

Adsorción de Metales Pesados de Aguas Residuales de la Mina Lunar de Oro con Carbón Activado de Lenteja de Agua (*Lemna gibba L.*)

Adsorption of Heavy Metals from Residual Waters from the Lunar de Oro Mine With Activated Charcoal of Duckweed (*Lemna gibba L.*)

Wile Mamani Navarro
 wmamani@unaj.edu.pe - Universidad Nacional de Juliaca
 Wilmer Ramiro Inofuente Ccarita
 inofuente.cc@gmail.com - Universidad Nacional de Juliaca
 Diego Wilman De la Cruz Paredes
 dwdp.log4@gmail.com - Universidad Nacional de Juliaca
 Nelson Zea Sacachipana
 nzscatorce@gmail.com - Universidad Nacional de Juliaca
 Reynaldo Salas Sucaticona
 reynaldo1.salas@gmail.com - Universidad Nacional de Juliaca
 Dany Mamani Coaquira
 coaquira.dany@gmail.com - Universidad Nacional de Juliaca
 Reyder Supapuca Mamani
 reyder.navi@gmail.com - Universidad Nacional de Juliaca

Resumen

En este trabajo de investigación se utilizaron lenteja de agua (*Lemna gibba L.*) que se desarrolla en el lago Titicaca, en la región de Puno, para la elaboración del Carbón Activado (CA). El objetivo es estudiar la capacidad de adsorción de los metales pesados empleando CA preparados a partir de la lenteja de agua (*Lemna gibba L.*), por activación química y activados a una temperatura de 500 °C – 600 °C. El proceso de obtención por la activación química consistió en la impregnación de las muestras en proporciones de 1:1, previamente deshidratadas a 60 °C, durante un periodo de 72 horas, con ácido fosfórico como agente activante en concentraciones de 1 N, durante 24 horas. La carbonización en una mufla se basó en la calcinación de 1 hora a 500 °C. Las propiedades fisicoquímicas se estudiaron mediante mediciones de adsorción de metales pesados por espectrofotometría ICP - OES y microscopia electrónica de barrido. El carbón activado obtenido de la lenteja de agua (*Lemna gibba L.*) presenta un diámetro $\leq 2.094 \text{ mm}$ de partículas de mayor tamaño y diámetros $\geq 150.5 \text{ }\mu\text{m}$ de partículas de menor tamaño. El grado de porosidad presenta entre 10.48 μm y 125.3 μm de diámetro longitudinal del poro. Se tomaron muestras de agua superficial en el área de estudio de la zona minera ubicada en el distrito de Ananea, provincia de San Antonio de Putina, Puno, Perú. Se utilizaron los carbones activados a base de *Lemna gibba L.* para la adsorción de metales pesados: Cobre, Hierro, Mercurio, Arsénico, Níquel, Cromo, Cadmio, Plomo y Zinc. La capacidad de adsorción se determinó en dos pruebas analíticas a nivel del laboratorio, el Mercurio (Hg) fue adsorbido en un 99.34% en ambos métodos, método columna de adsorción (MCA) y remoción por agitación magnética (AM), el Hierro (Fe) fue adsorbido en un 97.62% por el método de remoción por AM y solo en un 85.48% por el MCA, el cobre (Cu) fue adsorbido en un 89.13% por el método de remoción por AM, y sin embargo solo 79.29% fue adsorbido por el MCA. Los factores más importantes que influyen en el proceso de adsorción fueron el pH de la solución, la estructura porosa y la acidez superficial del carbón activado.

Palabras claves: Carbón activado, Metales pesados, Adsorción, Remoción, Lenteja de agua.

