

1220 (IF)

NOV 2013

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN



Informe Final del Proyecto de Investigación:

**“ADSORBENTES SÓLIDOS DE ORIGEN NATURAL PARA
METALES PESADOS EN SOLUCIÓN ACUOSA ”**

Mg. Luis Rosas Angeles Villón

(01-11-2011 al 31-10-2013)

(Resolución Rectoral N° 1179-2011-R)

Luis Rosas Angeles Villón



ÍNDICE

	Página
ÍNDICE	1
RESUMEN	3
I. INTRODUCCIÓN	4
II. MARCO TEÓRICO	8
II.1 Proceso fisico-químico de adsorción	8
II.2 Modelos de isothermas de adsorción	9
II.2.1 Isotherma de Langmuir	9
II.2.2 Isotherma de Freundlich	10
II.2.3 Isotherma de Toth	10
II.2.4 Isotherma de Temkin	11
II.2.5 Isotherma de Fritz-Schluender	12
III. MATERIALES Y MÉTODOS	13
IV. RESULTADOS	15
IV.1 Adsorbentes sólidos de origen natural	15
IV.1.1 Animal	15
IV.1.2 Vegetal	15
IV.1.3 Mineral	18
IV.2 Adsorbentes sólidos y sus características fisico-químicas	21
IV.3 Adsorbentes sólidos y sus pre-tratamientos fisico-químicos.	22
IV.3.1 Animal	22
IV.3.2 Vegetal	23
IV.3.3 Mineral	26
IV.4 Procesos de adsorción de metales pesados en solución acuosa	30

IV.4.1 Metales pesados en soluciones acuosas estándares	31
IV.4.2 Metales pesados en aguas naturales y/o industriales	32
IV.4.3 Características que debe tener una prueba de adsorción	33
IV.4.4 Los cationes metálicos y sus isothermas de adsorción	34
IV.4.4.1 Isothermas de adsorción para el As(V)	35
IV.4.4.2 Isothermas de adsorción para el Cd(II)	35
IV.4.4.3 Isothermas de adsorción para el Cr(III)	37
IV.4.4.4 Isothermas de adsorción para el Cu(II)	38
IV.4.4.5 Isothermas de adsorción para el Ni(II)	40
IV.4.4.6 Isothermas de adsorción para el Pb(II)	40
IV.4.4.7 Isothermas de adsorción para el Zn(II)	41
IV.4.5 Procesos de desorción y reutilización del adsorbente	42
IV.4.5.1 Adsorbentes de origen animal:	42
IV.4.5.2 Adsorbentes de origen vegetal	43
IV.4.5.3 Adsorbentes de origen mineral	44
V. DISCUSIÓN	45
VI. REFERENCIALES	47
VII. APÉNDICE	54
VIII. ANEXOS	57

RESUMEN

“ADSORBENTES SÓLIDOS DE ORIGEN NATURAL PARA METALES PESADOS EN SOLUCIÓN ACUOSA”

Mg. Luis Rosas Angeles Villón

En la presente investigación se planteó el resumir y ordenar las investigaciones respecto a los adsorbentes sólidos de origen natural para metales pesados en solución acuosa, a través de la clasificación de los mismos por su origen natural, el presentar los parámetros más utilizados en la caracterización de los adsorbentes, así como en los procesos de adsorción e identificar los adsorbentes de origen natural con capacidad de ser reutilizados. Es así que se ha efectuado esta clasificación por los materiales de origen para la preparación del adsorbente como de origen animal, vegetal y mineral, aunque pueda generar alguna controversia el clasificar como mineral al carbón activado cuya fuente primigenia está en la materia orgánica.

Entre los parámetros más importantes para la caracterización de los adsorbentes se considera de vital importancia el establecer la morfología por microscopía electrónica de barrido y Difractometría de rayos-X, la cual aplicada antes y después del proceso de adsorción permitirá tener más indicios sobre los probables mecanismos físico-químicos que se llevan adelante en estos procesos. En el mismo sentido, pero enfocado en el proceso de adsorción respecto a la solución acuosa es imprescindible el efectuar un estudio previo de la especiación de los cationes metálicos en función del pH.

El modelo de la isoterma de Fritz-Schulender a través de sus 5 constantes parece ser lo más indicado para estos estudios. La reutilización del quitosano y la cáscara de toronja por sus 5 ciclos de adsorción/desorción parecen indicar un buen potencial para su aplicación en la descontaminación de los recursos hídricos.



I. INTRODUCCIÓN

En las investigaciones de Boudrahem, *et al.* (2011) sobre la eficiencia de las hojas de la palma datilera como adsorbente de bajo costo para eliminar los iones plomo en soluciones acuosa. Se observó que el enfoque de los autores se centró en establecer los efectos de los principales parámetros en estos procesos de adsorción en la interfase sólido/líquido como son el tiempo de contacto, concentración inicial de Pb (II), dosis del adsorbente, pH de la solución, velocidad de agitación, fuerza iónica y temperatura del proceso.

El uso de carbón activado obtenido mediante pirólisis de los residuos de la cosecha del café y activado con ácido fosfórico y cloruro de cinc presentó características de variada intensidad en el proceso de adsorción del Pb(II) a consecuencia de diferentes dosificaciones de la masa de $ZnCl_2$ o H_3PO_4 en la impregnación que redundó en una variada porosidad del adsorbente obtenido de acuerdo a las investigaciones de Boudrahem, Soualah *et al.* (2011).

En los estudios de Guijarro-Aldaco *et al.* (2011) se activó carbón comercial mediante un tratamiento con residuos de cáscara del huevo de gallina con lo cual se modificó químicamente la superficie de los carbones redundando en una mejor capacidad de adsorción de los iones de metales pesados. Este proceso se efectuó mediante una solución de calcio extraída de los residuos de la cáscara del huevo, resultando como un agente de activación de bajo costo para mejorar las propiedades de adsorción de tres carbones comerciales. Utilizaron adsorción por lotes de Zn(II), a 30 °C y a pH 5. Sus resultados mostraron que la capacidad de adsorción máxima de iones Cd(II), Ni(II) y Zn(II), a 30 °C y un pH de 5, puede aumentar hasta 15 veces, con respecto a los resultados obtenidos con el carbón comercial sin activación.



Diferentes adsorbentes sólido de origen natural se han utilizado para la adsorción de metales pesados presentes en solución acuosa como son la borra del té y café en las investigaciones de Dajti *et al.* (2006), el fruto del abeto (piña cono) molido reportado por Izanloo *et al.* (2005), la alga marina marrón, *Lobophora variegata* en las investigaciones de Bassha *et al.* (2008), la alga *Lessonia trabeculata* reportado por Navarro *et al.* (2006), el quitosano, café, té verde, té, yuzu (naranja japonesa), sábila (aloe), té grueso japonés, carbón activado y zeolita en los estudios de Minamisawa *et al.* (2004), entre otros tanto materiales de esta índole natural han sido investigados a nivel mundial.

Las investigaciones con algas *Sargassum sp.* efectuadas por Chen *et al.* (2006) quienes modificaron su capacidad de adsorción mediante un tratamiento con formaldehído para la adsorción de metales pesados. Demostraron que la modificación química con formaldehído mejoraba la capacidad de biosorción en aproximadamente un 20%. Comprobando que el pH de la solución juega un rol importante en la biosorción del metal. Resultando en un proceso de intercambio iónico entre los metales pesados y los metales alcalino-térreos de acuerdo a los sitios afines libres en las algas. Comprobaron durante sus investigaciones que la adsorción se lograba gracias a la afinidad de los metales pesados por los grupos funcionales carbonilo resultando el orden descendente de afinidad como sigue: plomo, cobre y metales alcalino-térreos.

Como podemos apreciar en estas investigaciones recientemente publicadas en revistas indexadas, Se utilizan adsorbentes sólidos de origen natural tanto animal, vegetal o mineral con y sin tratamiento químico utilizando otras fuentes naturales, inclusive de origen animal, como la cascará de huevo de gallina.

Los antecedentes mencionados en líneas anteriores muestran que los adsorbentes sólidos de origen natural tienen una potencial aplicación en la descontaminación del agua con presencia de metales pesados en solución en el marco de la línea de investigación sobre Química Ambiental de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática de la Universidad Nacional del Callao.

Planteándose el problema con la interrogante siguiente: ¿Existe un estudio que recopile y ordene la información concerniente a los adsorbentes sólidos de origen natural para metales pesados en solución acuosa?

La elaboración de la respuesta a esta pregunta genera como objetivo general el “resumir y ordenar las investigaciones efectuadas a nivel mundial por la comunidad científica respecto a los adsorbentes sólidos de origen natural utilizados para metales pesados en solución acuosa”.

Dando lugar a los objetivos específicos siguientes:

- Clasificar los adsorbentes sólidos de origen natural.
- Presentar los parámetros más utilizadas en la caracterización de los adsorbentes sólidos de origen natural.
- Presentar los parámetros más utilizadas en los procesos de adsorción de metales pesados en solución acuosa.
- Identificar los adsorbentes de origen natural que han sido reportados con capacidad de ser reutilizados.

La importancia de esta investigación reside en que existe a nivel mundial un renovado interés por el uso de adsorbentes sólidos de origen natural, principalmente los

provenientes de animales y vegetales. Una de las razones es su abundancia natural y el hecho de prolongar su ciclo de vida útil dentro de un marco ecológico y de desarrollo sostenible. Una de las principales aplicaciones es el de la adsorción de metales pesados presentes en los recursos hídricos naturales, dando lugar a la posible remediación de las aguas contaminadas.

