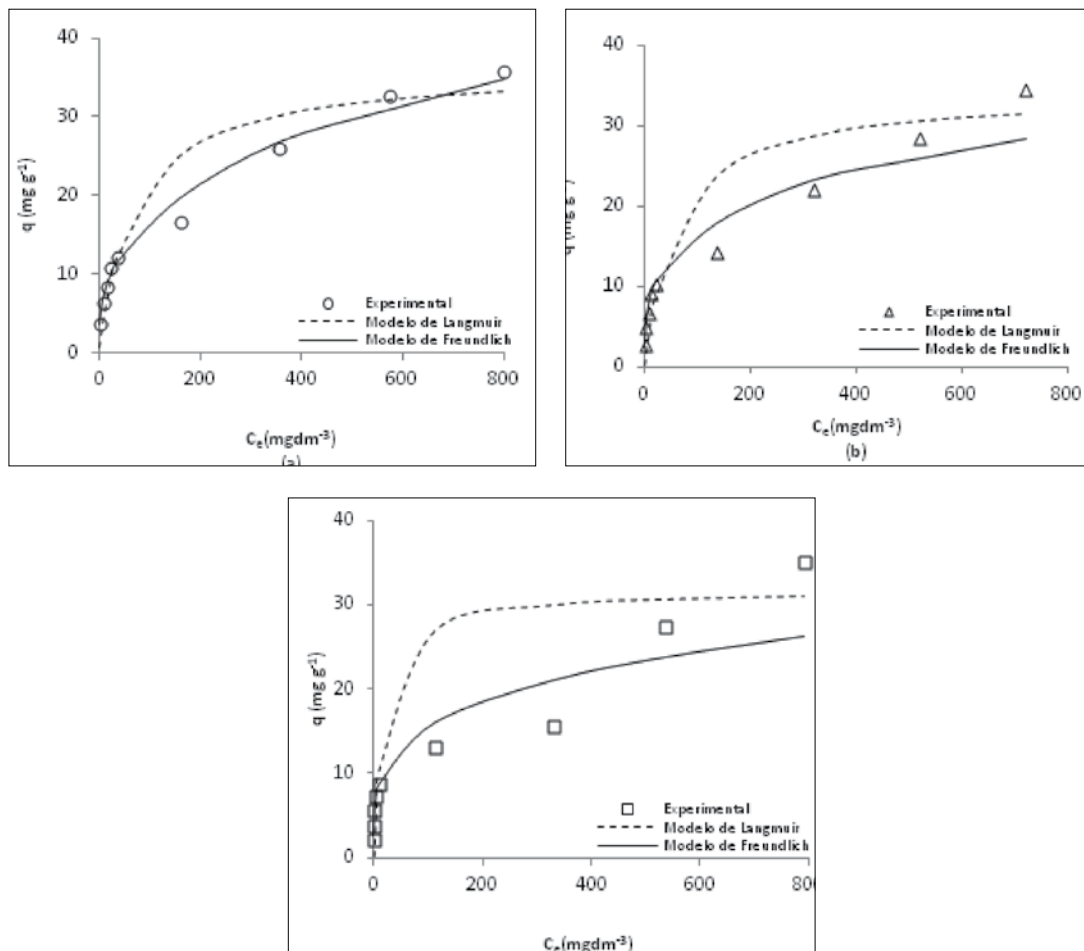
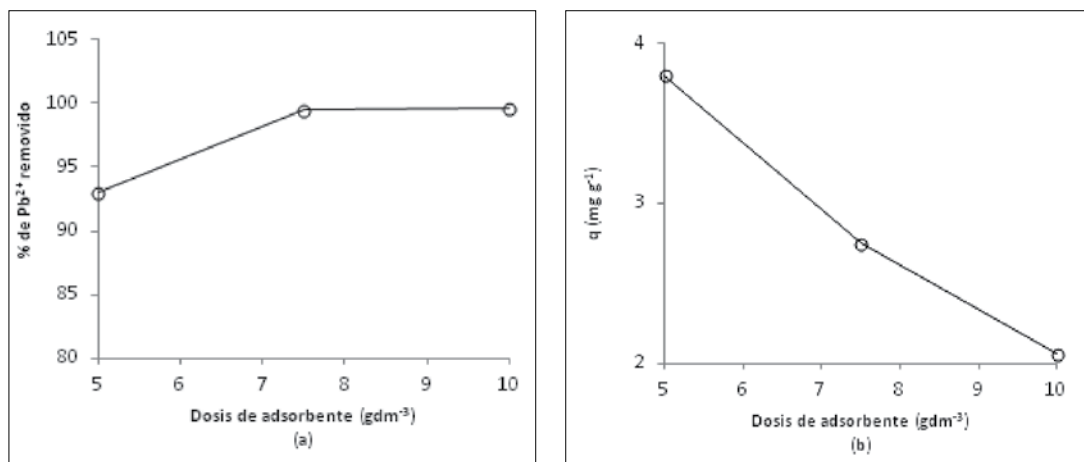


Figura 8. Efecto de la dosis de adsorbente sobre (a) el porcentaje de Pb^{2+} removido y (b) la capacidad de adsorción en el equilibrio. A 25 °C y 20 mg dm^{-3} .

Figure 8. Effect of adsorbent dose on (a) the percentage of Pb^{2+} removal and (b) the adsorption capacity at equilibrium. At 25 °C and 20 mg dm^{-3} .



Agradecimientos

Los autores de este artículo agradecen la colaboración de la Universidad Autónoma del Caribe y de su Centro de Investigaciones por el apoyo brindado para la realización de este estudio.