Abstract

In this research work was used lentil of water (*Lemna gibba L.*) which was developed in Lake Titicaca, in Puno region, for the production of activated carbon (CA). The objective is to study the adsorption capacity of heavy metals using CA prepared from duckweed (*Lemna gibba L.*), by chemical activation and activated at a temperature of 500 °C - 600 °C. The process of obtaining by chemical activation consisted of impregnation of the samples in proportions of 1:1, previously dehydrated at 60 °C, for a period of 72 hours, with phosphoric acid as an activating agent in concentrations of 1 N, for 24 hours. The carbonization in a muffle was based on the calcination of 1 hour at 500 °C. The physicochemical properties were studied by measurements of heavy metal adsorption by ICP - OES spectrophotometry and scanning electron microscopy. Activated charcoal obtained from duckweed (*Lemna gibba L.*) has a diameter ≤ 2.094 mm of particles of larger size and diameters ≥ 150.5 μm of smaller particles. The degree of porosity is between 10.48 μm and 125.3 μm in longitudinal diameter of the pore. Samples of surface water were taken in the study area of the mining area located in the district of Ananea, province of San Antonio de Putina, Puno, Peru. Activated carbons based on *Lemna gibba L.* were used for the adsorption of heavy metals: Copper, Iron, Mercury, Arsenic, Nickel, Chromium, Cadmium, Lead and Zinc. The capacity of adsorption was determined in two analytical tests at the laboratory level, Mercury (Hg) was adsorbed in 99.34% in both methods, adsorption column method (MCA) and removal by magnetic stirring (AM), Iron (Fe) was adsorbed in a 97.62% by the method of removal by AM and only in 85.48% by the MCA, the copper (Cu) was adsorbed in 89.13% by the method of removal by AM, nevertheless only 79.29% was adsorbed by the MCA. The most important factors which influence in the adsorption process were the pH of the solution, the porous structure and the surface acidity of the activated carbon.

Keywords: Activated carbon, Heavy metals, Adsorption, Removal, Duckweed.

Introducción

El agua es un recurso esencial para la vida, pero debido a la irresponsabilidad de las personas y a la ausencia de regulaciones gubernamentales que controlen la emisión de los efluentes domésticos e industriales, sus diversas fuentes se encuentran en muchos casos contaminadas con sustancias orgánicas y metales pesados altamente tóxicos, que afecta tanto al ecosistema como a la salud de los pobladores que viven en las riberas de los cursos de agua principalmente (Gamarra-Torres et al., 2018).

Entre los metales pesados con mayor toxicidad e incidencia se encuentran el Mercurio (Hg), Arsénico (As), Plomo (Pb), Cadmio (Cd) y el Hierro (Fe), cuyos valores según los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para la categoría 4, conservación del ambiente acuático, son: 0.05 mg/L para As, 0.004 mg/L para Cd, 0.001 mg/L para Pb y en tanto para la categoría 3 tenemos el Hg con 0.001 mg/L, según la legislación peruana DS N° 002 – 2008 – MINAM (MINAM, 2008).

Entre los procesos aplicados al tratamiento del agua están: precipitación, ósmosis inversa, reacciones de oxidación avanzada, intercambio iónico, adsorción, entre otros. Siendo el proceso de adsorción el más recomendado por su versatilidad y bajo costo (Vargas-Nieto, Carriazo, & Castillo, 2011). El carbón activado (CA) es un sólido poroso versátil, relativamente estable, con alta área superficial y con una estructura de micro poros que no constituyen marcadas barreras de difusión aún bajo conformaciones granulares compactas (Céspedes, Valencia, & Diaz, 2007). Además el nombre de carbón activado se aplica a una serie de carbones porosos preparados artificialmente, a través de un proceso de carbonización, para que exhiban un elevado grado de porosidad y una alta superficie interna (Luna, González, Gordon, & Martin, 2007).

Para la elaboración de CA, entre estos se pueden mencionar las cáscaras de diversas frutas, la fibra de

coco, la corteza de plátano, la cáscara de arroz, así como también el bambú y aserrín de maderas, el bagazo de la caña de azúcar, entre otros muchos materiales biológicos ya que presentan una adecuada capacidad de adsorción (Carrillo-Quijano, 2013; Luna et al., 2007; Martín-González, Susial, Pérez-Peña, & Doña-Rodríguez, 2013; Primera-Pedrozo, Colpas-Castillo, Meza-Fuentes, & Fernández-Maestre, 2011; Velázquez-Trujillo, Bolaños-Reynoso, & Pliego-Bravo, 2010).

