

Biomasa residual para remoción de mercurio y cadmio: una revisión

Waste biomass for the removal of mercury and cadmium: A review

COLCIENCIAS TIPO 3. ARTÍCULO DE REVISIÓN

RECIBIDO: OCTUBRE 31, 2012; ACEPTADO: NOVIEMBRE 27, 2012

Candelaria Tejada Tovar

candelariatjada@yahoo.com

Ángel Villabona Ortiz

angelvillabona@yahoo.es

Víctor Ruiz Rangel

v_ruiz_r@yahoo.com

Universidad de Cartagena

Resumen

La contaminación de las aguas residuales industriales con metales pesados es uno de los problemas ambientales más graves que se presenta hoy en día. El tratamiento de estos efluentes mediante adsorbentes extraídos de biomasa residual ha sido estudiado durante los últimos años como una alternativa económica y eficiente, con posibilidades para su aplicación industrial. En el presente artículo se identifican algunas biomasa usadas y su capacidad de adsorción de Mercurio y Cadmio en aguas contaminadas. Se encontró que los bioadsorbentes pretratados químicamente presentan mayor porcentaje de remoción que los que no han sido modificados, la biomasa con mejores resultados fue la cascara de arroz, para el mercurio, modificada con ácido sulfúrico con una remoción de 384,6 mg/g, y para el cadmio, modificada con álcalis con una remoción de 125,94 mg/g. Además, la cinética del proceso de adsorción, en la mayoría de los experimentos, es regida por la ecuación cinética de pseudo-segundo orden.

Palabras Clave

Adsorción; biomasa; cadmio; mercurio.

Abstract

The pollution of industrial wastewater with heavy metals is one of the most serious environmental problems presented today. The treatment of these effluents using waste biomass extracted adsorbents has been studied in recent years as an economic and efficient, with the potential for industrial application. This article identifies some biomass used and its adsorption capacity of mercury and cadmium in contaminated water. Was found that with biomass chemically pretreated has higher removal percentage that biomass has not been modified, the best performing biomass was rice husk for mercury, sulfuric acid modified with removal of 384.6 mg/g, and cadmium, alkali modified with removal of 125.94 mg/g. In addition, the kinetics of the adsorption process in most of the experiments is governed by the rate equation of pseudo-second order.

Keywords

Adsorption; biomass; cadmium; mercury.

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación por metales pesados es un problema ambiental que ha tenido un notorio crecimiento, debido a que dichos metales son de uso generalizado y se encuentran frecuentemente en las aguas residuales industriales. La liberación de los efluentes que contienen estos iones metálicos supone una amenaza no sólo para la vida acuática, sino también a toda la cadena alimentaria, a lo largo de la cual se acumulan a una mayor concentración, y no se degradan por ningún método. La toxicidad de los metales pesados se puede analizar desde diferentes puntos de vista: toxicidad a largo plazo; transformación a formas más tóxicas; biomagnificación, entre otras. Algunos metales como el mercurio y el cadmio, son muy tóxicos, incluso en concentraciones del orden de 0,001 a 0,1 mg/L (Cuizano & Navarro, 2008).

Actualmente existen diversas tecnologías, que hacen frente a este tipo de desechos tóxicos, entre las que destacan: la precipitación, ultrafiltración, ósmosis inversa, intercambio iónico y electrodiálisis. Estos métodos pueden remover hasta el 99 % de la toxicidad de estos metales, sin embargo, y a pesar de su eficacia, el alto costo de instalación y mantenimiento de estas tecnologías hace imposible su aplicación a las pequeñas y medianas empresas. En consecuencia, el sector productivo que trabaja con metales pesados sigue generando descargas acuosas con metales altamente contaminantes. (Rozas, 2008)

Por tal razón, actualmente se han experimentado nuevas tecnologías de remoción de metales, de manera que reemplacen de forma más eficiente los métodos convencionales de tratamiento de efluentes industriales. Entre las alternativas más promisorias se encuentra el uso de residuos agrícolas tales como: Cascara de maní (Ricordel, Taha, Cisse, & Dorange G, 2001), Madera de papaya (Basha, Murthy, & Jhaa, 2009), Aserrín, Bagazo de caña, Cascara de arroz, Pajas de trigo (Osman, Badwy, & Ahmad, 2010), Residuos de manzana (Lee, Jung, Chung, Lee, & Yang, 1998), entre otros.

En la presente revisión se realizó una búsqueda de las biomásas lignocelulósicas usadas en los últimos 5 años para la remoción en aguas de mercurio y cadmio, con el fin de identificar aquellas con las cuales se obtiene mejores resultados, y que puedan ser utilizadas como potenciales bioadsorbentes para la remoción de estos metales en efluentes residuales industriales.

II. GENERALIDADES DE LOS METALES PESADOS

Los metales pesados ejercen efectos biológicos que pueden ser beneficiosos o perjudiciales para los distintos organismos, no son biodegradables y tienden a acumularse (Inglezakis, Loizidou, & Grigoropoulou, 2003), causando numerosas enfermedades y trastornos, razón por la cual han sido catalogados como una clase emergente de cancerígenos humanos (Farajzadeh & Monji, 2004). Elevadas concentraciones de algunos de estos elementos en el ambiente o en determinados procesos pueden desencadenar una serie de problemáticas que van desde la degradación y pérdida de fertilidad de suelos, hasta afectar procesos de tratamiento de aguas residuales.

Entre los elementos que han sido estudiados ampliamente durante estas últimas décadas se encuentran el hierro (Fe), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), boro (B), cobalto (Co), zinc (Zn), cobre (Cu), níquel (Ni), mercurio (Hg), plomo (Pb), cadmio (Cd), cromo (Cr), arsénico (As) y selenio (Se). Elementos tales como Fe, Mn, Mo, Cu y Zn son considerados como esenciales para el correcto crecimiento y funcionamiento de plantas, animales y humanos, mientras que elementos tales como el mercurio y el cadmio, no son esenciales para ningún organismo, siendo estos, considerados por la Agencia de Protección al Medio Ambiente de los Estados Unidos como los elementos de mayor potencialidad tóxica aún en concentraciones reducidas (Vallejo, 2008).

La presencia de metales pesados en el suelo, al igual que en aguas subterráneas y superficiales, puede ser resultado de procesos naturales y de actividades antropogénicas, siendo esta última la principal responsable del incremento de los niveles de metales pesados en el ambiente, debido a la descarga de residuos líquidos en aguas superficiales, en el aire por medio de procesos de combustión, y en los suelos a través de actividades agropecuarias. (Jarup, 2003; Santos, & Oliveira, 2003).