Referencias

- [1] Jyotsna, G., Krishna, K., Chitra, R., Vinod, K., Removal of lead (II) by adsorption using treated granular activated, *J. Hazard. Mater.*, B125, 211- 220, 2005
- [2] Chandra, P. D., Sahu, J. N., Mohanty, C. R., Raj Mohan, B., Meikap, B. C., Column performance of granular activated carbon packed bed for Pb(II) removal, *J. Hazard. Mater.*, 156, 596-603, 2008.
- [3] Suhas, P.J.M., Carrott, M.M.L., Ribeiro Carrott, Lignin from natural adsorbent to activated carbon: A review, *Bio-resource Tech.*, 98, 2301-2312, 2007.
- [4] Liu, S. X., Chen, X., Chen, X. Y., Liu, Z. F., Wang, H. L., Activated carbon with excellent chromium (VI) adsorption performance prepared by acid-base surface modification, *J. Hazard. Mater.*, 141 (1), 315-319, 2007.
- [5] Wachowski, L., Sobczak, J. W., Hofman, M., Speciation of functional groups formed on the surface of ammoxidised carbonaceous materials by XPS method, *Appl. Surf. Sci.*, 253 (9), 4456-4461, 2007.
- [6] Díaz-Velásquez, J. de J., Carballo-Suárez, L. M., Figueiredo, J. L., Thermal treatments of activated carbon catalysts under N₂O, *Carbon*, 45 (1), 212-214, 2007.
- [7] Böehm, H. P., Surface oxides on carbon and their analysis: a critical assessment, *Carbon*, (40), 145-149, 2002.
- [8] Monser, L., Adhoum, N., Modified activated carbon for the removal of copper, zinc, chromium and cyanide from wastewater, *Sep. Purif. Tech.*, 26, 137-146, 2002.
- [9] Kikuchi, Y., Quian, Q. R., Machida, M., Tatsumoto, H., Effect of ZnO loading to activated carbón on Pb(II) adsorption from aqueous solution, *Carbon*, 44, 195-202, 2006.
- [10] Rios, R. R. V. A., Alves, D. E., Dalmazio, I., Fernando, S., Bento, V., Donnici C. I., Lago R. M., Tailoring activated carbón by surface chemical modification with O, S and N containing molecules, *Matter. Res.*, 6(2), 129-135, 2003.
- [11] Vijayaraghavan, K., Padmesh, T.V.N., Palanivelu, K., Velan, M., Biosorption of nickel (II) ion onto Sargassum wightii: application of two-parameter and three parameter isotherm models, *J. Hazard. Mater.*, B133, 304-308, 2006.
- [12] Foo, K. Y., Hameed, B. H., Insights into the modeling of adsorption isotherm systems, *Chemical Engineering Journal*, 156, 2-10, 2010.
- [13] Bruanuer, S., Emmett, P. H., Teller, E., Adsorption of gases in multimolecular layers, *J. Am. Chem. Soc.*, 60, 309-316, 1938.
- [14] Contescu, A., Contescu, C., Putyera, K., Schwarz, J. A., Surface acidity of carbons characterized by their continuous pK distribution and Böehm titration, *Carbon*, 35(1), 83-94, 1997.
- [15] Adamson, A. W., Gast, A. P., Physical Chemistry of Surfaces, sixth ed., Wiley-Interscience, New York, 1997.
- [16] Gerçel, O., Gerçel, H. F., Adsorption of lead (II) ions from aqueous solutions by activated carbon prepared from biomass plant material of *Euphorbia rigida*, *Chemical Engineering Journal*, 132, 289-297, 2007.
- [17] Haghseresht, F., Lu, G., Adsorption characteristics of phenolic compounds onto coal-reject-derived adsorbents, *Energy Fuels*, 12, 1100-1107, 1998.
- [18] M. Madhava, M., Chandra, G.P., Seshaiyah, K., Choudary, N. V., Wang, M. C., Activated carbon from *Ceiba pentandra* hulls, an agricultural waste, as an adsorbent in the removal of lead and zinc from aqueous solutions; *Waste Management*; 28, 849-858, 2008.
- [19] Acharyaa, J., Sahub, J.N., Mohantyc, C.R., Meikapb, B.C., Removal of lead(II) from wastewater by activated carbon developed from *Tamarind wood* by zinc chloride activation, *Chemical Engineering Journal*, 149, 249-262, 2009.
- [20] Imamoglu, M., Tekir, O., Removal of copper (II) and lead (II) ions from aqueous solutions by adsorption on activated carbon from a new precursor hazelnut husks, *Desalination*, 228, 108-113, 2008.
- [21] Boudrahem, F., Aissani-Benissad, F., Ait-Amar, H., Batch sorption dynamics and equilibrium for the removal of lead ions from aqueous phase using activated carbon developed from coffee residue activated with zinc chloride, *Journal of Environmental Management*, 90, 3031-3039, 2009.
- [22] Lalhruaitluanga, H., Jayaram, K., Prasad, M.N.V., Kumar K.K., Lead(II) adsorption from aqueous solutions by raw and activated charcoals of *Melocanna baccifera* Roxburgh (bamboo) A comparative study, *J. Hazard. Mater.*, 175, 311-318, 2010.
- [23] Gupta, V. K., Rastogi A., Biosorption of lead from aqueous solutions by green algae *Spirogyra* species: kinetics and equilibrium studies, *J. Hazard. Mater.*, 152, 407-414, 2008.