El CA es un material renovable en la medida en que se obtiene a partir de materias primas vegetales (residuos agrícolas, madera, algas, semillas, cortezas), hulla, lignitos, turba y residuos poliméricos (caucho, plásticos, textiles) (Céspedes et al., 2007). En este trabajo se ha utilizado la lenteja de agua (*Lemna gibba L.*) como material precursor del carbón activado. Para la preparación del CA se siguió una metodología probada en trabajos previos a éste, en donde se encontró que el CA presentan una mayor capacidad de adsorción de metales pesados en solución acuosa, los mismos fueron obtenidos a una temperatura de activación de 500 °C. El objetivo de este trabajo es estudiar la capacidad de adsorción de los metales pesados empleando CA preparados a partir de la lenteja de agua (*Lemna gibba L.*), por activación química y activados a una temperatura de 500 °C - 600 °C.

Materiales y Métodos

El estudio está basado en un diseño experimental (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014) que consta de tres etapas: i) obtención del carbón activado ; ii) caracterización física y textural; y iii) método experimental por columna de adsorción y remoción por agitación magnética.

Obtención del carbón activado

La lenteja de agua (*Lemna gibba L.*) es una planta monoica, con flores unisexuales, angiosperma (plantas con flores), monocotiledónea, perteneciente a

la familia *Lemnaceae*. Su cuerpo vegetativo corresponde a una forma taloide, es decir, en la que no se diferencian el tallo y las hojas. Consiste en una estructura plana y verde y una sola raíz delgada de color blanco (Arroyave, 2004).

Las lentejas de agua, para el estudio, se obtuvieron del lago Titicaca, específicamente de la bahía interior en la ciudad de Puno, Perú. En la actualidad constituye uno de los mayores problemas que enfrenta esta urbe debido al proceso de eutrofización que sufre a causa del mal tratamiento de las aguas residuales (Canales-Gutiérrez, 2010). El material precursor del CA fue transportado al laboratorio donde se deshidrataron durante tres días a 60 °C en una estufa; posterior a ello se almacenó hasta su activación y/o análisis.

Para la activación se pesaron 50 g del material precursor (*Lemna gibba L.*) y se adicionaron 50 mL de ácido fosfórico a una concentración de 1N, es decir la impregnación de las muestras fueron en proporciones de 1:1. El material impregnado se dejó 24 horas en contacto. Transcurrido el tiempo de activación, se carbonizó la muestra en mufla eléctrica de 500 °C a 600 °C durante una hora. El material carbonizado obtenido se dejó enfriar a temperatura ambiente y fue lavado varias veces con suficiente agua destilada hasta ajustar su pH entre 6.5 y 7.0

Caracterización física y textural

El CA obtenido fue caracterizado determinando el diámetro de las partículas y del poro. Entre las técnicas de caracterización usadas para el material del CA (*Lemna gibba L.*) se empleó microscopía electrónica de barrido mediante un equipo modelo ZEISS, y una tamizadora marca FORNEY, modelo LA-0441, que soporta hasta 8 tamices más la charola para polvos. El rango obtenido del tamiz para el CA (*Lemna gibba L.*) es del N° 160 al 200.

El carbón activado obtenido de la lenteja de agua (*Lemna gibba L.*) presenta $\leq 2.094 \text{ mm}$ de diámetro como partículas de mayor tamaño y $\geq 150.5 \mu\text{m}$ de diámetro como partículas de menor tamaño. El grado de porosidad presenta entre $10.48 \mu\text{m}$ y $125.3 \mu\text{m}$ de diámetro longitudinal del poro.

Método experimental por columna de adsorción y remoción por agitación magnética

Los ensayos de adsorción se llevaron a cabo por dos procesos experimentales, i) columna de adsorción y ii) agitación magnética. Previo a los ensayos se realizó un análisis de metales pesados por espectrofotometría ICP - OES en las muestras de agua superficial tomadas de una zona minera ubicada en el distrito de Ananea, provincia de San Antonio de Putina, Puno, Perú (4.610 msnm $14^{\circ}40'40''$ LS y $69^{\circ}31'56''$ LW). Previo a los ensayos, las muestras fueron preservadas con ácido nítrico; posterior a ello se dio un tratamiento para evaluar la capacidad de adsorción del carbón activado (*Lemna gibba L.*) que se desarrolló en dos pruebas analíticas a nivel del laboratorio.