Estas razones justifican el desarrollo de esta investigación conjuntamente con el potencial impacto que producirá al generar nuevos temas de investigación en la línea de investigación denominada Química Ambiental, sirviendo también como antecedente de futuras investigaciones, no solo de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, sino también en las Facultades de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales e Ingeniería Química de nuestra Universidad Nacional del Callao

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'L. M. F.', written in a cursive style.

II. MARCO TEÓRICO

II.1 Proceso fisico-químico de adsorción

Los procesos fisico-químicos de adsorción, materia de esta investigación, comprenden un proceso heterogéneo de contacto entre un sólido de origen natural y el ion de un metal pesado en fase acuosa. Adquiriendo especial importancia en el mecanismo de adsorción la interfase sólido-líquido como se entiende en lo sostenido por Cassidy (1965).

En vías del ordenamiento, clasificación y caracterización de los adsorbentes de origen natural, así como el de la identificación e influencia de los parámetros que gobiernan estos procesos de adsorción se ha recopilado la terminología utilizada en el IUPAC Compendium of Chemical Terminology - Gold Book (2012), habiéndose tomado las definiciones más importantes, las cuales se encuentran condensadas en la Tabla A.1 de los Anexos.

Pretender una única teoría que explique estos procesos de adsorción es muy difícil, debido a que el adsorbato y el adsorbente tienen propiedades fisico-químicas extremadamente diferentes. Si se enfoca por el tipo de solución líquida, estas pueden ser mezclas de tipo: electrolíticas y no electrolíticas. Dentro de las no electrolíticas, pueden ser miscibles constituidas por moléculas de tamaños comparables entre sí o parcialmente miscibles. Adicionalmente, la interfase sólido-líquido aporta mayor complejidad al proceso de adsorción debido a la diversidad de interacciones entre los componentes de la mezcla líquida y la forma estructuralmente compleja del adsorbente, dado que se presentan diferentes tipos de poros, lo cual resulta en una



fuerte heterogeneidad de su superficie de acuerdo a lo sostenido por Dabrowski *et al.* (1996).

Cuando la fase líquida es una solución, es más apropiado referirse a la interfase sólido-solución, en la cual se produce una competencia entre la superficie del sólido y el solvente (agua) por el adsorbato (iones acuosos de metales pesados). El efecto del adsorbente en el proceso de adsorción reside en su composición química y estructura física, pudiendo esta ser muy variada y heterogénea. En consecuencia, no se puede hablar de adsorbentes totalmente polares o apolares. Con mayor razón, si estos contienen en su interior otras sustancias que pueden contribuir a favorecer el proceso de adsorción, alcanzando estas sustancias la denominación de adsorptivas como lo explica Cassidy (1965).

II.2 Modelos de isotermas de adsorción

Los modelos de isotermas de adsorción más utilizados en las investigaciones revisadas son los siguientes:

II.2.1 Isoterma de Langmuir: Minamimisawa *et al.* (2004) manifiestan que este modelo postula un mecanismo de adsorción sobre un sólido adsorbente de superficie homogénea y una relación de sitio de anclaje a catión metálico de 1:1. La ecuación que postula este modelo tiene varias formas de expresión. La ecuación (A) fue utilizada también en las investigaciones de Angeles (2009).

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{b} + \left(\frac{1}{bK} \right) \left(\frac{1}{c} \right) \quad (A)$$

Donde:

q: moles del metal adsorbido por unidad de masa en gramos del sólido adsorbente ($\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)

c: concentración molar residual del metal en la solución (M)

K: constante de adsorción en el equilibrio ($\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}$)

b: capacidad máxima de adsorción ($\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)

II.2.2 Isoterma de Freundlich: Minamimisawa *et al.* (2004) explican que este modelo postula un mecanismo de adsorción más complejo sobre un sólido adsorbente de superficie heterogénea de variada afinidad, incluyendo procesos de fisisorción y quimisorción. Habiendo utilizado la ecuación en su forma exponencial y en las investigaciones de Angeles (2009) se utilizó la forma logarítmica la cual se muestra como ecuación (B).

$$\log q = \log k + \left(\frac{1}{n}\right) \log c \quad (\text{B})$$

Donde:

q: moles del metal adsorbido por unidad de masa en gramos del sólido adsorbente ($\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)

c: concentración molar residual del metal en la solución (M)

n: constante de Freundlich valores entre 1 a 10

k: capacidad máxima de adsorción ($\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)

II.2.3 Isoterma de Toth: Prabhakaran *et al.* (2009) y Subramanyam *et al.* (2012) expresan que este modelo proviene de la teoría potencial y ha resultado útil en procesos de sorción en sistemas heterogéneos de adsorciones en multicapas y es

una modificación de la ecuación de Langmuir que se puede representar por la ecuación (C).

$$q_e = \frac{q_{mT} \cdot C_e}{\left[\left(\frac{1}{K_T} \right) + (C_e^{mT}) \right]^{1/mT}} \quad (C)$$

Donde:

q_e : la masa adsorbida en el equilibrio por masa de biosorbente ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)

C_e : la concentración del adsorbato en el equilibrio ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

q_{mT} : la capacidad máxima de adsorción de Toth ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)

K_T : la constante de equilibrio de Toth

mT : el exponente de Toth

II.2.4 Isoterma de Temkin: Subramanyam *et al.* (2012) expresa que este modelo postula un mecanismo de adsorción que considera el efecto de las interacciones indirectas adsorbato/adsorbato sugiriendo que, debido a estas el calor de adsorción de todas las moléculas en la capa disminuiría linealmente con la cobertura del adsorbato sobre la superficie del adsorbente y se muestra en la ecuación (D).

$$q_e = \frac{RT}{b} (\ln A C_e) \quad (D)$$

Donde:

q_e : la masa adsorbida en el equilibrio por masa de biosorbente ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)

C_e : la concentración del adsorbato en el equilibrio ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

A y b: las constantes de Temkin.

R: constante universal de los gases.

T: temperatura absoluta en Kelvin

II.2.5 Isoterma de Fritz-Schluender: Basha *et al.* (2008) y Subramanyam *et al.* (2012) manifiestan que este modelo es de naturaleza empírica con 5 constantes, este mayor número de constantes debería ser capaz de simular las variaciones de los modelos de adsorción con más precisión. Especialmente en los procesos de biosorción, donde los factores que afectan a la sorción son múltiples. Sin embargo, el modelo de Fritz-Schluender es matemáticamente más complejo, y su solución requiere de la aplicación de técnicas de regresión no lineal. Por lo tanto, esto limita la aplicación rutinaria del modelo por lo que no puede ser ampliamente practicada y se representa mediante la ecuación (E).

$$q_e = \frac{q_{mFSS} \cdot K_1 \cdot C_e^{m_1}}{1 + K_2 \cdot C_e^{m_2}} \quad (E)$$

Donde:

q_e : la masa adsorbida en el equilibrio por masa de biosorbente ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)

C_e : la concentración del adsorbato en el equilibrio ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

q_{mFSS} : la capacidad máxima de adsorción de Fritz-Schluender ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)

K_1, K_2, m_1 y m_2 : los parámetros de Fritz-Schluender



III. MATERIALES Y MÉTODOS

El universo de esta investigación está circunscrita en la línea de investigación denominada Química Ambiental y dentro de ella hacia los adsorbentes de origen natural y restringiendo su alcance hacia aquellos que han demostrado capacidad para adsorber metales pesados en solución acuosa.

En este marco se ha ejecutado la revisión sistemática de artículos científicos publicados en revistas especializadas de reconocido valor mundial priorizando las publicaciones posteriores a junio del 2004 hasta enero del 2013, de esta manera se ha podido identificar, seleccionar, ordenar y sintetizar las metodologías utilizadas en las investigaciones de la última década sobre nuestro tema de investigación.

La información recopilada de revistas científicas internacionales fue obtenida de las Bibliotecas especializadas de la Pontificia Universidad Católica del Perú, siendo el 97% en idioma inglés de un total de 31 artículos seleccionados.

Las revistas científicas utilizadas fueron las siguientes:

- Advances in Colloid and Interface Science
- Bioresource Technology.
- Catalysis Today.
- Chemical Engineering Journal,
- Desalination.
- Environmental Technology.
- Food Chemistry
- Industrial & Engineering Chemistry Research. Abrev: Ind. Eng. Chem. Res.



- Industrial Crops and Products
- International Journal of Environmental Research. Abrev: Int. J. Environ. Res.
- Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering. Abrev: Iranian J. Env. Health Sci. Eng.
- Journal of Agricultural and Food Chemistry. Abrev: J. Agric. Food Chem.
- Journal of Chemical & Engineering Data. Abrev: J. Chem. Eng. Data.
- Journal of Environmental Sciences. Abrev: J. Environ. Sci.
- Journal of Advanced Research.
- Journal of Hazardous Materials.
- Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers.
- Langmuir.
- Revista Iberoamericana de Polímeros.

Las publicaciones científicas de Simposios y Conferencias Internacionales utilizadas fueron las siguientes:

- The 6th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology KORUS 2002.
- 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, ICBBE, 2009.
- International Conference on Management and Service Science, MASS '09, IEEE, 2009.
- 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, ICBBE, 2010.
- International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks, CECNet, 2011.