Los efluentes industriales son considerados como los principales responsables de la contaminación de aguas superficiales, efluentes como los producidos por refinerías de petróleo, industrias de pulpa y papel, textiles, metalúrgicas, industrias productoras de químicos orgánicos e inorgánicos, de plástico, curtiembres, mineras, de galvanoplastia, entre otras, contienen una gran cantidad de metales pesados (Ahluwalia & Goyal, 2007). En la Tabla 1, se pueden observar los metales pesados que suelen estar presentes en los efluentes generados por estas industrias.

Tabla 1. Metales Pesados presentes en efluentes industriales*

Tipo de industria	Cu	Ni	Hg	Pb	Cd	Cr
Refinerías de petróleo	X	X		X		X
Pulpa y papel	X	X	X	X		X
Textiles	X	X		X	X	X
Metalúrgicas		X		X	X	X
Químicos orgánicos			X	X	X	X
Químicos inorgánicos			X	X	X	X
Plásticos						
Curtiembres						X
Mineras	X		X	X	X	
Drenaje ácido de minas	X					
Galvanoplastia	X	X		X		X

* (Manzoor, Shah, Shaheen, Khaliq, & Jaffar, 2006; Mohan & Pittman, 2006; Sial, Chaudhary, Abbas, Latif, & Khan, 2006; Cavaco, Fernandes, Quina, & Ferreira, 2007).

En general, cabe destacar que el tipo y concentración de los metales pesados presentes en los residuos líquidos generados por las industrias va a depender del proceso productivo, de la etapa en que se produzcan y de la materia prima utilizada (Sharma et al., 2007).

A. Métodos convencionales utilizados en el tratamiento de aguas contaminadas

La contaminación por metales pesados y el impacto a la salud pública, ha conducido al hombre a buscar alternativas para resolver este problema, utilizando métodos tradicionales como son:

- *Osmosis inversa*. Eliminación de iones metálicos por permeación a través de membranas semipermeables. La ósmosis inversa es capaz de remover hasta el 99.5 % de la contaminación (Villanueva, 2007).
- *Electrodiálisis*. Es un proceso de separación en el que se combina el efecto osmótico y el electrolítico para separar especies iónicas de una solución acuosa. Este método aprovecha la propiedad que tienen los iones en solución de migrar, al aplicarles un potencial eléctrico, los iones positivos se desplazan hacia el electrodo negativo (cátodo) y los iones negativos se desplazan hacia el electrodo positivo (ánodo) y el agua purificada se conduce al recipiente de almacenamiento (Driss, 2010).
- *Ultrafiltración*. Es una operación de separación que comparte características de una filtración normal y de la ósmosis inversa. Consiste en la remoción de partículas coloidales y dispersas de un líquido que consiste en hacer pasar el mismo a través de una membrana aplicando alta presión (Ahalya, Ramachandra, & Kanamadi, 2003)

- *Intercambio iónico*. Proceso por el cual ciertos iones no deseados son cambiados por otros iones, que están unidos a las partículas de una resina; normalmente los iones hidrógeno de la resina, se cambian por los cationes, y los iones hidroxilo de la resina se cambian por los aniones. Los iones hidrógeno e hidroxilo se combinan, formando agua pura. El proceso también es rápido y reversible (Maita, 2008; Ahalya et al., 2003).
- *Precipitación química*. Se entiende como la formación por acción de los reactivos apropiados, de compuestos insolubles con los iones metálicos indeseables contenidos en aguas residuales. El proceso tiene lugar al desolubilizarse el metal y formarse el precipitado (Martin, 2008).

Además de los métodos descritos, la tecnología de membranas, también ha sido usada para remover estos metales pesados de las aguas residuales de la industria. Sin embargo, estos procesos pueden ser inefectivos o costosos, especialmente cuando los iones de estos metales están disueltos en soluciones acuosas en el orden de 1-100 mg/L (Volesky, 1990a; 1990b). Asimismo, requieren una gran inversión de dinero en la capacitación del personal (Gupta & Babu, 2009).

III. BIOADSORCIÓN DE METALES PESADOS

La bioadsorción es un fenómeno físico mediante el cual, el sólido se adhiere a la superficie de materiales orgánicos vivos o inertes, este proceso se caracteriza, por la unión rápida y reversible de ciertos iones a la superficie del bioadsorbente. Es una tecnología alternativa, eficiente y de bajo costo para la remoción de metales pesados en efluentes acuosos, permitiendo la reutilización de residuos procedentes de procesos industriales o agrícolas, entre estos, la biomasa lignocelulósica, la cual es el conjunto de materia vegetal compuesta de lignina en un 25%, hemicelulosa en un 25%, celulosa en un 35% y un 15% de otros compuestos. La lignocelulosa se encuentra en las paredes celulares de las plantas, su porcentaje y composición varía respecto a la especie de las mismas (Cuervo, Folch, & Quiroz, 2009).

Para la fijación de metales pesados en la bioadsorción se ha sugerido una serie de mecanismos que explica la retención o secuestro del metal en diferentes partes del biosorbente. Así, puede ocurrir vía:

- *Complejación o quelación*. El metal se une a los centros activos de la pared celular mediante enlaces químicos

formando determinados complejos.

- *Adsorción física.* Se incluyen aquí los fenómenos asociados a fuerzas de Van der Waals. En este caso la biosorción es rápida y reversible.
- *Intercambio iónico.* Propio de los iones metálicos divalentes que se intercambian con iones propios de los polisacáridos presentes en la biomasa. El proceso también es rápido y reversible.
- *Precipitación.* El mecanismo está asociado a la formación de un complejo en la pared celular que posteriormente es hidrolizado (Vallejo, 2008).

A. Modelos cinéticos más usados en procesos de adsorción de metales

La cinética de la adsorción describe la velocidad de atrapamiento del adsorbato, lo cual controla el tiempo de residencia de éste en la interfase sólido-disolución, además, permite predecir la velocidad a la cual el contaminante se remueve del efluente tratado, por tal razón se requiere el conocimiento de las leyes de velocidad que describen el sistema de adsorción (Ho & McKay, 1999).

Para describir lo anterior, se ha considerado usar los modelos que se detallan a continuación, a fin de determinar el mejor ajuste de los datos experimentales a cada uno de ellos (Cheung, 2000).

1) Modelo de Primer Orden Reversible

La ecuación matemática correspondiente a la cinética de primer orden reversible se basa en la suposición de que a cada ión metálico se le asigna un sitio de adsorción del material adsorbente, lo cual en términos de velocidad de reacción se expresa como lo muestra la ecuación 1:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 \times (q_e - q_t) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde q_t (mmol/g) es la cantidad adsorbida en un tiempo t , q_e (mmol/g) es la cantidad adsorbida en el equilibrio y k_1 (1/min) es la constante cinética de primer orden.