Proceso I: Columna de adsorción

Para establecer la adsorción por columna (tubo de adsorción) se utilizaron dos buretas de 100 mL donde se colocaron carbón activado (*Lemna gibba L.*), en forma estratificada y compuesta, y se evaluó la adsorción por un periodo de 48 a 72 horas, a temperatura ambiente.

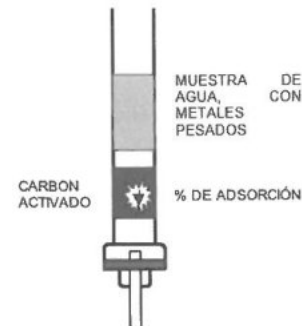


Figura 1. Columna de Adsorción

Proceso II: Agitación magnética

En el proceso de adsorción por agitación magnética se utilizó un equipo de agitador magnético. En el agitador se colocaron 5.00 g de carbón activado (*Lemna gibba L.*), con 500 mL de agua destilada por un periodo de 10 min, 20 min y 30 min, y con velocidades de 400 rpm, 500 rpm y 600 rpm respectivamente. Posterior a los ensayos se realizaron los análisis de metales pesados adsorbidos previo al tratamiento y después, por espectrofotometría ICP - OES.

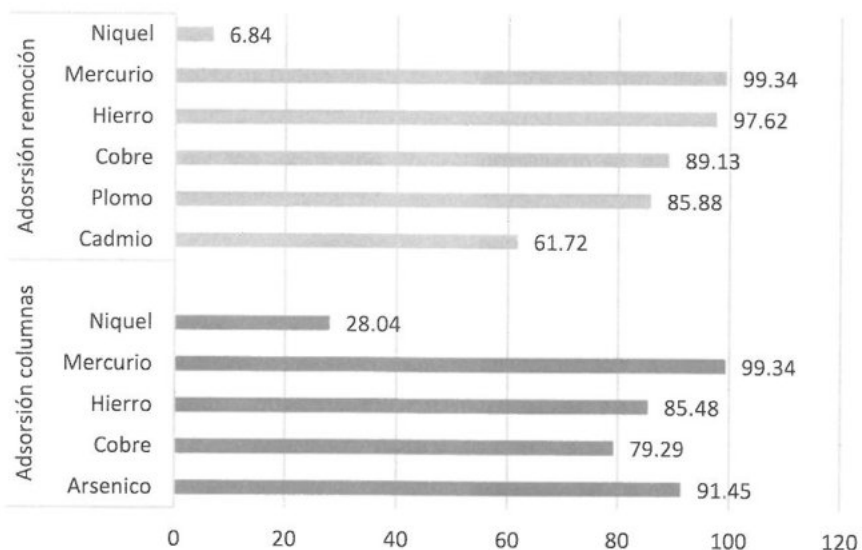


Figura 2. Porcentaje de adsorción obtenido en la fase experimental.

Resultados y discusión

En la figura 3, se observan las imágenes generadas con microscopia de barrido electrónico: CA_0, CA_1, CA_2 y CA_3 a una magnificación de 29X, 30X, 100X y 203X. La muestra CA_0 y CA_1, presenta imágenes de las partículas de carbón activado (*Lemna gibba L.*) en las diferentes dimensiones. Las partículas de mayor tamaño presentan un diámetro $\leq 2.094 \text{ mm}$ y las de menor tamaño diámetros $\geq 150.5 \mu\text{m}$. Por su parte, las imágenes de CA_2, CA_3 evidencian el grado de porosidad del material; presentando entre $10.48 \mu\text{m}$ y $125.3 \mu\text{m}$ de diámetro longitudinal de poro.