IV. RESULTADOS

IV.1 Adsorbentes sólidos de origen natural

IV.1.1 Animal

- Caparazón de crustáceos como el langostino, cangrejo, etc. o la pluma del calamar gigante: son tratados para obtener quitosano en polvo como el utilizado en las investigaciones de Minamisawa *et. al* (2004) para los adsorción de Cd(II) y Pb(II). En otras investigaciones como las de Li *et. al* (2011) el quitosano fue primero modificado con alcohol polivinílico para obtener perlas macroporosas de alcohol polivinílico/quitosano (PVQ) las cuales fueron utilizadas en la adsorción de Cu(II), Pb(II), Cd(II) y Zn(II).
- Valvas de ostras: secas y molidas fueron utilizadas para la adsorción de Cd(II) y Co(II) en las investigaciones de Yan-jiao (2011).

IV.1.2 Vegetal

La estructura de soporte básico de muchos vegetales sean terrestres o acuáticos es la celulosa y sus derivados, sobre ella se genera una enorme diversidad de plantas. Estas pueden tener una constitución química de varios cientos de sustancias, algunas de las cuales pueden presentar propiedades adsorptivas.

A continuación tenemos una relación de vegetales utilizados por los investigadores referenciados en este trabajo:

- Alga marina parda *Lobophora variegata*, tratada previamente con solución de cloruro de calcio ensayando con material tratado y sin tratar para la adsorción de Cd(II) y Pb(II) en las investigaciones de Basha *et. al* (2008).

- Alga marina parda *Laminaria japonica*, para la adsorción de Cu(II) en las investigaciones de Shenghua *et. al* (2009) y para la adsorción de Pb(II) y Cu(II) en los estudios de Lee (2002).
- Alga marina parda *Lessonia trabeculata*, en la adsorción de Zn(II) en los ensayos de Navarro *et. al* (2006).
- Alga marina parda *Sargassum* sp. modificadas con formaldehído y sin modificar para la remoción de Cu(II) en los estudios de Chen *et. al* (2006).
- Aserrín de Álamo o Abeto: este material fue utilizado en las investigaciones de Sciban *et. al* (2006), la cual fue modificada previamente con soluciones de NaOH, efectuándose pruebas de adsorción con iones del cinc y cobre.
- Aserrín de Pino: este material fue utilizado sin ningún tratamiento previo para la adsorción de Cd(II) y Pb(II) en las experiencias de Chen, Nie *et. al* (2009).
- Bagazo de agave es un sub-producto de la industria de la producción de bebidas alcohólicas como el mezcal y tequila modificado previamente para la remoción de Cd(II), Pb(II) y Zn(II) en los estudios de Velazquez-Jimenez *et. al* (2013).
- Bagazo de caña de azúcar: este material fue obtenido de los suburbios de Hanói y fue tratado previamente con óxido férrico hidratado, para luego ser



- empleados en la remoción de As(V) como lo indican las investigaciones de Pehlivan *et. al* (2013).
- Borra de café y té utilizadas en la adsorción de Cu(II), Zn(II), Cd(II) y Pb(II) de acuerdo a lo reportado por en los estudios de Djati *et. al* (2006), para la adsorción de Cd(II) y Pb(II) en las experiencias de Minamisawa *et. al* (2004) y para la adsorción de Cr(VI) previa reducción a Cr(III) en los ensayos de Prabhakaran *et. al* (2009).
 - Borra de café peruano: proveniente de café tostado oscuro y tostado claro en los grados de molienda medio y fino, de acuerdo a las diferentes combinaciones y previo tratamiento de la borra de café fue experimentado en la adsorción de Cd(II) y Pb(II) de acuerdo a las investigaciones reportadas en la Tesis de Maestría en Química de Angeles (2009).
 - Cáscara de toronja: los residuos de color blanco de la cáscara fueron retirados de la capa amarilla y esta última fue utilizada para la adsorción de Cd(II) y Ni(II) de acuerdo a lo reportado en las indagaciones de Torab-Mostaedi *et. al* (2013).
 - Cáscara de Yuzu (citrus junos, naranjita japonesa) en polvo para la adsorción de Cd(II) y Pb(II) en las investigaciones de Minamisawa *et. al* (2004).

- Desechos agrícolas: obtenidos durante la cosecha del té, café, cáscaras de avellana, almendras, maní, abeto rojo, maple, almendra de palma, arroz y coco, mazorcas de maíz y desechos de manzana, entre otros recopilados en la investigación de Demirbas (2008).
- Fruto del abeto (piña cono) utilizado en la adsorción de Cd(II) en los estudios de Izanloo *et. al* (2005).
- Hoja de la palma datilera: utilizada en la adsorción de Pb(II) en las investigaciones de Boudrahem *et. al* (2011).
- Hoja de la sábila (aloe) para la adsorción de Cd(II) y Pb(II) en las investigaciones de Minamisawa *et. al* (2004).

Esta información se encuentra ordenada y resumida en la Tabla 1 del Apéndice, como un aporte a la clasificación de estos materiales adsorbentes y relacionados con los adsorbatos sobre los cuales han sido probados de acuerdo a la revisión sistemática efectuada.

IV.1.3 Mineral

- Arcilla de Jebel Tejra situada al suroeste de Túnez en el norte de África fue utilizada al natural y tratada para la adsorción de iones Cr(III) y Cd(II) como lo reportaron las investigaciones de Ghorbel-Abid *et. al* (2010).



- Cenizas de carbón: (fly ash) Aunque la composición de este material es muy dependiente del carbón de origen y de los tratamientos químicos a los que fue sometido en promedio tienen una composición de dióxido de silicio (sílice) de 60 a 65%, trióxido de aluminio (alúmina) de 25 a 30% y trióxido de hierro (magnetita) de 6 a 15%, además de otros componentes menores indicaron las investigaciones de Ahmaruzzaman (2011). En los estudios de Visa *et. al* (2009) fueron utilizadas las cenizas colectadas del electro-filtro de la Planta de Poder de Brasov en Rumania cuyos combustibles son gas natural o carbón, siendo ensayadas en la adsorción de Cu(II) y Cd(II). En los estudios de Salam *et. al* (2011) fueron utilizadas las cenizas de la empresa egipcia Geos Company y su comportamiento en la adsorción de Cu(II) y Zn(II)..

- Carbón (Charcoal) obtenido de la cáscara de maní para adsorción de Cu(II) y Zn(II) presente en aguas residuales de la industria de acabados metálicos investigado por Salam *et. al* (2011).

- Carbón activado obtenido de:
 - ✓ Residuos agrícolas del café activado mediante ácido fosfórico y cloruro de cinc utilizado en la adsorción de Pb(II) y Cd(II) en los estudios de Boudrahem, Soualah *et. al* (2011).

 - ✓ Carbón de cáscara de coco, de carbón bituminoso y de carbón lignita de la empresa Clarimex Company México, todos activados



mediante soluciones de calcio obtenidas a partir de los desechos de las cáscaras de huevos de gallina utilizados en la adsorción de Zn(II), Ni(II) y Cd(II) en los ensayos de Guijarro-Aldaco *et. al* (2011).

✓ Carbón activado de la empresa Shanxi Xinhua Chemical Co. Ltd., fue modificada su activación mediante ácido tánico para la adsorción de Cd(II) de acuerdo a las investigaciones de Liu, Chen *et. al* (2010).

✓ Carbón de lignina quemada activada con KOH utilizado en la adsorción de Cu(II) en las investigaciones de Suhas *et. al* (2007).

– Sílica gel del tipo de regular densidad fue modificado orgánicamente con AMPS (2-acrilamido-2-metilpropanosulfónico ácido) reportado por Wang *et. al* (2009) para la adsorción de Cu(II) y forma parte de la recopilación efectuada por Bhatnagar *et. al* (2010).

– Zeolita de tipo:

✓ Silicatos de aluminio hidratados de metales alcalinos y alcalino-térreos de Tochigi-Japón para la adsorción de Cd(II) y Pb(II) en las investigaciones de Minamisawa *et. al* (2004).



- ✓ Natural obtenida de la empresa egipcia Dar el Emara Company fue utilizada para la adsorción de Cu(II) y Zn(II) presente en aguas residuales de la industria de acabados metálicos en las investigaciones de Salam *et. al* (2011).
- ✓ Sintética obtenida por tratamiento del lapillus que es un desecho obtenido del minado en la piedra pómez para la adsorción de Cu(II), Ni(II), Zn(II), Pb(II) y Cr(III) de aguas residuales de acuerdo a los reportes de Catalfamo *et. al* (2006).

En la Tabla 2 del Apéndice se ha ordenado la información obtenida de manera sistemática clasificándolos e identificando los adsorbatos que han sido probados sobre ellos.