2) Modelo de Pseudo Segundo Orden

Este modelo fue desarrollado por Ho y McKay y dado a conocer en 1999. En él se supone que el adsorbato se adsorbe en dos sitios activos de la biomasa. A partir de esta fecha, muchas más investigaciones han reportado un mejor

ajuste de los datos experimentales obtenidos a este modelo (Ecuación 2), con coeficientes de correlación superiores a los de los otros modelos ensayados.

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 \times (q_e - q_t)^2 \quad \text{Ecuación 2}$$

Integrando la ecuación anterior y manteniendo constantes las condiciones de contorno descritas para el modelo anterior, se tiene, la ecuación 3.

$$q_t = \frac{t}{\frac{1}{h} + \frac{t}{q_e}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde k_2 es la constante cinética de pseudo de segundo orden (g/mmol.min) y $h = k_2 \times q_e^2$ siendo h (mmol/g.min) la velocidad inicial de adsorción.

3) Modelo de Elovich

Este modelo, de aplicación general en procesos de quimioadsorción, supone que los sitios activos del bioadsorbente son heterogéneos y por ello exhiben diferentes energías de activación, basándose en un mecanismo de reacción de segundo orden para un proceso de reacción heterogénea. Tal como se muestra en la Ecuación 4.

$$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} \ln t \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde α (mmol / g min) es la velocidad inicial de adsorción, β el grado de cobertura de la superficie y la energía de activación implicada en quimiosorción (g/mmol).

Este modelo ha mostrado resultados satisfactorios en la identificación del mecanismo controlante en procesos de adsorción de un soluto en fase líquida a partir de un sólido adsorbente (Cheung, 2000).

4) Modelo de Difusión Intraparticular

El mecanismo de difusión intraparticular en el interior de los poros de la partícula de adsorbente está basado en el transporte de soluto a través de la estructura interna de los poros y la difusión propiamente dicha en el sólido, lo que conlleva a que el adsorbente posea una estructura porosa homogénea. En este proceso, la velocidad inicial es

directamente proporcional a la concentración del soluto. La difusión intraparticular se caracteriza por la dependencia entre la adsorción específica y la raíz cuadrada del tiempo, siendo la pendiente la velocidad de difusión intraparticular.

Con base en lo anterior, la ecuación 5, que define la difusión intraparticular viene dada por:

$$q_t = k \times \sqrt{t} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde k ($\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1/2}$) es la constante de velocidad de difusión intraparticular. Esta ecuación ha sido utilizada por diferentes investigadores (Cheung, 2000), para determinar si la difusión intraparticular es la etapa controlante de la dinámica de bioadsorción de iones metálicos.

IV. BIOMASAS RESIDUALES UTILIZADAS PARA REMOVER METALES PESADOS EN AGUAS

Revisando los artículos indexados en las bases de datos durante los últimos cinco años se encontraron diferentes biomasas que han sido utilizadas para la remoción de Cadmio y Mercurio en aguas contaminadas, y que a continuación se describen.

A. Remoción de mercurio con biomasa residual

1) Adsorción de Mercurio utilizando helechos arborecenses

Ho y Wang (2008), estudiaron el comportamiento de adsorción de mercurio en soluciones acuosas, utilizando Helechos Arborecenses. Se encontró que la capacidad de adsorción depende de la temperatura, ya que al aumentarla, también aumenta la capacidad de adsorción. La máxima adsorción fue de 26.5 mg/g a una temperatura de 25° C.

2) Remoción de Mercurio utilizando corteza de eucalipto

En este estudio se propone la utilización de la corteza de eucalipto (*eucalyptus camaldulensis*) como un bioadsorbente para la eliminación de Hg (II) en soluciones acuosas. Las variables de funcionamiento estudiadas fueron dosificación de adsorbente, fuerza iónica, velocidad de agitación, temperatura, pH de la solución, tiempo de contacto, y concentración inicial del metal. Los experimentos indicaron que la capacidad de adsorción era dependiente de las variables de operación y el proceso era fuertemente dependiente del pH.

Las mediciones cinéticas mostraron que el proceso fue rápido y uniforme. Entre las ecuaciones cinéticas estudiadas, la ecuación de pseudo segundo orden fue la que mejor describió el proceso. La máxima adsorción registrada fue de 33.11mg/g a 20°C (Ghodbane & Hamdaoui, 2008).

3) Remoción de mercurio en soluciones acuosas utilizando Guayaba Manzana (*Psidium guajava*)

Se investigó la biosorción de Hg (II) mediante el uso de polvo de corteza de guayaba. Para la investigación se utilizó un sistema por lotes, y se analizaron los efectos de diversos parámetros como tiempo de contacto, concentración inicial, pH y temperatura. Se encontró que la eliminación de Hg (II) es dependiente del pH, encontrándose la máxima adsorción a pH 9.0. En el estudio cinético la ecuación de pseudo-segundo orden fue la que más ajustó los datos experimentales. La adsorción máxima fue de 3.364 mg/g alcanzándose a los 80 min, mostrándose que el polvo de corteza de guayaba puede ser utilizado eficientemente como una alternativa de bajo costo para la eliminación de mercurio divalente a partir de soluciones acuosas (Lohani, Singh, Rupainwar, & Dharc, 2008).

4) Adsorción de mercurio con madera de Papaya

Basha et al., (2009), evaluaron la adsorción de Hg (II) en solución acuosa en condiciones variables de tiempo de contacto, concentración de ion metálico, dosis adsorbente y pH. Los resultados indican que el equilibrio de adsorción se estableció en aproximadamente 120 min. La adsorción de Hg (II) fue estrictamente dependiente del pH, y la eliminación máxima de 70.8 mg/g se observó a pH 6,5. Los datos de cinética encajaron bien en la ecuación cinética de pseudo-segundo orden.

Este trabajo ilustra una solución alternativa para la utilización del árbol de papaya, el cual es desechado cuando finaliza su vida útil. Por lo tanto, su uso para la eliminación de metales pesados de las aguas contaminadas puede ser una alternativa novedosa y rentable.

5) Remoción de Mercurio en efluentes industriales utilizando espigas de arroz

Rocha, Morozin, Da Silva y Da Silva (2009), llevaron a cabo experimentos de adsorción utilizando espiga de arroz como un biosorbente de iones de Hg (II) en soluciones acuosas a temperatura ambiente. Para lograr las mejores

condiciones de adsorción se investigó la influencia del pH y el tiempo de contacto. Este proceso de adsorción fue rápido alcanzando el equilibrio antes de 90 minutos, con un máximo a pH 5,0.

La máxima capacidad de adsorción de iones metálicos de Hg (II) fue de 0,110 mmol/g. Además, se mostró un excelente resultado con el uso de la espiga de arroz como bioadsorbente de iones metálicos de mercurio en efluentes industriales.