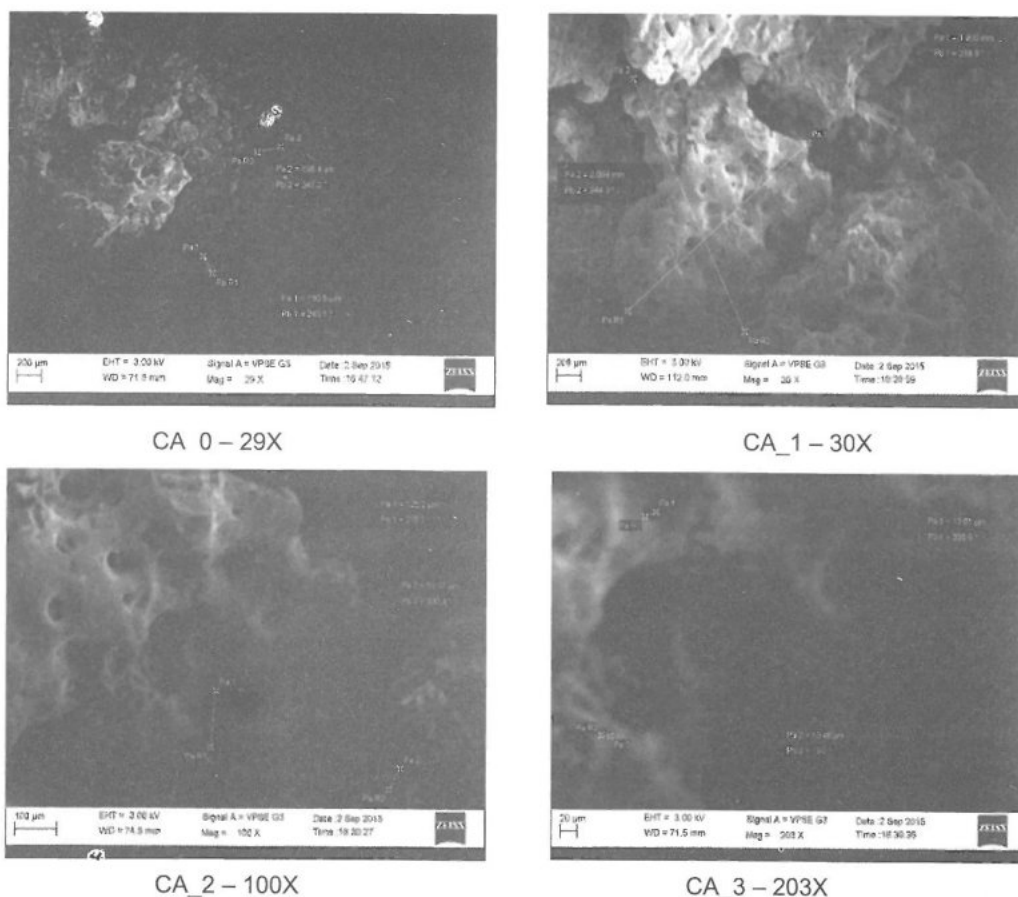


Figura 3. Imágenes obtenidas con microscopia electrónica de barrido, CA_0, CA_2 (lado izquierdo) y CA_1, CA_3 (lado Derecho) con aumentos entre 29X y 203X

En las tablas 1a y 1b se reportan los resultados de metales pesados como parámetros del ensayo, previo al tratamiento. Tenemos entre los metales pesados con mayor toxicidad e incidencia el Mercurio con 0.6186 mg/L , Arsénico con 1.281 mg/L , Plomo 0.1941 mg/L y Cadmio con 0.027015 mg/L en promedio, sobrepasando el parámetro establecido por los *Estándares Nacionales de Calidad Ambiental* (MINAM, 2008). En la categoría 4, conservación del ambiente acuático, se obtuvo 0.05 mg/L para Arsénico, 0.004 mg/L para Cadmio, 0.001 mg/L para Plomo; en tanto que en la categoría 3, el Mercurio obtuvo $0,001 \text{ mg/L}$.