IV.2 Adsorbentes sólidos y sus características físico-químicas

Los parámetros de caracterización de los adsorbentes solidos de origen natural más utilizados se consignan a continuación indicándose entre corchetes los referenciales correspondientes:

- Tamaño de partícula por intervalos en milímetros utilizando las técnicas propias del tamizado. [1, 2, 3, 6, 15, 17, 23 a 35]
- Área superficial específica mediante la técnica de BET (Brunauer–Emmett–Teller) y porosidad. [1, 4, 6, 19, 21, 26, 27, 30, 35]
- Composición química mediante análisis elemental por espectrometría de dispersión de energía (EDS microprobe) o Espectroscopia de emisión atómica



acoplado con plasma (ICP-AES). [1, 8, 14, 26, 30, 32]

- Estudio morfológico mediante Microscopía electrónica de barrido (SEM) y Difractometría de rayos-X. [8, 15, 19, 20, 24, 26, 31, 33]
- Grupos funcionales mediante Espectroscopia Infrarroja con transformada de Fourier. [9, 20, 22, 24, 28, 31 a 33]

IV.3 Adsorbentes sólidos y sus pre-tratamientos físico-químicos.

IV.3.1 Animal

- Quitosano: obtenido de exoesqueletos de los artrópodos como cangrejo y camarones a los cuales hay que desmineralizar y eliminar el contenido proteínico de acuerdo a las investigaciones de Minamisawa *et. al* (2004).
- Quitosano modificado: para la obtención de las perlas de PVQ fue utilizado alcohol polivinílico (PVA), alginato de sodio y carbonato de calcio en polvo mezclados en 150 mL de agua destilada mediante agitación mecánica en un baño de agua a ebullición durante 2 horas. Luego se añadió el quitosano y fue agitado homogéneamente a 90 °C durante 6 horas. La mezcla resultante se extrudió a través de un inyector con un diámetro aproximado de 3 mm hacia una solución saturada de ácido bórico con 3% de cloruro de calcio, la cual era agitada suavemente, permaneciendo sumergida las perlas en esta solución durante 48 h para. Para formar las macroretículas en las perlas obtenidas en el paso anterior, estas fueron sumergidas en una solución 1M de HCl hasta que dejara de burbujear la mezcla como consecuencia de la reacción con el carbonato de calcio de acuerdo a lo reportado en las investigaciones de Li *et. al* (2011).



IV.3.2 Vegetal

- Alga marina parda *Lobophora variegata*, fue recogida del puerto Okha (Latitud 22° 28.580' N, Longitud 69° 04.254' E), en el Mar de Arabia en la India. Esta fue lavada dos veces con agua corriente del grifo y cinco veces con agua desionizada. La biomasa lavada fue secada en estufa a 60 °C durante 24 h, fue cortado con un molino analítico y tamizado para separar la fracción de tamaño entre 300 y 600 µm. La biomasa en bruto fue modificado químicamente por un pre-tratamiento con CaCl₂. Para ello se tomó 20 g de la biomasa seca se trató con 400 mL de una solución de CaCl₂ 0,2 M durante 24 h bajo agitación lenta (150 rpm). El pH de la solución se mantuvo constante a pH 5,0. La biomasa tratada con calcio fue lavada repetidamente con agua desionizada para eliminar el exceso de calcio. La biomasa se calentó luego en un horno a 60°C durante 24 h, y se tamizó para obtener la misma fracción de tamaño de partícula seleccionada para la biomasa sin tratar de acuerdo a las investigaciones de Basha *et. al* (2008). Utilizando alga marina parda *Laminaria japónica* fueron efectuados estudios similares para la adsorción de Cu(II) en los estudios de Shenghua *et. al* (2009).
- Aserrín de Álamo y Abeto: este material fue clasificado por tamaño de partícula, utilizándose para los ensayos la fracción de entre 0,5 a 1,0 mm. El material seco presentaba un área superficial de 1,05 y 3,85 m²g⁻¹, respectivamente. La textura como área superficial, volumen de poro y diámetro promedio de poro fueron obtenidos mediante mediciones de adsorción de N₂ a bajas temperaturas. Los métodos de modificación del

aserrín se llevaron a cabo tratando una parte de este material con 15 partes de soluciones a diferentes concentraciones de NaOH o Na₂CO₃. Estas fueron mantenidas a 20 °C por 6 horas, o a 80 °C por 2 horas y agitadas. El producto fue filtrado, lavado 4 veces mediante grandes volúmenes de agua destilada, para luego ser secado a 50 °C durante toda la noche, de acuerdo a lo reportado en las investigaciones de Sciban *et. al* (2006).

- Bagazo de caña de azúcar: de acuerdo a lo publicado por de Pehlivan *et. al* (2013), este material fue primero pulverizado en un molino de bolas y tamizado para utilizar la fracción de 125 – 200 µm, la cual fue lavada repetidas veces con agua desionizada y secada en un horno con aire en circulación a 60 °C durante 24 horas. Luego 50 g de este material fue hidrolizado con una solución 1,15M de ácido sulfúrico a 80 °C durante 30 minutos con la finalidad de remover los contenidos de almidón, proteínas y azúcares. A continuación se removió las ligninas de bajo peso molecular mediante agitación durante 24 horas a temperatura ambiente con una solución 0,1M de NaOH, finalmente el material así obtenido fue lavado repetidas veces y secado en un horno a 50°C, para ser almacenado en un desecador. Para el tratamiento con el óxido férrico hidratado, tomaron 10 g del material recientemente obtenido fue mezclado durante 48 horas con 300 mL de un solución 0,05M de nitrato férrico en un recipiente de 1 L, para mantener el pH entre 2,8 y 3,5 se utilizó una solución 0,1M de NaOH, luego de concluido el tiempo se filtró y lavó el adsorbente modificado repetidas veces con agua desionizada hasta obtener el pH neutro, para finalmente secarlo en un horno a 50 °C, fue almacenado a temperatura ambiente.



- Bagazo de agave modificado: en las investigaciones de Velazquez-Jimenez *et. al* (2013) el bagazo fue molido hasta un tamaño por debajo de 1 cm, este fue lavado repetidas veces con agua destilada, para remover las impurezas, para luego ser secado toda la noche en una estufa a 60 °C, luego de este tratamiento fue guardado en bolsas de polietileno y denominado bagazo de agave crudo (BAC). El BAC fue modificado tratando 25 g de este con 350 mL de soluciones de NaOH 0,01M; 0,505M ó 1M durante 6 horas a 25 °C, siendo luego enjuagado repetidas veces con agua destilada hasta pH neutro, seguidamente fue secado de la misma manera que el BAC, pero a este material modificado se le denominó bagazo de agave modificado con sodio (BA-Na), procedimientos análogos fueron seguidos con HCl y HNO₃, de manera tal que fueron denominados BA-HC y BA-HN. Dado que el BAC modificado con ácido tartárico, cítrico u oxálico no fueron exitosos en sus pruebas de adsorción, no se incluye el detalle correspondiente a sus tratamientos con el BAC.
- Borra de café: tratado solo mediante lavados con agua destilada y secado en estufa como en las investigaciones de Minamisawa *et. al* (2004) a diferencia de las investigaciones de Prabhakaran *et. al* (2009), donde el secado fue realizado por exposición directa al sol. En las investigaciones de Angeles (2009) se utilizó café verde peruano de dos zonas del país, Villa Rica-Pasco y Quillabamba-Cusco. Estos fueron tostados en grado oscuro y claro y luego molidos a su vez en dos grados de molienda medio y fino. Del café con grado de molienda fino se obtuvo la bebida de café conocida como café



expreso y del café con grado de molienda medio se obtuvo la bebida de café conocida como café americano. La borra de café resultante debido a la obtención de las bebidas de café fueron pre-tratadas mediante lavados con equipo soxhlet utilizando agua ultra pura para este fin. Luego fueron secados en estufa a 60 °C por toda la noche, para que quedaran listas como material adsorbente.

- Cáscara de toronja: utilizando solo la parte amarilla de la cáscara esta fue cortada en pedazos pequeños y lavado repetidamente con agua bi-distilada, para luego ser secada en una estufa de convección a 70-75 °C hasta constancia de peso en aproximadamente 24 horas. El material así obtenido fue molido hasta obtener un tamaño menor a 355 μm . Siendo utilizada en estas condiciones en la adsorción de Cd(II) y Ni(II) de acuerdo a lo registrado en las investigaciones de Torab-Mostaedi *et. al* (2013).
- Fruto del abeto (piña cono) fue utilizado el fruto proveniente de la región Chitgar de Irán. Este fue lavado varias veces con agua desionizada y se dejó secar a temperatura ambiente, luego fue cortado mediante licuadora clasificado por tamaño para su uso posterior de acuerdo al reporte de la investigación de Izanloo *et. al* (2005).

IV.3.3 Mineral

- Arcilla de Jebel Tejra la calificada como natural, solo fue sometida a pulverizado en un mortero de ágata hasta un radio promedio de partícula menor a 63 μm y secado a 60 °C antes de las pruebas de adsorción. Para



obtener la arcilla tratada se tomó parte de la arcilla natural preparada y fue sometida a purificación mediante repetidos intercambios catiónicos con solución de NaCl 1 M, seguida por lavado, sedimentación y diálisis de acuerdo a lo consignado en las investigaciones de Ghorbel-Abid *et. al* (2010).

- Cenizas de carbón: (fly ash, FA):

✓ FA: las cenizas de carbón se clasifican como del tipo F (ASTM) cuando su contenido acumulado de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 está por encima de 78% en peso, de acuerdo a lo reportado por Visa *et. al* (2009). En las investigaciones de Salam *et. al* (2011) las FA utilizadas tenían una concentración acumulada del orden del 98%, por lo tanto son consideradas del tipo F, y la única preparación a la que fueron sometidas fue al secado en horno a 110 °C durante 2 horas y la separación de la fracción con un diámetro menor o igual a 250 μm .