6) Remoción de mercurio en soluciones acuosas utilizando desechos de *Ceiba pentandra*, *Phaseolus aureus* y *Cicer arietinum*

La *Ceiba Pentandra* (Ceiba), el *Phaseolus Aureus* (Judía) y *Cicer Arietinum* (Garbanzo), son árboles y plantas que crecen en la india, principalmente en zonas de temperaturas altas. La cascara de la semilla de la Ceiba, de la Judía y los desechos de la cosecha del Garbanzo, son residuos agrícolas que pueden ser utilizados como bioadsorbentes en soluciones acuosas (Madhava, Kumar, Venkateswarlu, & Seshiah, 2009).

Este estudio se realizó en un proceso por lotes, además se analizó la influencia de parámetros como el pH, el tiempo de contacto, la concentración inicial de iones de mercurio y la dosis de adsorbente. Los experimentos demostraron que el proceso de adsorción corresponde a los modelos cinéticos de pseudo-segundo orden. Con una concentración inicial de Hg(II) de 40 mg/l se obtuvo una remoción máxima de 25.88 mg/g para la cascara de semilla de Ceiba, 23.66mg/g para la cascara de Judía y 22.88 mg/g para los residuos de Garbanzo.

B. Remoción de Mercurio con biomasa modificada químicamente

1) Remoción de mercurio en soluciones acuosas utilizando cascara de arroz modificada

El-Shafey (2010) preparó un material carbonaceo a base de cascarrilla de arroz modificada químicamente con ácido sulfúrico. La adsorción de Hg en solución acuosa se estudió variando el pH, la concentración del ion metálico, la temperatura y el estado del adsorbente (húmedo o seco). El estado de equilibrio de la adsorción se presentó a las 120 h, dando un mejor resultado el adsorbente húmedo. La ecuación de cinética que mejor ajustó los datos fue la de pseudo segundo orden. La capacidad de adsorción aumentaba con el pH, encontrándose una adsorción máxima de 384.6 mg/g.

2) Remoción de Mercurio con carbón activado de cáscara de nuez

En este trabajo se determinó la capacidad de adsorción de un carbón activado en polvo (PAC) derivado de la cáscara de nuez para la remoción de mercurio (Hg II) presente en aguas industriales, en un intento de producir adsorbentes más económico y eficaces. La adsorción de Hg (II) a partir de soluciones acuosas se llevó a cabo en diferentes condiciones experimentales, variando el tiempo de tratamiento, la concentración de iones metálicos, el pH y la temperatura de la solución. Se demostró que la adsorción disminuye al aumentar el pH de la solución. También se utilizaron dos tipos de adsorbentes derivados del mismo material: Carbon A y Carbón B, con los cuales se obtuvo una remoción de 151.5 y 100.9 mg/g de mercurio respectivamente (Zabihi, Haghghi-Asl, & Ahmadpour, 2010).

La ecuación cinética de segundo orden utilizada fue la propuesta por Ho y McKay (1999), pues con este modelo se obtuvo un coeficiente de correlación cercano a 1.

3) Remoción de Mercurio utilizando cascara de pistacho y residuos de regaliz modificados

Tras el trabajo previo (Kaghazchi, Asasian, & Soleimani, 2010), que trata de aplicar una combinación de dos tipos de residuos agrícolas para producir un nuevo adsorbente, en este estudio se dedicó a investigar los detalles del proceso de adsorción de mercurio del medio acuático por el adsorbente Mix-ZC (muestra preparada por la activación química de una mezcla de cáscaras de nueces de pistacho y residuos de regaliz impregnado con cloruro de zinc), con el que se hicieron una serie de experimentos de por lotes. Este adsorbente produjo una remoción máxima de 147.1 mg/g a un pH de 8 y a temperatura ambiente. (Neda, Tahereh, & Mansooreh, 2012).

Debido a la obtención de un mejor coeficiente de correlación, se utilizó la ecuación cinética de segundo orden propuesta por Ho y McKay (1999).

C. Remoción de cadmio con biomasa residual

1) Remoción de cadmio en aguas contaminadas con residuos de naranja

El uso de los desechos de naranja, generados en la industria alimenticia, ha sido investigado para la eliminación de cadmio de las soluciones acuosas. En

diferentes ensayos experimentales por lotes, se encontró que la capacidad de adsorción, es dependiente del pH. El proceso de adsorción fue rápido y el equilibrio se alcanzó a las 3 h.

La máxima capacidad de adsorción de los residuos de naranja fue de 0.40, 0.41 y 0.43 mmol/g con un pH de 4.5 y 6, respectivamente. (Perez-Marin et al., 2007).

2) Eliminación de iones de cadmio de soluciones acuosa utilizando el salvado de trigo

Nouri, Ghodbane, Hamdaoui y Chiha (2007), investigaron sobre un proceso de sorción por lotes usando salvado de trigo como un sorbente de bajo costo para eliminar los iones cadmio de una solución acuosa. La influencia de las condiciones operativas, tales como el tiempo de contacto, la concentración inicial de cadmio, la masa de sorbente, temperatura, pH de la solución inicial, velocidad de agitación y fuerza iónica sobre la cinética de sorción de cadmio fueron estudiadas.

La máxima adsorción obtenida fue de 15.71 mg/g a una temperatura de 20°C, con un pH de 5, una concentración inicial de cadmio de 100 mg/L y una velocidad de agitación constante de 400 rpm. La ecuación cinética que mejor se ajustó fue la ecuación de Ho, en comparación con otras expresiones lineales porque tenía el mayor coeficiente de determinación y porque los parámetros del modelo estaban más cerca de los obtenidos utilizando el método no lineal.

3) Remoción de cadmio con corteza de eucalipto

Ghodbane, Nouri, Hamdaoui y Chiha (2008), estudiaron la eficiencia de la corteza de eucalipto como un sorbente de bajo costo para la eliminación de iones cadmio en soluciones acuosas. La máxima adsorción de cadmio que se obtuvo fue 14,53 mg/g a una temperatura de 20°C y un pH de 5. La ecuación cinética que mejor se ajustó fue la ecuación de pseudo segundo orden, en comparación con otras expresiones lineales esta tenía el mayor coeficiente de determinación y los parámetros del modelo estaban más cerca de los obtenidos utilizando el método no lineal.

4) Adsorción de cadmio con cascara de arroz

La cascara de arroz fue utilizada como bioadsorbente en la remoción de cadmio en soluciones acuosas (Srivastava, Mall, & Mishra, 2009). Se encontró que la ceniza de cáscara de arroz es un adsorbente efectivo para la

eliminación de Cd (II) en soluciones acuosas. Se obtuvo un mayor porcentaje de eliminación de iones metálicos cuando la concentración inicial de adsorbato en la solución era baja. Se encontró una remoción máxima de 0.027 mmol/g del ion metálico.