Tabla 1a.
Parámetros de metales pesados durante los ensayos expresado en mg/L

Ensayos	Cu	Fe	Hg	Ag	Cd	Cr
Antes - M1	0.1683	116	0.06852	< 0.0024	0.02683	0.02759
Antes - M2	0.1588	117	0.0552	< 0.0024	0.0272	0.02503
Adsorción - MA	0.0144	0.619	< 0.00041	< 0.0024	0.00085	0.05329
Adsorción - MB	0.062	46	< 0.00041	< 0.0024	0.26261	0.01231
Adsorción - MC	0.0253	4.12	< 0.00041	< 0.0024	0.09796	0.04693
Remoción - MD	0.0178	2.77	< 0.00041	< 0.0024	0.01034	0.01816

Tabla 1b.
Parámetros de metales pesados durante los ensayos expresado en mg/L

Ensayos	As	Ni	Pb	Sb	Zn
Antes - M1	1	1.1646	0.1968	0.0118	3.701
Antes - M2	1	1.1571	0.1914	0.0052	3.591
Adsorción - MA	0.1494	0.38232	0.0313	0.00854	0.8794
Adsorción - MB	0.1075	1.2032	1.102	< 0.00049	3.819
Adsorción - MC	0.0717	0.94052	0.5871	0.00125	4.451
Remoción - MD	7	1.0814	0.0274	0.00551	3.248

En la figura 4 se presenta el diagrama de Schoeller – Berkloff, que permite describir la capacidad de adsorción del carbón activado en relación a los metales pesados como parámetros analizados. El Mercurio (Hg) fue adsorbido en un 99.34% en ambos métodos (método columna de adsorción y remoción por agitación magnética - AM), el Hierro (Fe) fue adsorbido en un 97.62% por el método de remoción por AM y solo en un 85.48% por el método de columna de adsorción. El Cobre (Cu) fue adsorbido en un 89.13% por el método de remoción por AM, y sin embargo solo 79.29% por el método de columna de adsorción.

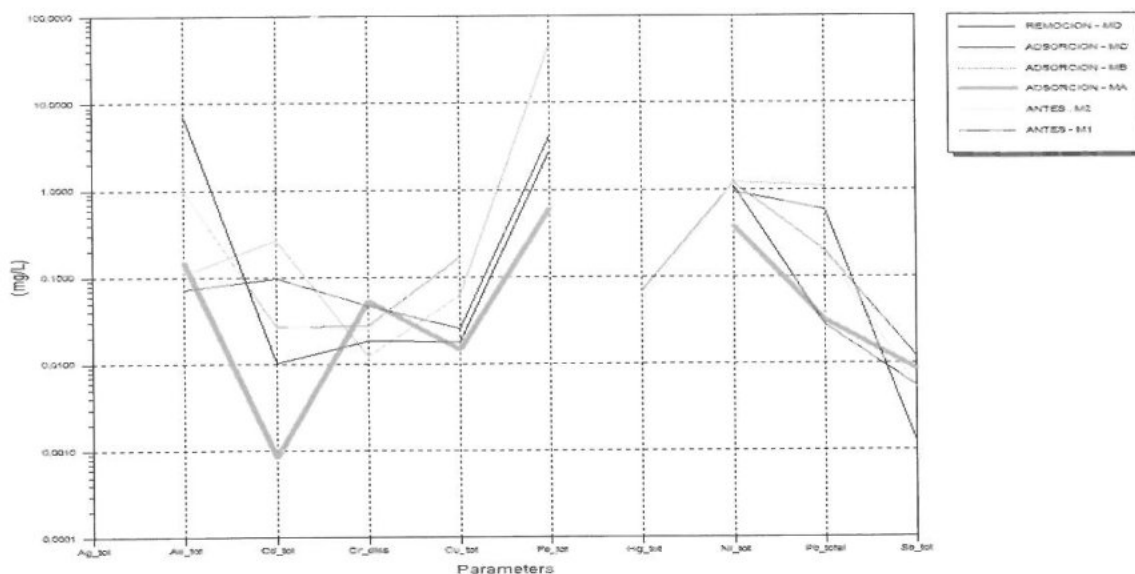


Figura 4. Diagrama de Schoeller – Berkloff

Contrariamente a los demás metales pesados observados, en el caso de Arsénico (*As*) la capacidad de adsorción se dio en un 91.45% por el método de columna de adsorción y sin embargo por el método de remoción por AM, se registró nula adsorción, es decir solo un aumento de la concentración de este metal. Para el caso de Plomo (*Pb*) y Cadmio (*Cd*) se observó una capacidad de adsorción de 85.88% y 61.72% respectivamente por el método de remoción por AM, y no se registró adsorción alguna por el método de columna de adsorción, este fenómeno se repite para ambos métodos en el caso de Cromo Total (*Cr*).