✓ FA modificadas con TiO_2 : en los estudios de Visa *et. al* (2009), la modificación fue efectuada de acuerdo al procedimiento siguiente: a FA del tipo F (ASTM) se les sometió a lavados con agua pura mediante agitación a temperatura ambiente durante 48 horas, a fin de remover los compuestos solubles. Después de la agitación la solución filtrada tuvo un pH constante de 7,8 y una conductividad de 2,25 mS con un valor Total de Sólidos Disueltos de 1140 mg/L. En estas condiciones las FA presentaron una capacidad nula de

adsorción de cadmio, por ello el siguiente paso fue el de activar la superficie de las FA mediante agitación durante 48 horas con una solución de NaOH 2N o con una solución de anaranjado de metilo al 0,01% en peso, para que a continuación someterla a agitación con la primera solución mencionada, finalmente y luego de filtrada las FA son lavadas con agua ultra pura y secadas en la estufa a 105-120 °C por 2 horas. La modificación de las FA, así obtenidas, fueron efectuadas mediante TiO₂ con 80% de anatasa y 20% de rutilo de un tamaño de partícula promedio de 30 nm y una área superficial de 50 m²/g.

- Carbón (Charcoal) de cáscara de maní recolectada del mercado local de El Cairo Egipto, fue lavado a fondo con agua destilada para remover el polvo, para luego ser secada en un horno a 100 °C por 18 horas, molida y tamizada para separar la fracción de 0,5 a 0,8 mm, la cual fue enjuagada con una solución 0,1M de HCl, para luego ajustar el pH entre 6 y 7, finalmente este material fue colocado en un horno a 80 °C hasta alcanzar una densidad y humedad constantes. Esto fue reportado por Salam *et. al* (2011).
- Carbón activado obtenido de:
 - ✓ Residuos agrícolas del café el proceso de activación consistió en impregnar el material con ZnCl₂ o H₃PO₄ variando el ratio de impregnación de la masa de ZnCl₂ o H₃PO₄ a masa de residuo agrícola de café de 0 a 100% para a continuación someter el preparado a pirólisis a 600°C durante 1 hora de acuerdo a lo

indicado en los estudios de Boudrahem, Soualah *et. al* (2011).

- ✓ Carbón de cáscara de coco, de carbón bituminoso y de carbón lignita fueron tratados utilizando como agente de activación una solución acuosa de calcio extraída de las cáscaras de huevos de gallina modificando químicamente la superficie del carbón activado comercial por la formación de una delgada capa de fosfato de calcio sobre su superficie de acuerdo a las investigaciones efectuadas por Guijarro-Aldaco *et. al* (2011).

- Sílica gel del tipo de regular densidad modificado: el adsorbente denominado AMPS-sílice fue sintetizado mediante enlazamiento con AMPS (2-acrilamido-2-metilpropanosulfónico ácido) sobre la superficie del sílice, que funcionaba como un reactivo γ -metacriloxipropiltrimetoxisilano de acuerdo al reporte de Wang *et. al* (2009).

- Zeolita del tipo:
 - ✓ Natural de procedencia egipcia tenía una composición de una composición porcentual en peso de SiO_2 (45,09%), Al_2O_3 (14,43%) y Fe_2O_3 (10,59%) presentando una pérdida de peso por ignición (L.O.I., $1050^\circ\text{C} \times 2$ horas) del 14,49%. Este material fue chancado, molido y tamizado para utilizar la fracción de 300 a 600 μm , la cual fue secada en un horno a $100 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 24 horas, de acuerdo a las investigaciones de Salam *et. al* (2011).

- ✓ Sintética en la producción de sílice amorfa y silicato de sodio se trata el lapillus con una solución acuosa de soda cáustica, un subproducto de este tratamiento es esta zeolita sintética cristalizada en forma pseudo-cúbica. Esta es utilizada sin ningún tratamiento posterior como lo manifiesta en sus investigaciones Catalfamo *et. al* (2006).

IV.4 Procesos de adsorción de metales pesados en solución acuosa

Los metales pesados como contaminantes de los recursos hídricos pueden tener un origen natural y/o antropogénico. Para la investigación de sus procesos de adsorción preliminarmente se utilizan soluciones acuosas estándares de metales pesados, una vez obtenido estos resultados, recién se utilizan muestras de agua contaminada.

En las investigaciones de los referenciales [2, 3, 5, 9, 12, 13,17, 19, 22 a 27, 31 y 32] se han utilizado adsorbentes naturales de origen animal y vegetal como las hojas de la palma datilera, quitosano, el fruto del abeto (piña cono), el té verde, la alga marina parda de la variedad *Lobophora variegata*, *Lessonia trabeculata* y *Sargassum* sp. modificada con formaldehído, el té, el aloe, el yuzu, el té grueso, los desechos agrícolas, el aserrín de álamo o abeto, la borra de café, el bagazo de caña de azúcar, la cáscara de toronja y el bagazo de agave.

En los estudios de los referenciales [6, 15, 22, 30, 8, 4, 34, 14, 33 y 26] se han utilizado adsorbentes de origen mineral como el carbón activado, la zeolita natural, la zeolita sintética, la sílica gel, la arcilla y las cenizas de carbón.



En las investigaciones revisadas se ha encontrado muchos estudios preliminares y en menor cantidad pruebas de adsorción sobre muestras de agua contaminada. Al revisar los procesos de adsorción se ha podido establecer que en ambos casos los procedimientos son similares pero no exactamente iguales, por ello a continuación se describirán las principales características de estos procedimientos.

IV.4.1 Metales pesados en soluciones acuosas estándares

Estos procesos de adsorción tienen las características generales siguientes:

- Método por lotes
- Relación Masa de adsorbente / Volumen solución acuosa: para Cu, Zn, Cd, Ni y Pb: 0,2 a 2,5g/200mL; para Cr: 0,3g/100mL y 1,0g/1000mL; Cd: 0,6g/300mL; As: 0,4g/100mL.
- Metales pesados: soluciones acuosas de Cd(II) 10 ppm, Pb(II) de 10 ppm, Cr(VI) como $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ (ac); Cr(III), Pb(II), Cu(II), Zn(II), Ni(II) y Cd(II) de 100 a 600 ppm; As(V) de 10 a 300 ppm en experimentos de adsorción individuales.
- Parámetros controlados:
 - i. Tamaño de partícula del sólido adsorbente.
 - ii. Caracterización: para las arcillas, cenizas de carbón (FA) y zeolitas naturales o sintéticas mediante difracción de rayos X y microscopía electrónica; para el PVQ el área superficial de Brunauer–Emmett–Teller (BET) mediante las isothermas de adsorción de N_2 a 77 K con un analizador micrométrico Chemisorb 2750 y para los cambios de cristalinidad mediante difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido.

- iii. pH regulado con soluciones de ácido nítrico y/o de amoníaco, soluciones acuosas 0,1 M de HCl o 0,1 M de NaOH.
 - iv. Temperatura: ambiente de 20 a 30 °C o regulada a 20, 30, 40 ó 50 °C.
 - v. Equipo de agitación: magnético, orbital entre 120 y 180 rpm.
 - vi. Tiempo de contacto en horas: para As, Pb, Cu o Zn de 24, 10 y 2 horas, para Cd de 24 y 10 horas, en el caso del Cr solo 10 horas.
- Cuantificación de metales pesados adsorbidos: para Zn, Cu, Ni, Cd, Pb y As mediante espectrofotómetro de adsorción atómica o espectrofotómetro de emisión atómica por plasma acoplado inductivamente, aplicado a las soluciones remanentes al finalizar el tiempo de agitación, calculándose lo adsorbido por la diferencia entre la concentración inicial y final del ion metálico. Para el cromo como se encuentra presente como Cr(VI) y Cr(III) la determinación total se efectúa mediante un espectrómetro de emisión óptica de plasma inductivamente acoplado y el Cr(VI) es determinado por el método colorimétrico de formación del complejo 1,5-difenilcarbazida con Cr(VI) medido con espectrómetro UV a 540 nm, por tanto se determina el Cr(III) por diferencia.

IV.4.2 Metales pesados en aguas naturales y/o industriales

Utilizadas en las investigaciones de Minamisawa *et al.* (2004), donde se utilizó agua de río, desagües experimentales y agua de lluvia.

Estos procesos de adsorción además de tener características análogas a las denotadas en el punto IV.4.1, tienen las diferencias siguientes:

- Muestras de 500 mL.
- Preparación previa de estas muestras por microfiltrado con una membrana

de diámetro de poro de 45 μm y el filtrado es acidificado con solución de ácido nítrico hasta pH: 1, para ser guardadas en botellas de polietileno.

- Los metales pesados adsorbidos son medidos mediante un proceso de desorción sobre el adsorbente al culminar la prueba de adsorción. La desorción se lleva a cabo con unos 5 mL de una solución de ácido acético 0,1M.

En las investigaciones de Chen, Nie *et al.* (2009) se utilizó efluentes de la industria de galvanoplastia que contenían 56,21 y 23,74 mg/L de Pb(II) y Cd(II), respectivamente. La prueba de adsorción se efectuó con una dosificación de 2 g/L de adsorbente, el efluente presentaba inicialmente un pH de 1,8 el cual fue ajustado a un pH de 6 después del tratamiento de adsorción con el aserrín de pino el nivel de Pb(II) y Cd(II) bajó hasta los 0,01 y 0,07 mg/L, respectivamente.