5) Adsorción de cadmio de aguas residuales por cascara de frijol

La cáscara de frijol mungo, un material de desechos agrícolas, se investigó como un sorbente nuevo para la eliminación de Cd²⁺ en soluciones acuosas. La eliminación máxima se encontró de 35.41mg/g con un pH de 5.0, a una concentración de Cd²⁺ inicial de 500 mg/l y 5 g/l de dosis de adsorbente (Saeed, 2009). La ecuación de la cinética de adsorción que mejor ajustó los datos experimentales fue la ecuación de pseudo-segundo orden, con un valor del coeficiente de correlación cercano a 1.

6) Remoción de cadmio en efluentes industriales, utilizando espigas de arroz

Rocha et al., (2009) llevaron a cabo experimentos de adsorción utilizando paja de arroz como un biosorbente de iones Cd (II) en soluciones acuosas a temperatura ambiente. Para lograr las mejores condiciones de adsorción se investigó la influencia del pH y tiempo de contacto. El proceso de adsorción fue rápido alcanzado el equilibrio antes de 1.5 h.

La capacidad de adsorción varía con el pH, siendo mayor a pH 5.0, la máxima adsorción de iones metálicos fue de 0,133 mmol/g. En este trabajo se mostró el uso de la espiga de arroz como bioadsorbente de iones metálicos de cadmio en efluentes industriales.

7) Adsorción de cadmio en soluciones acuosas con granos de café

Los materiales de desecho de la agroindustria sin tratamiento adicional, como los granos de café, pueden ser utilizados como adsorbentes para la eliminación de cadmio. Experimentos cinéticos y de equilibrio por lotes se llevaron a cabo para estudiar los efectos del tiempo de contacto, la dosis de adsorbente, el pH inicial, tamaño de las partículas, concentración inicial de cadmio y la temperatura. Obteniéndose una adsorción óptima de 15.65 mg/g, después de 120 min de contacto. En este trabajo, la ecuación cinética de segundo orden propuesta por Ho y McKay (1999), fue la que mejor ajustó los datos, pues se obtuvieron coeficientes de correlación

cercanos a uno.

Los resultados sugieren que los granos de café tienen alta posibilidad de ser utilizados como adsorbentes eficaces y económicas para la eliminación de Cd^{2+} (Azouaou, Sadaoui, Djaafri, & Mokaddema, 2010).

8) Remoción de cadmio en soluciones acuosas utilizando cascara de plátano

Anwar et al., (2010), investigaron la adsorción de cadmio (II) sobre las cáscaras de plátano mediante un sistema por lotes. Los parámetros considerados fueron la dosis de adsorbente, el pH de la solución, el tiempo de contacto y la velocidad de agitación. La adsorción máxima de cadmio (II), según fue de 5,71 mg/g. El estudio concluyó que las cáscaras de plátano, que son un material de desecho, tienen un buen potencial como adsorbente para eliminar metales tóxicos como el cadmio en el agua.

9) Adsorción de cadmio con hojas de níspero (*Eriobotrya japonica*)

La capacidad de eliminación de cadmio de las hojas de níspero, depende de factores como el pH, la concentración inicial del metal, dosis, tiempo de contacto y la temperatura. Los resultados cinéticos mostraron que la mejor correlación de los datos experimentales de biosorción de cadmio (II) se da con la pseudo ecuación de segundo orden. La máxima capacidad de adsorción de las hojas de níspero fue de 48,78 mg/g del ion metálico. Se concluyó que las hojas de níspero son un adsorbente de bajo costo y de fácil consecución, con una considerable capacidad de remoción de Cd (II) para el tratamiento de aguas residuales (Awwad & Salem, 2011).

D. Remoción de cadmio con biomasa modificada químicamente

1) Remoción de cadmio con biomasa en soluciones acuosas utilizando cascara de arroz

Ye, Zhu y Du (2010) estudiaron la utilización de cascara de arroz natural y modificada con álcalis en la remoción de cadmio en soluciones acuosas. Los resultados mostraron que la cascara de arroz sin modificar tuvo una remoción máxima de 73,96 mg/g y la modificada con álcalis de 125,94 mg/g. La cascara de arroz modificada tiene una cinética más rápida y mayores capacidades de adsorción que la cascara de arroz natural, esto puede atribuirse a los cambios estructurales de la superficie del material. La adsorción de Cd (II) tiende a aumentar con el

aumento del pH. El pH óptimo para la adsorción de cadmio fue de 6.5. La ecuación de pseudo-segundo orden fue la que describió más adecuadamente la cinética de adsorción.

2) Remoción de cadmio con bagazo de caña de azúcar modificado

Karnitz y Alves (2009), describen la preparación de nuevos materiales quelantes derivados de la celulosa y bagazo de caña para la adsorción de iones Cd^{2+} en soluciones acuosas.

Para el bagazo de caña de azúcar, se prepararon principalmente dos materiales adsorbentes, uno fue el bagazo de caña de azúcar mercerizado con NaOH 5 mol/L, y el otro material se obtuvo de hacer reaccionar el bagazo de caña (no mercerizado y mercerizado) con dianhídrido etilendiaminotetraacético (EDTAD).

Estos bioadsorbentes mostraron máximas capacidades de adsorción de iones de Cd^{2+} que van desde 38.8 a 92.6mg/g. Los materiales modificados con la mercerización mostraron las máximas capacidades de adsorción que los materiales modificados no mercerizados.

Los estudios de adsorción se realizaron a pH 3.0 y 5.3; estando en este rango las mayores adsorciones de los metales descritos y siendo con un pH de 5.3 donde se presentó la mayor adsorción.

3) Adsorción de cadmio con tallos de maíz

Zhenga, Danga, Yía y Zhanga (2010), describen la utilización de tallos de maíz modificados con acrilonitrilo para la remoción de cadmio en soluciones acuosas. Los resultados mostraron que los tallos de maíz modificados son un adsorbente efectivo debido a su tamaño de poro. El pH de 7,0 fue el óptimo para la eliminación de iones de Cd (II), mostrando una adsorción máxima de 12.73 mg/g, en comparación con el tallo de maíz sin modificar (3.39mg/g). El análisis indicó que la ecuación cinética de pseudo-segundo orden controla la tasa de adsorción.

4) Adsorción de cadmio utilizando cascara de naranja modificada químicamente

Lasheen, Ammar e Ibrahim (2012), estudiaron la utilización de cascara de naranja modificada químicamente con ácido nítrico como bioadsorbente en la remoción de Cd (II). Se encontró que la cinética de la adsorción sigue el modelo de Pseudo-segundo orden, ya que el coeficiente de correlación fue de 1.

La máxima remoción de cadmio fue de 13.7 mg/g. El estudio concluyó que la modificación química de la cascara de naranja mejora su capacidad de adsorción, demostrando su viabilidad como adsorbente de bajo costo en la eliminación de metales pesados de efluentes industriales.