El comportamiento descrito anteriormente puede estar asociado a la naturaleza del ion en estudio, un comportamiento similar a distinto *pH*, lo cual indicaría que son sensibles al *pH* de la solución y a la acidez de la superficie del CA, esto indicaría que en soluciones acuosas a *pH* menores al punto isoeléctrico la superficie del CA se encuentra cargada en forma positiva lo cual crearía repulsiones electrostáticas con los iones Cd^{2+} y $Cr(Total)$; además, a *pH* bajos se presenta un efecto competitivo en la solución entre los iones H^+ y los iones metálicos, lo cual contribuye a una reducción de la capacidad de adsorción de los metales. Por el contrario, a *pH* mayores, la superficie del CA se encontraría cargada en forma negativa lo cual favorecería las atracciones electrostáticas con los iones metálicos (Sun-Kou, Obregón-Valencia, Pinedo-Flores, Paredes-Doig, & Aylas-Orejón, 2014).

Efecto del pH. Las propiedades adsorbentes de un carbón activado no dependen únicamente de la superficie y la porosidad. La presencia de oxígeno, hidrógeno y nitrógeno en forma de grupos funcionales en la superficie del carbón ejerce un gran efecto en las propiedades adsorbentes, especialmente frente a moléculas polares o polarizables (Rodríguez-Reinoso, 2007).

Los factores más importantes que influyen en el proceso de adsorción son el *pH* de la solución, la estructura porosa y la acidez superficial del carbón activado. La acidez superficial del carbón, la porosidad del adsorbato y el *pH* de la solución son las variables determinantes en el proceso de adsorción de los iones Cd^{2+} , $Cr(Total)$ y Pb^{2+} utilizando carbón activado (Sun-Kou et al., 2014).

Conclusiones

Las partículas de carbón activado obtenido a partir de lenteja de agua (*Lemna gibba L.*) presentan diámetros $\leq 2.094 \text{ mm}$ a cuanto a las de mayor tamaño y diámetros $\geq 150.5 \text{ }\mu\text{m}$ con respecto a las de menor tamaño. El grado de porosidad determinado fluctúa entre $10.48 \text{ }\mu\text{m}$ y $125.3 \text{ }\mu\text{m}$ de diámetro longitudinal del poro.

En las pruebas realizadas con el empleo del carbón activado de lenteja de agua (*Lemna gibba L.*) se alcanzó un porcentaje de 99.34% de adsorción en el caso del Mercurio (*Hg*), por los métodos de columna de adsorción y remoción por agitación magnética, hasta una absorción mínimamente 28.04% para el caso del Níquel, por el método de la columna de adsorción y 6.84% de adsorción por el método de remoción por agitación magnética.

Las propiedades adsorbentes del carbón activado (*Lemna gibba L.*) no dependen únicamente de la superficie y la porosidad, sino también de otros factores más importantes que influyen en el proceso de adsorción como el *pH* de la solución, esto indicaría que en soluciones acuosas a *pH* menores al punto isoeléctrico la superficie del carbón activado se encuentra cargada en forma positiva, lo cual crearía repulsiones electroestáticas con los metales pesados como el Cromo (*Cr*), Cadmio (*Cd*) y Plomo (*Pb*), lo que indicaría el efecto contrario a la adsorción.

Recomendaciones

Desarrollar estudios sobre la capacidad de adsorción de otras biomásas que correspondan a materiales residuales abundantes y de bajo costo, además de realizar investigaciones con variables determinantes como el grado *pH* y temperatura para la adsorción de los metales pesados de *As*, *Cr*, *Cd* y *Pb*.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero brindado por la Vicepresidencia de Investigación de la Universidad Nacional de Juliaca – Puno, Perú a través del Proyecto Semilleros de Investigación UNAJ.