IV.4.3 Características que debe tener una prueba de adsorción

Las pruebas de adsorción tienen por finalidad cuantificar la capacidad máxima de adsorción del adsorbente respecto a los metales pesados que adsorbió en función de los parámetros de pH y tiempo de contacto óptimos.

Estas pruebas se efectúan trabajando con soluciones estándares del catión metálico a una determinada concentración la cual debe permitirnos asegurar que la ionización del catión metálico se encuentra en forma de complejo acuoso solo con moléculas de agua, lo cual se suele denominar como catión metálico acuoso y no formando otros complejos que en algunos casos podrían incluso ser complejos con carga negativa, es decir un anión complejo.



Para este fin, se debe obtener y evaluar la especiación del catión metálico en función de su concentración y el pH de la solución acuosa, denominados diagramas de especiación en función del pH. Estos diagramas se pueden obtener aplicando el programa HYDRA desarrollado por Ignasi Puigdomenech de la División de Química Inorgánica del Royal Institute of Technology como se desarrollaron en los estudios de Angeles (2009). Cuando la especiación se encuentra claramente definida al igual que el pH óptimo y tiempo de contacto óptimo se puede proceder a caracterizar si el proceso de adsorción del catión metálico estudiado se ajusta a algún modelo de isoterma de adsorción.

Las pruebas de adsorción para determinar la isoterma de adsorción se efectúan por pruebas de adsorción por lotes. Generalmente se procede utilizando el mismo volumen de solución acuosa del catión metálico a una concentración inicial definida y ajustado al pH óptimo en cada uno de las pruebas del lote y variando la masa del sólido adsorbente de manera ascendente para cada prueba del lote como lo describen las investigaciones de Angeles (2009) o de lo contrario se mantiene constante la masa del adsorbente en cada prueba del lote y se varia de forma ascendente la concentración inicial del catión metálico al pH óptimo como lo señala lo reportado por Izanloo *et. al* (2005). En ambos casos se utiliza el tiempo de contacto determinado al pH óptimo en pruebas cinéticas preliminares en condiciones análogas.

IV.4.4 Los cationes metálicos y sus isotermas de adsorción

De acuerdo a las investigaciones revisadas del 2004 a marzo del 2013 a continuación se detallan los cationes metálicos cuyos procesos de adsorción se



ajustaron con mayor precisión a los diferentes modelos de isothermas de adsorción y de ser el caso la omisión y/o no ajuste al modelo de isoterma ensayado.

IV.4.4.1 Isothermas de adsorción para el As(V)

Adsorbentes de origen vegetal:

- Langmuir:
 - Bagazo de caña de azúcar: con un tiempo de contacto de 3 horas a un pH de 4 reportando una capacidad máxima de adsorción de 22,1 mg/g de acuerdo de acuerdo a las investigaciones de Pehlivan *et. al* (2013).

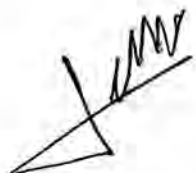
IV.4.4.2 Isothermas de adsorción para el Cd(II)

Adsorbentes de origen animal:

- Langmuir:
 - Quitosano con un tiempo de contacto de 2 horas, a un pH de 6,7. según las investigaciones de Minamisawa *et al.* (2004).
- Freundlich:
 - Quitosano modificado como perlas macroporosas de alcohol polivinílico/quitosano (PVQ) con un tiempo de contacto de 12 horas a un pH de 6 exhibiendo una capacidad máxima de adsorción de 126,6 mg/g, según lo reportaron en las investigaciones de Li *et. al* (2011).

Adsorbentes de origen vegetal:

En el caso del Bagazo de agave modificado no se evaluaron las isothermas de adsorción, pero se reportó un pH óptimo de 5 y una capacidad de adsorción de



8 mg/g de acuerdo a las investigaciones de Velazquez-Jimenez *et. al* (2013).

En otras investigaciones se reportó:

- Langmuir:

- Fruto del abeto (piña cono) con un tiempo de contacto de 6 a 7 horas, no reportan el pH óptimo, la capacidad máxima de adsorción fue de 13,5 mg/g de acuerdo a las investigaciones de Izanloo *et. al* (2005).
- Borra de café, borra de té, cáscara de yuzu y sábila con un tiempo de contacto de 2 horas, a un pH de 6,7. Indican que el orden decreciente de capacidad de adsorción fue sábila, quitosano, borra de té, borra de café y cáscara de yuzu según las investigaciones de Minamisawa *et al.* (2004).
- Aserrín de Pino: con un tiempo de contacto de 0,5 horas a un pH de 6 y reportan una capacidad máxima de adsorción de 214,1 mg/g en las investigaciones de Chen, Nie *et. al* (2009).

- Fritz-Schluender:

- Alga marina parda *Lobophora variegata* cruda y tratada con un tiempo de contacto de 6 horas, a un pH de 5,0 según de Basha *et. al* (2008).

- Freundlich:

- Cáscara de arroz según las investigaciones de Demirbas (2008).
- Cáscara de toronja solo la capa amarilla con un tiempo de contacto de 2,5 horas a un pH de 5 exhibiendo una capacidad máxima de adsorción de 42,09 mg/g de acuerdo a lo reportado en las



investigaciones de Torab-Mostaedi *et. al* (2013).

Adsorbentes de origen mineral:

En el caso del carbón activado con ácido tánico utilizaron un tiempo de contacto de 1 hora a pH 4, pero no se ajustaron a la isoterma de Langmuir ni a la de Freundlich de acuerdo a las investigaciones de Liu, Chen *et. al* (2010).

En otras investigaciones se reportó:

- Langmuir:
 - Zeolita con un tiempo de contacto de 2 horas, a un pH de 6,7. Indican que este adsorbente fue el de menor capacidad de adsorción respecto a la sábila, quitosano, borra de té, borra de café y cáscara de yuzu según las investigaciones de Minamisawa *et al.* (2004).
 - FA modificadas con TiO₂: con un tiempo de contacto de 0,5 horas, no reportan el pH, pero reportan una capacidad máxima de adsorción de 9,5147 mg/g en los estudios de Visa *et. al* (2009).

- Freundlich:
 - Arcilla de Jebel Tejra con un tiempo de contacto de 20 horas a un pH de 3,5 exhibiendo una capacidad máxima de adsorción de 52,5 mg/g, según lo reportaron las investigaciones de Ghorbel-Abid *et. al* (2010).

IV.4.4.3 Isotermas de adsorción para el Cr(III)

Adsorbentes de origen vegetal:

- Toth:

- Borra de café y borra de té con un tiempo de contacto de 2 horas a un pH de 4, con una capacidad máxima de adsorción de 39,0 y 44,9 mg/g, respectivamente según lo reportado por Prabhakaran *et. al* (2009).

Adsorbentes de origen mineral:

- Langmuir:
 - Arcilla de Jebel Tejra con un tiempo de contacto de 20 horas a un pH de 3,5 exhibiendo una capacidad máxima de adsorción de 35,7 mg/g, según lo reportaron las investigaciones de Ghorbel-Abid *et. al* (2010).

IV.4.4.4 Isotermas de adsorción para el Cu(II)

Adsorbentes de origen animal:

- Freundlich:
 - Quitosano modificado como perlas macroporosas de alcohol polivinílico/quitosano (PVQ) con un tiempo de contacto de 12 horas a un pH de 6 exhibiendo una capacidad máxima de adsorción de 238,45 mg/g, según lo reportaron en las investigaciones de Li *et. al* (2011).

Adsorbentes de origen vegetal:

- Langmuir:
 - Cáscara de arroz según las investigaciones de Demirbas (2008).
 - Aserrín de Álamo o Abeto modificado con NaOH con un tiempo de contacto de 2 horas, no se reporta el pH, pero si la capacidad máxima

de adsorción de 0,109 y 0,200 mmol/g, respectivamente de acuerdo a las investigaciones de Sciban *et. al* (2006).

Adsorbentes de origen mineral:

- Langmuir:
 - FA con un tiempo de contacto de 2 horas a un pH de 8, pero no reportaron las capacidades máximas de adsorción respectivas de acuerdo a lo reportado por Salam *et. al* (2011).
 - FA modificadas con TiO₂ con un tiempo de contacto de 0,5 horas, no reportan el pH, pero reportan una capacidad máxima de adsorción de 9,5147 mg/g en los estudios de Visa *et. al* (2009).

 - Carbón vegetal (Charcoal) de cáscara de maní con un tiempo de contacto de 2 horas a un pH de 6, pero no reportaron las capacidades máximas de adsorción respectivas de acuerdo a lo reportado por Salam *et. al* (2011).

 - Zeolita natural con un tiempo de contacto de 3 horas a un pH de 6, pero no reportaron las capacidades máximas de adsorción respectivas de acuerdo a lo reportado por Salam *et. al* (2011).

- Freundlich:
 - Sílica gel modificado a un pH de 6 con una capacidad máxima de adsorción de 19,9 mg/g según las investigaciones de Wang *et. al* (2009).



IV.4.4.5 Isotermas de adsorción para el Ni(II)

Adsorbentes de origen vegetal:

- Freundlich:
 - Cáscara de toronja solo la capa amarilla con un tiempo de contacto de 2,5 horas a un pH de 5 exhibiendo una capacidad máxima de adsorción de 46,13 mg/g de acuerdo a lo reportado en las investigaciones de Torab-Mostaedi *et. al* (2013).