V. TENDENCIA ACTUAL DE LA REMOCIÓN DE CADMIO Y MERCURIO

La revisión encontró que las biomazas lignocelulósicas modificadas presentan mayor cantidad de remoción de los iones metálicos estudiados, para el mercurio la cáscara de arroz modificada con ácido sulfúrico fue el mejor adsorbente con 384.6 mg/g. Para el cadmio se siguió la misma tendencia, pues fueron las cáscaras de arroz modificadas con álcalis con una remoción de 125.94mg/g frente a 73.96 mg/g de la biomasa sin modificar, las que presentaron mejores resultados.

Mientras que si se comparan las biomazas sin modificación alguna, es la madera de papaya con una cantidad de 70.8 mg por gramo de adsorbente, la que mayor remoción presenta para el mercurio, y las hojas de níspero con 48.78 mg/g para el cadmio. Además, es la ecuación cinética de pseudo-segundo orden de Ho y McKay, la que describe la mayor parte de la cinética de los procesos de adsorción de las distintas biomazas, por ser esta la que mejor ajusta los datos experimentales obtenidos en cada investigación.

De igual forma, se investigó en la base de datos, *ScienceDirect*, la cantidad de artículos que relacionaban la remoción de los metales trabajados con diferentes biomazas, como se observa en la Figura 1 y 2, para el cadmio y el mercurio, respectivamente.

Figura 1. Artículos publicados sobre la adsorción de Cadmio con diferentes biomazas (Cantidad de artículos / año de publicación)

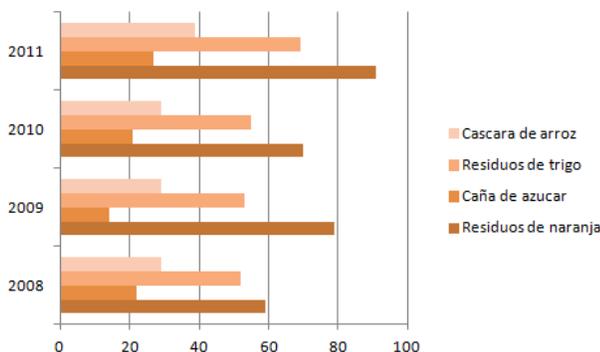
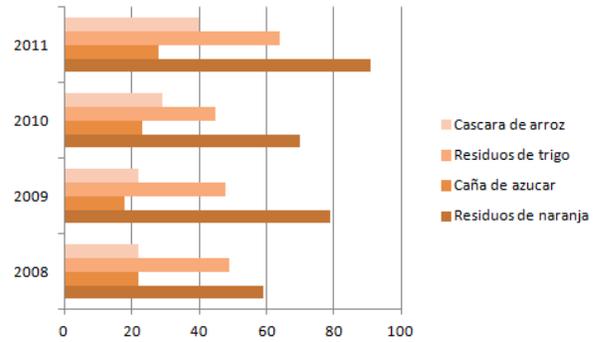
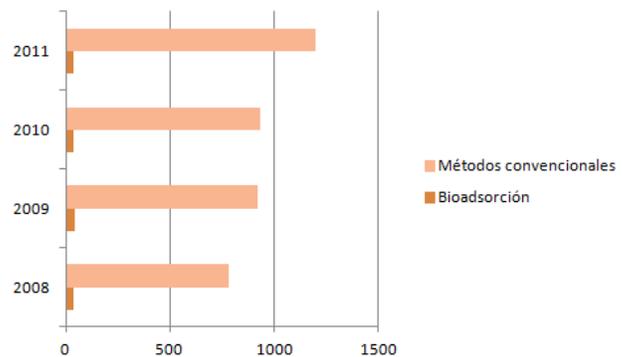


Figura 2. Artículos publicados sobre la adsorción de mercurio con diferentes biomazas (Cantidad de artículos / año de publicación)



Además se buscó la cantidad de artículos relacionando el tipo de método usado para su adsorción. Los resultados arrojados por este tipo de búsqueda fueron clasificados teniendo en cuenta que fueran de los años comprendidos entre el 2008 y el 2011, con el fin de identificar la tendencia investigativa de la remoción de metales pesados, como se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Comparación métodos convencionales y bioadsorción para remoción de metales pesados (cantidad de artículos / año de publicación)



Se puede concluir, que las investigaciones sobre la utilización de biomazas residuales vegetales para remover metales pesados han sido mucho más amplios que los estudios sobre la utilización de los métodos convencionales (Intercambio iónico, precipitación química y Osmosis inversa). Esto demuestra que la tendencia actual es la utilización de bioadsorbentes naturales como método para remover los iones metálicos. Asimismo, para el cadmio y el mercurio, son los residuos de naranja y de trigo los más usados para su remoción, con una tendencia al crecimiento de artículos que investigan el uso de estos.

No obstante cabe destacar, que aunque se han encontrado gran número de biosorbentes de bajo costo, el carbón activo y las resinas de intercambio iónico continúan

siendo los principales sorbentes de metales en la actualidad, esto es debido a sus buenas propiedades extractoras y su alta capacidad de regeneración. El precio de mercado del carbón activo en Estados Unidos es de 20-22 \$/kg, dependiendo de su calidad y el de las resinas de intercambio de 13-30 \$/kg, por el contrario los biosorbentes son materiales, entre 0,03-15 \$/kg según el material, lo que facilita su uso industrial (Babel & Kurniawan, 2003).

VI. CONCLUSIONES

En los últimos seis años se ha investigado el uso de una amplia variedad de biomásas lignocelulósicas residuales para la remoción de iones metálicos en aguas contaminadas, entre las que se incluye cortezas de árboles, residuos de madera, hojas de diferentes árboles, cascara de frutos secos, residuos de cereales, flores, cítricos, entre otros. Para el mercurio (II) la cascara de arroz con una capacidad de remoción de 384,6 mg/g y para el cadmio la cascara de arroz con una capacidad de remoción de 125,94 mg/g, han sido las biomásas de mejores resultados, ambas modificadas químicamente, lo que aumenta en gran medida su capacidad de remoción. De igual forma, se encontró que la cinética del proceso de adsorción, en la gran mayoría de las biomásas estudiadas, es regida por la ecuación cinética de pseudo-segundo orden de Ho y McKay, ya que con ella se ajustan de mejor forma los datos experimentales.