Referencias bibliográficas

- Arroyave, M. del P. (2004). La lenteja de agua (*Lemna minor* L.): una planta acuática promisoría. *Revista EIA*, (1), 33–38. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/eia/n1/n1a04.pdf>
- Canales-Gutiérrez, Á. (2010). Evaluación de la biomasa y manejo de *Lemna gibba* (lenteja de agua) en la bahía interior del Lago Titicaca, Puno. *Ecología Aplicada*, 9(2), 91–99. Disponible en: <http://www.scielo.org.pe/pdf/ecol/v9n2/a04v9n2.pdf>
- Carrillo-Quijano, C. C. (2013). Producción de carbón activado y sílice a partir de cascarilla de arroz - una revisión. *Scientia et Technica*, 18(2), 422–429. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4457609.pdf>
- Céspedes, N. E., Valencia, J. S., & Diaz, J. de J. (2007). Remoción de Cromo VI de soluciones acuosas por adsorción sobre carbones activados modificados. *Revista Colombiana de Química*, 36(3), 305–322. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rcq/v36n3/v36n3a04.pdf>
- Gamarra-Torres, O. A., Barrena-Gurbillón, M. Á., Barboza-Castillo, E., Rascón-Barrios, J., Coroto, F., & Taramona-Ruiz, L. A. (2018). Fuentes de contaminación estacionales en la cuenca del río Utcubamba, región Amazonas, Perú. *Arnaldoa*, 25(1), 179–194. <https://doi.org/http://doi.org/10.22497/arnaldoa.251.25111>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación. Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Luna, D., González, A., Gordon, M., & Martin, N. (2007). Obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco. *Contactos*, 64, 39–48. Disponible en: <https://archive.org/details/CarbonActivadoCOCO>
- Martín-González, M. A., Susial, P., Pérez-Peña, J., & Doña-Rodríguez, J. M. (2013). Preparation of activated carbons from banana leaves by chemical activation with phosphoric acid: Adsorption of methylene blue. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 12(3), 595–608. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmiq/v12n3/v12n3a21.pdf>
- MINAM. (2008). Decreto Supremo N° 002 - 2008 - MINAM que aprueban los estándares nacionales de calidad ambiental para agua. Lima - Perú: Normas Legales y Sentencias El Peruano. Disponible en: http://www.ana.gob.pe/media/664662/ds_002_2008_minam.pdf
- Primera-Pedrozo, O., Colpas-Castillo, F., Meza-Fuentes, E., & Fernández-Maestre, R. (2011). Carbones activados a partir de bagazo de caña de azúcar y zuro de maíz para la adsorción de cadmio y plomo. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 35(136), 387–396. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/racefn/v35n136/v35n136a12.pdf>
- Rodríguez-Reinoso, F. (2007). El carbón activado como adsorbente universal. In *Sólidos porosos: preparación, caracterización y aplicaciones* (pp. 1–42). Bogotá - Colombia: Ediciones Uniandes.
- Sun-Kou, M. del R., Obregón-Valencia, D., Pinedo-Flores, Á., Paredes-Doig, A. L., & Aylas-Orejón, J. (2014). Adsorción de metales pesados empleando carbones activados preparados a partir de semillas de aguaje. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 80(4), 225–236. Disponible en: <http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v80n4/a02v80n4.pdf>
- Vargas-Nieto, C., Carriazo, J. G., & Castillo, E. (2011). Estudio de materiales adsorbentes de bajo costo para remover Cr (VI) de efluentes acuosos. *Ingeniería e Investigación*, 31(1), 154–162. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/iei/v31n1/v31n1a16.pdf>
- Velázquez-Trujillo, A., Bolaños-Reynoso, E., & Pliego-Bravo, Y. S. (2010). Optimización de la producción de carbón activado a partir de bambú. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 9(3), 359–366. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmiq/v9n3/v9n3a10.pdf>