IV.4.4.6 Isotermas de adsorción para el Pb(II)

Adsorbentes de origen animal:

- Freundlich:
 - Quitosano con un tiempo de contacto de 2 horas, a un pH de 4. Indican que el orden decreciente de capacidad de adsorción fue zeolita, borra de té, quitosano, sábila, borra de café y cáscara de yuzu según las investigaciones de Minamisawa *et al.* (2004).
 - Quitosano modificado como perlas macroporosas de alcohol polivinílico/quitosano (PVQ) con un tiempo de contacto de 12 horas a un pH de 6 exhibiendo una capacidad máxima de adsorción de 166,44 mg/g, según lo reportaron en las investigaciones de Li *et. al* (2011).

Adsorbentes de origen vegetal:

En el caso del Bagazo de agave modificado no se evaluaron las isotermas de adsorción, pero se reportó un pH óptimo de 5 y una capacidad de adsorción de 14 mg/g de acuerdo a las investigaciones de Velazquez-Jimenez *et. al* (2013).

En otras investigaciones se precisó:

- Langmuir:



- Aserrín de Pino: con un tiempo de contacto de 0,5 horas a un pH de 6 y reportan una capacidad máxima de adsorción de 289,9 mg/g en las investigaciones de Chen, Nie *et. al* (2009).
- Freundlich:
 - Borra de café, borra de té, cáscara de yuzu y sábila con un tiempo de contacto de 2 horas, a un pH de 4. Indican que el orden decreciente de capacidad de adsorción fue zeolita, borra de té, quitosano, sábila, borra de café y cáscara de yuzu según las investigaciones de Minamisawa *et al.* (2004).
- Fritz-Schluender:
 - Alga marina parda *Lobophora variegata* cruda y tratada con un tiempo de contacto de 6 horas, a un pH de 5,0 según de Basha *et. al* (2008).

Adsorbentes de origen mineral:

- Freundlich:
 - Zeolita con un tiempo de contacto de 2 horas, a un pH de 4. Indican que el orden decreciente de capacidad de adsorción fue zeolita, borra de té, quitosano, sábila, borra de café y cáscara de yuzu según las investigaciones de Minamisawa *et al.* (2004).

IV.4.4.7 Isotermas de adsorción para el Zn(II)

Adsorbentes de origen animal:

- Langmuir:
 - Quitosano modificado como perlas macroporosas de alcohol polivinílico/quitosano (PVQ) con un tiempo de contacto de 12 horas



a un pH de 6 exhibiendo una capacidad máxima de adsorción de 74,18 mg/g, según lo reportaron en las investigaciones de Li *et. al* (2011).

Adsorbentes de origen vegetal:

- Langmuir:
 - En el caso del Bagazo de agave modificado se reportó un pH óptimo de 5 y una capacidad de adsorción de 36 mg/g de acuerdo a las investigaciones de Velazquez-Jimenez *et. al* (2013).
 - Aserrín de Álamo o Abeto modificado con NaOH con un tiempo de contacto de 2 horas, no se reporta el pH, pero si la capacidad máxima de adsorción de 0,242 y 0,205 mmol/g, respectivamente de acuerdo a las investigaciones de Sciban *et. al* (2006).

Adsorbentes de origen mineral:

- Langmuir:
 - Carbón vegetal (Charcoal) de cáscara de maní con un tiempo de contacto de 2 horas a un pH de 6, pero no reportaron las capacidades máximas de adsorción respectivas de acuerdo a lo reportado por Salam *et. al* (2011).
 - Zeolita natural con un tiempo de contacto de 3 horas a un pH de 6, pero no reportaron las capacidades máximas de adsorción respectivas de acuerdo a lo reportado por Salam *et. al* (2011).
 - Cenizas de carbón (FA) con un tiempo de contacto de 2 horas a un pH de 8, pero no reportaron las capacidades máximas de adsorción respectivas de acuerdo a lo reportado por Salam *et. al* (2011).



IV.4.5 Procesos de desorción y reutilización del adsorbente

IV.4.5.1 Adsorbentes de origen animal

- Quitosano modificado como perlas macroporosas de alcohol polivinílico/quitosano (PVQ) cargados con Cu(II), Pb(II), Zn(II) y Cd(II) fueron desorbidos utilizando una solución 0,1M de EDTA obteniéndose un 98,4% de recuperación de Cu(II), para los otros cationes metálicos se utilizó una solución 0,1M de HCl obteniéndose recuperaciones del 96,7%; 98,5% y 98,8%, respectivamente. Se comprobó su reutilización a través de 5 ciclos de adsorción/desorción exitosamente, al haberse obtenido al finalizar el quinto ciclo recuperaciones del orden de 76 a 88% de acuerdo a lo reportado en las investigaciones de Li *et. al* (2011).

IV.4.5.2 Adsorbentes de origen vegetal

- Alga marina parda *Laminaria japonica*, cargado con Cu(II) es desorbido con solución acuosa de HCl habiéndose obtenido un 87,2% de recuperación y haciendo factible su reutilización. Las desorciones con ácido nítrico deterioraban la estructura del alga y no permitían su reutilización de acuerdo a lo reportado en las investigaciones de Shenghua *et. al* (2009).
- Bagazo de caña de azúcar cargado con As(V) es desorbido con una solución de NaOH 1M alcanzándose una recuperación del 85% de arsénico, esta desorción genera indicios que esta desorción al parecer se produce a través de la formación de un complejo aniónico con el As(V) de



acuerdo a las investigaciones de Pehlivan *et. al* (2013).

- Cáscara de toronja solo la capa amarilla cargada con Cd(II) y Ni(II) fue desorbido exitosamente mediante elución con una solución 0,1M de HCl recuperándose más del 97% de cada uno de ellos. Comprobaron su reutilización a través de 5 ciclos consecutivos de adsorción/desorción de acuerdo a lo reportado en las investigaciones de Torab-Mostaedi *et. al* (2013).

IV.4.5.3 Adsorbentes de origen mineral

- Sílica gel modificado cargado con Cu(II) es desorbido con solución acuosa de ácido nítrico y sus propiedades adsorbentes permanecen estables durante 3 ciclos de adsorción/desorción de acuerdo a lo reportado en las investigaciones de Wang *et. al* (2009).

De los resultados exhibidos se puede observar que se ha conseguido recopilar y ordenar la información concerniente a los adsorbentes sólidos de origen natural para los adsorbatos metálicos pesados en solución acuosa, habiéndose priorizado las publicaciones más recientes concernientes al periodo junio del 2004 a enero del 2013.



V. DISCUSIÓN

Como se puede observar en la Tabla 1 y Tabla 2 se ha clasificado los adsorbentes sólidos de origen natural vegetal y mineral que tienen la propiedad de adsorber a los cationes metálicos en solución acuosa. De la información recopilada como lo muestran las tablas mencionadas son muy variados los adsorbentes de origen vegetal donde con cierta frecuencia se observa el uso de las algas marinas pardas, así como de desechos de las cosechas del café y otros alimentos. Destaca que a diferencia de los adsorbentes de origen animal donde el adsorbente casi único es el quitosano.

Si establecemos un paralelo con las investigaciones de Demirbas (2008), en su caso solo se enfocó a los adsorbentes procedentes de los desechos agrícolas a diferencia de la presente investigación donde el enfoque es más amplio y se destaca la gran variedad de adsorbentes de origen mineral que presentan excelentes capacidades de adsorción.

Ha sido muy interesante observar como las metodologías experimentales para los procesos de adsorción no guardan un procedimiento sistemático que cubra aspectos que pueden afectar las conclusiones sobre este tema, por ejemplo los metales pesados en solución son muy dependientes del pH y su concentración en la solución, para que estos formen complejos coordinados con el agua y los iones hidróxido, sin embargo no se ha encontrado que se tome en cuenta la especiación de los cationes metálicos en solución en función del pH, por ello una primera conclusión en ese sentido es que siempre debe efectuarse este estudio como se indicara en el punto IV.4.3 utilizando el programa HYDRA desarrollado por Ignasi Puigdomenech de la División de Química Inorgánica del Royal Institute of Technology al igual que fue efectuado en las investigaciones sobre este tema llevadas a cabo por el autor en el 2009, a través de la tesis de Maestría en Química.



En cuanto a la determinación de la capacidad máxima de adsorción de los adsorbentes por los metales pesados se establece con claridad que el uso de los modelos de las isothermas de adsorción son la herramienta indicada para este fin, debiendo de acuerdo a lo sostenido en las investigaciones de Subramanyam *et. al* (2012) aplicar el modelo de isoterma de Fritz-Schuluender que a través de sus 5 constantes puede llegar a representar la adsorción de estos procesos que son bastante complejos y muchas veces se produce procesos de fisisorción y quimisorción simultáneamente.

Debo sostener que no se debe soslayar la caracterización del adsorbente como se ha indicado en el punto IV.2 respecto a este tema es muy importante para desentrañar los mecanismos involucrados en estos procesos, el contar con el estudio morfológico por microscopía electrónica de barrido y Difractometría de rayos-X.