VII. REFERENCIAS

- Ahalya, N., Ramachandra, T., & Kanamadi, R. (2003). Biosorption of Heavy Metals. *Res.J.Chem.Environ* 7(4), 71-79
- Ahluwalia, S.S., & Goyal, D. (2007). Microbial and plant derived biomass for removal of heavy metals from wastewater. *Bioresource Technology* 98, 2243-2257. Citado por: Agouborde, L. (2008). Remoción de metales pesados por medio de adsorbentes no convencionales.
- Anwar, J., Shafique, U., Zaman, W., Salman, M., Dar, A., & Anwar, S. (2010). Removal of Pb(II) and Cd(II) from water by adsorption on peels of banana. *Bioresource Technology* 101, 1752-1755.
- Awwad, A., & Salem, N. (2011). Kinetics and thermodynamics of Cd(II) biosorption onto loquat (*Eriobotrya japonica*) leaves. *Journal of Saudi Chemical Society*. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319610311001906#>
- Azouaou, N., Sadaoui, Z., Djaafri, A., & Mokaddema, H. (2010). Adsorption of cadmium from aqueous solution onto untreated coffee grounds: Equilibrium, kinetics and thermodynamics. *Journal of Hazardous Materials* 184, 126-134
- Babel, S., & Kurniawan, T.A.(2003). Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review. *Journal of Hazardous Materials* 97, 219-243
- Basha, S., Murthy, Z.P.V., & Jha, B. (2009). Sorption of Hg (II) onto Carica papaya: Experimental studies and design of batch sorber. *Chemical Engineering Journal* 147, 226-234
- Cavaco, S.A., Fernandes, S., Quina, M.M., & Ferreira, L.M. (2007). Removal of chromium from electroplating industry effluents by ion exchange resins. *Journal of Hazardous Materials* 144, 634-638. Citado por: Agouborde, L. (2008). Remoción de metales pesados por medio de adsorbentes no convencionales.
- Cheung, C.W. (2000). Elovich equation and modified second-order equation for sorption of cadmium ions onto bone char. *Journal of Chemical Technology, & Biotechnology* 75 (11), 963-970.
- Cuervo, L., Folch, J., & Quiroz, R. (2009). Lignocelulosa como fuente de azúcares para la producción de etanol. UNAM. *Bioteología* 13 (3), 12
- Cuizano, N.A., & Navarro, A.E. (2008). Biosorción de metales pesados por alga marinas: posible solución a la contaminación a bajas concentraciones. *Química y medio ambiente* 104(2), 120-125
- Driss, S.B. (2010). *Aprovechamiento de hueso de aceituna. Biosorción de iones metálicos* [Tesis doctoral]. Universidad de Granada. España. Editorial de la Universidad de Granada. ISBN 978-84-693-6025-5
- El-Shafey, E. (2010). Removal of Zn(II) and Hg(II) from aqueous solution on a carbonaceous sorbent chemically prepared from rice husk. *Journal of Hazardous Materials* 175, 319-327.
- Farajzadeh, M.A., & Monji, A.B. (2004). Adsorption characteristics of wheat bran towards heavy metal cations. *Separation and Purification Technology* 38, 197-207.
- Ghodbane, I., & Hamdaoui, O. (2008). Removal of mercury(II) from aqueous media using eucalyptus bark: Kinetic and equilibrium studies. *Journal of Hazardous Materials* 160, 301-309
- Ghodbane, I., Nouri, L., Hamdaoui, O., & Chiha, M. (2008). Kinetic and equilibrium study for the sorption of cadmium (II) ions from aqueous phase by eucalyptus bark. *Journal of Hazardous Materials* 152, 148-158.
- Gupta, S., & Babu, B. (2009). Removal of toxic metal Cr (VI) from aqueous solutions using sawdust as adsorbent: Equilibrium, kinetics and regeneration studies. *Chemical Engineering Journal* 150, 352-365.
- Ho, Y., & Wang, C. (2008). Sorption equilibrium of mercury onto ground-up tree fern. *Journal of Hazardous Materials* 156, 398-404.
- Ho, Y.S., & McKay, G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, 34 (5), 451-465.
- Inglezakis, V.J., Loizidou, M.D., & Grigoropoulou H.P (2003). Ion exchange of Pb²⁺, Cu²⁺, Fe³⁺, and Cr³⁺ on natural clinoptilolite: selectivity determination and influence of acidity on metal uptake. *Journal of Colloid and Interface Science* 261, 49-54. Citado por: Agouborde, L. (2008). Remoción de metales pesados por medio de adsorbentes no convencionales.
- Jarup, L. (2003). Hazards of heavy metal contamination. *British Medical Bulletin* 68, 167-182. Citado por: Agouborde, L. (2008). Remoción de metales pesados por medio de adsorbentes no convencionales.
- Kaghazchi, T., Asasian, N., & Soleimani, M. (2010) Licorice residue and Pistachio-nut shell mixture: A promising precursor for activated carbon. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 16, 368-374.
- Karnitz, O., & Alves, L. (2009). Adsorption of Cu(II), Cd(II), and Pb(II) from aqueous single metal solutions by mercerized cellulose and mercerized sugarcane bagasse chemically modified with EDTA dianhydride (EDTAD). *Carbohydrate Polymers* 77, 643-650
- Lasheen, M., Ammar, N., & Ibrahim, H. (2012). Adsorption/desorption of Cd(II), Cu(II) and Pb(II) using chemically modified orange peel: Equilibrium and kinetic studies. *Solid State Sciences* 14, 202-210.
- Lee S.H., Jung, C.H., Chung, H., Lee, M.Y., & Yang, W. (1998). Removal of heavy metals from aqueous solution by apple residues. *Proc. Biochem.* 33, 205-211.
- Lohani, M., Singh, A., Rupainwar, D., & Dharc, D (2008). Studies on efficiency of guava (*Psidium guajava*) bark as bioadsorbent for removal of Hg (II) from aqueous solutions. *Journal of Hazardous Materials* 159, 626-629.
- Madhava, M., Kumar, D., Venkateswarlu, P., & Seshaiha, K. (2009). Removal of mercury from aqueous solutions using activated carbon prepared from agricultural by-product/waste. *Journal of Environmental Management*, 634-643.
- Maita, A.J. (2008). *Evaluación de la adsorción de Cd (II) y Cu (II), mediante la utilización de la biomasa obtenida de la sábila (aloe vera)* [Trabajo de grado]. Universidad de Oriente, Cumaná, Venezuela.
- Manzoor, S., Shah, M.H., Shaheen, N., Khaliq, A., & Jaffar, M. (2006). Multivariate analysis of trace metals in textile effluents in relation to soil and groundwater. *Journal of Hazardous Materials* 137, 31-37. Citado por:

- Agouborde, L. (2008). Remoción de metales pesados por medio de adsorbentes no convencionales.
- Martin, M.A. (2008). *Caracterización y aplicación de biomasa residual a la eliminación de metales pesados* [Tesis doctoral]. Editorial de la Universidad de Granada, Granada, España. ISBN 978-84-691-4095-6
- Mohan, D., & Pittman, C.U. (2006). Activated carbons and low cost adsorbents for remediation of tri- and hexavalent chromium from water. *Journal of Hazardous Materials* 137, 762-811. Citado por: Agouborde, L. (2008). Remoción de metales pesados por medio de adsorbentes no convencionales.
- Neda, A., Tahereh, K., & Mansoor, S. (2012). Elimination of mercury by adsorption onto activated carbon prepared from the biomass material. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 18, 283-289.
- Nouri, L., Ghodbane, I., Hamdaoui, O., & Chiha, M. (2007). Batch sorption dynamics and equilibrium for the removal of cadmium ions from aqueous phase using wheat bran. *Journal of Hazardous Materials* 149, 115-125.
- Osman, H.E., Badwy, R.K., & Ahmad, H. (2010). Usage of some agricultural by-products in the removal of some heavy metals from industrial wastewater. *Journal of Phytology* 2 (3), 51-62. ISSN: 2075-6240
- Pérez-Marín, A.B., Meseguer, V., Ortuño, J.F., Aguilar, M., Saez, J., & Llorens, M. (2007). Removal of cadmium from aqueous solutions by adsorption onto orange waste. *Journal of Hazardous Materials* 139, 122-131
- Ricordel, S., Taha, S., Cisse, I., & Dorange, G. (2001). Heavy metals removal by adsorption onto peanut husks carbon: characterization, kinetic study and modeling. *Separation and Purification Technology* 24,389-401.
- Rocha, C., Morozin, D., Da Silva, R., & Da Silva, A.(2009). Use of rice straw as biosorbent for removal of Cu(II), Zn(II), Cd(II) and Hg(II) ions in industrial effluents. *Journal of Hazardous Materials* 166, 383-388.
- Rozas, P.A.(2008). *Estudio de adsorción para Cr (VI) utilizando Chacay (ulex europaeus) como carbón activo cubierto con quitosán* [Tesis de grado]. Universidad de los Lagos, Santiago de Chile, Chile.
- Saeed, A., Iqbal, M., & Holl, W. (2009). Kinetics, equilibrium and mechanism of Cd²⁺ removal from aqueous solution by mungbean husk. *Journal of Hazardous Materials* 168, 1467-1475.
- Santos, M.J., & De Oliveira, E. (2003). Heavy metals removal in industrial effluents by sequential adsorbent treatment. *Advances in Environmental Research* 7, 263-272. Citado por: Agouborde, L. (2008). Remoción de metales pesados por medio de adsorbentes no convencionales.
- Sharma, K.P., Sharma, S., Sharma, S., Singh, P.K., Kumar, S., Grover, R., & Sharma, P.K (2007). A comparative study on characterization of textile wastewaters (untreated and treated) toxicity by chemical and biological tests. *Chemosphere*, 69, 48-54. Citado por: Agouborde, L. (2008). Remoción de metales pesados por medio de adsorbentes no convencionales.
- Sial, R.A., Chaudhary, M.F., Abbas, S.T., Latif M.I., & Khan A.G. (2006). Quality of effluents from Hattar industrial estate. *Journal of Zhejiang University Science* 7, 974-980. Citado por: Agouborde, L. (2008). Remoción de metales pesados por medio de adsorbentes no convencionales.
- Srivastava, V., Mall, I., & Mishra, I. (2009). Competitive adsorption of cadmium(II) and nickel(II) metal ions from aqueous solution onto rice husk ash. *Chemical Engineering and Processing* 48, 370-379.
- Vallejo, K.D. (2008). *Estudio de la adsorción de Cd (II) y Pb (II), usando como adsorbente la ulva lactuca (lechuga de mar) modalidad de investigación*. (Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de licenciada en química). Universidad de Oriente, Núcleo de Sucre, Cumaná, Venezuela.
- Villanueva, C.C. (2007). *Biosorción de cobre (II) por biomasa pretratada de cáscara de citrus sinensis (naranja), citrus limonium (limón) y opuntia ficus (palmeta de nopal)*. [Tesis de grado]. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
- Volesky, B. (1990a). *Biosorption of Cd and Cu by different types of Sargassum biomass*. In: Amils R., & Ballester A eds. Biohydrometallurgy and the Environment towards the mining of 21st century (part B): International Biohydrometallurgy Symposium-Proceedings. Amsterdam, Elsevier. 473-482.
- Volesky, B. (1990b). *Removal and recovery of heavy metals by biosorption*. In: Biosorption of heavy metals. Boston, USA, CRC press, 1990b, 7-43.
- Ye, H., Zhu, Q., & Du, D. (2010). Adsorptive removal of Cd(II) from aqueous solution using natural and modified rice husk. *Bioresource Technology* 101, 5175-5179.

- Zabihi, M., Haghighi, A., & Ahmadpour, A. (2010). Studies on adsorption of mercury from aqueous solution on activated carbons prepared from walnut shell. *Journal of Hazardous Materials* 174, 251-256
- Zhenga, L., Danga, Z., Yia, X., & Zhanga, H. (2010). Equilibrium and kinetic studies of adsorption of Cd (II) from aqueous solution using modified corn stalk. *Journal of Hazardous Materials* 176, 650-656

VIII. CURRÍCULOS

Candelaria Tejada Tovar. Candidata a Magíster en Ingeniería Ambiental, Universidad de Cartagena (Colombia). Magíster en educación, Universidad del Norte (Colombia). Especialista en Química analítica, Universidad de Cartagena. Ingeniera Química, Universidad Industrial de Santander (Colombia). Profesora de tiempo completo del programa de ingeniería química y docente del grupo de investigación GIPIQ de Ingeniería Química (Universidad de Cartagena). Línea de investigación: remoción de metales en efluentes industriales. Actualmente se desempeña como Jefe del Departamento de Procesos Ambientales y Biotecnológicos en el Programa de Ingeniería Química, liderando la línea de investigación de *Bioremediación de aguas residuales* al cual se encuentran vinculados cinco jóvenes investigadores patrocinados por Colciencias; el grupo está desarrollando un macroproyecto que investiga el potencial de biomasa en la costa norte de Colombia para ser utilizadas como bioadsorbentes de metales pesados, entre otros tipos de contaminantes.

Ángel Villabona Ortiz. Candidato a Magíster en Ingeniería Ambiental y Especialista en Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Universidad de Cartagena. Ingeniero Químico de la Universidad industrial de Santander. Profesor de tiempo completo del Programa de Ingeniería Química de la Universidad de Cartagena. Actualmente coordina la especialización en Ingeniería Sanitaria y Ambiental en la Universidad de Cartagena y trabaja en remoción de metales en aguas residuales industriales con el uso de biomasa. Además se encuentra adelantando proyectos para el uso de biomasa para el tratamiento de aguas oleosas y trabaja en la búsqueda de coagulantes naturales para el tratamiento de aguas.

Víctor Ruiñán Rangel. Ingeniero Civil, especialista en Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Universidad de Cartagena. Actualmente se desempeña como ingeniero contratista en el sector de acueducto y alcantarillado y dirige su propia empresa. Es miembro del Grupo de Investigación GIPIQ, como profesional invitado.