Finalmente debo indicar que se ha encontrado en las investigaciones revisadas sistemáticamente que Li *et. al* (2011) determinó 5 ciclos de adsorción/desorción a el quitosano, que igual cantidad de ciclos fueron determinados par la cáscara de toronja por Torab-Mostaedi *et. al* (2013) lo que indica que estos adsorbentes de origen natural tienen un gran potencial para la descontaminación de los recursos hídricos contaminados con metales pesados.



VI. REFERENCIALES

1. Ahmaruzzaman, M. Industrial wastes as low-cost potential adsorbents for the treatment of wastewater laden with heavy metals. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2011, 166, 36-59.
2. Angeles Villón, Luis Rosas. Adsorción de cadmio y plomo en efluentes acuosos mediante borra de café peruano. Tesis de Maestría en Química - PUCP. Escuela de Graduados. Lima, 2009.
3. Basha, S.; Jha, B. Estimation of Isotherm Parameters for Biosorption of Cd(II) and Pb(II) onto Brown Seaweed, *Lobophora Wariegata*. *J. Chem. Eng. Data*, 2008, 53, 449-455.
4. Bhatnagar, A.; Sillanpää, M. Utilization of agro-industrial and municipal waste materials as potential adsorbents for water treatment – A review. *Chemical Engineering Journal*, 2010, 157, 277-296.
5. Boudrahem, F.; Aissani-Benissad, F.; Soualah, A. Adsorption of Lead(II) from Aqueous Solution by Using Leaves of Date Trees As an Adsorbent. *J. Chem. Eng. Data*, 2011, 56 (5), 1804-1812.



6. Boudrahem, F.; Soualah, A.; Aissani-Benissad, F. Pb(II) and Cd(II) Removal from Aqueous Solutions Using Activated Carbon Developed from Coffee Residue Activated with Phosphoric Acid and Zinc Chloride. *J. Chem. Eng. Data*, 2011, 56 (5), 1946–1955.
7. Cassidy, H. G. ADSORPTION AND CHROMATOGRAPHY, Nueva York: Interscience Publishers, 4ta Edición, 1965.
8. Catalfamo, P.; Arrigo, I.; Primerano, P.; Corigliano, F. Efficiency of a zeolitized pumice waste as a low-cost heavy metals adsorbent. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, B134, 140-143.
9. Chen, J.P.; Yang, L. Study of a Heavy Metal Biosorption onto Raw and Chemically Modified *Sargassum* sp. via Spectroscopic and Modeling Analysis. *Langmuir*, 2006, 22, 8906-8914.
10. Chen, Y.; Nie, J. Biosorptional removal of lead and cadmium from Water by Waste Materials. *International Conference on Management and Service Science, MASS '09, IEEE, 2009, 1-4*.
11. Dabrowski, A.; Tertykh, V. A. ADSORPTION ON NEW AND MODIFIED INORGANIC SORBENTS, Amsterdam: Elsevier Science B.V., 1ra. Edición, 1996.



12. Demirbas, A. Heavy metal adsorption onto agro-based waste materials: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 157, 220-229.
13. Djati, U.H.; Hunter, K.A. Adsorption of divalent copper, zinc, cadmium and lead ions from aqueous solution by waste tea and coffee adsorbents. *Environmental Technology*.2006, 27, 25-32.
14. Ghorbel-Abid, I.; Galai, K.; Trabelsi-Ayadi, M. Retention of chromium (III) and cadmium (II) from aqueous solution by illitic clay as a low-cost adsorbent. *Desalination*, 2010, 256 190-195.
15. Guijarro-Aldaco, A.; Hernández-Montoya, V.; Bonilla-Petriciolet, A.; Montes-Morán, M.; Mendoza-Castillo, D. Improving the Adsorption of Heavy Metals from Water Using Commercial Carbons Modified with Egg Shell Wastes. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2011, 50 (15), 9354–9362.
16. IUPAC. COMPENDIUM OF CHEMICAL TERMINOLOGY - GOLD BOOK, Libro electrónico: International Union of Pure and Applied Chemistry: Version-2.3.2, 2012.
Recuperado en julio-2013 de: <http://goldbook.iupac.org/index.html>.
17. Izanloo, H.; Nasser, S. Cadmium Removal from Aqueous Solutions by Ground Pine Cone. *Iranian J. Env. Health Sci. Eng.*, 2005, 2 N°1, 33–42.



18. Lee, H.S. Continuous biosorption of heavy metal ions by an alga biosorbent in fixed bed column. *The 6th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology KORUS 2002*, 2002, 337-340.
19. Li, X.; Li, Y.; Ye, Z. Preparation of macroporous bead adsorbents based on poly(vinyl alcohol)/chitosan and their adsorption properties for heavy metals from aqueous solution. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 178, 60-68.
20. Liu, Q.; Song, H. Glycin modification of spherical cellulose for chromium ions removal from wastewater. *4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, ICBBE, 2010*, 1-4.
21. Liu, X.; Chen, Z.; Ye, M.; Xu, J. The enhancement of Cd(II) adsorption by immobilisation of tannic acid onto powdered activated carbon. *4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering ICBBE, 2010*, 1-4.
22. Minamisawa, M.; Minamisawa, H.; Yoshida, S.; Takai, N. Adsorption Behavior of Heavy Metals on Biomaterials. *J. Agric. Food Chem.*, 2004, 52, 5606-5611.
23. Navarro, A.E.; Ramos, K.P.; Campos, K.; Maldonado, H.J. Elucidación del efecto del pH en la adsorción de metales pesados mediante biopolímeros naturales: cationes divalentes y superficies activas. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 2006, 7(2), 113-126.



24. Pehlivan, E.; Tran, H.T.; Ouédraogo, W.K.I.; Schmidt, C.; Zachmann, D.; Bahadir M. Sugarcane bagasse treated with hydrous ferric oxide as a potential adsorbent the removal of As(V) from aqueous solutions. *Food Chemistry*, 2013, 138, 133-138.
25. Prabhakaran, S.K.; Vijayaraghavan, K.; Balasubramanian, R. Removal of Cr(VI) Ions by Spent Tea and Coffee Dusts: Reduction to Cr(III) and Biosorption. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2009, 48, 2113-2117.
26. Salam, O. E. A.; Reiad, N. A.; ElShafei, M. M. A study of the removal characteristics of heavy metals from wastewater by low-cost adsorbents. *Journal of Advanced Research*, 2011, 2, 297-303.
27. Sciban, M.; Klasnja, M.; Skrbie, B. Modified softwood sawdust as adsorbent of heavy metals ions from water. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, B136, 266-271.
28. Shenghua, Z.; Xiang, W.; Chunyu, T., Zhenzhen, C.; Lidan, C.; Yuan, H. Equilibrium and kinetic studies on biosorption of Cu(II) by immobilized brown algae *Laminaria japonica*. *3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, ICBBE*, 2009, 1-5.



29. Subramanyam, B.; Ashutosh, D. Adsorption Isotherm Modeling of Phenol Onto Natural soils – Applicability of Various Isotherm Models. *Int. J. Environ. Res.*, 2012, 6(1), 265-276.
30. Suhas; Carrott, P.J.M.; Carrott M.M.L.R.. Lignin – from natural adsorbent to activated carbon: A review. *Bioresource Technology*, 2007, 98, 2301-2312.
31. Torab-Mostaedi, M.; Asadollahzadeh, M.; Hemmati, A.; Khosravi, A. Equilibrium, kinetic, and thermodynamic studies for biosorption of cadmium and nickel on grapefruit peel. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2013, 44, 295-302.
32. Velazquez-Jimenez, L.H.; Pavlick, A.; Rangel-Mendez, J.R. Chemical characterization of raw and treated agave bagasse and its potential as adsorbent of metal cations from water. *Industrial Crops and Products*, 2013, 43, 200-206.
33. Visa, M.; Carcel, R.,A.; Andronic, L.; Duta, A. Advanced treatment of wastewater with methyl orange and heavy metals on TiO₂, fly ash and their mixtures. *Catalysis Today*, 2009, 144, 137-142.
34. Wang, H.; Kang, J.; Liu, H.; Qu, J. Preparation of organically functionalized silica gel as adsorbent for copper ion adsorption. *J. Environ. Sci. (China)*, 2009, 21(11), 1473-1479.



35. Yan-jiao, G. Cadmium and Cobalt Removal from Heavy Metal Solution Using Oyster Shells Adsorbent. *International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks, CECNet, 2011, 1098-1101.*

VII. APÉNDICE

Tabla 1. Adsorbentes de origen vegetal para metales pesados en solución acuosa.

Adsorbente	Especie o Nombre común	Adsorbatos metálicos							Referenciales
		(II)					(III)	(V)	
		Cu	Cd	Pb	Zn	Ni	Cr	As	
Alga marina parda	<i>Lobophora variegata</i>	-	×	×	-	-	-	-	Basha <i>et. al</i> (2008)
	<i>Laminaria japonica</i>	×	-	-	-	-	-	-	Shenghua <i>et. al</i> (2009)
		×	-	×	-	-	-	-	Lee (2002)
	<i>Lessonia trabeculata</i>	-	-	-	×	-	-	-	Navarro <i>et. al</i> (2006)
	<i>Sargassum</i> sp.	×	-	-	-	-	-	-	Chen <i>et. al</i> (2006).
Aserrín de	Álamo o abeto	×	-	-	×	-	-	-	Sciban <i>et. al</i> (2006)
	Pino	-	×	×	-	-	-	-	Chen, Nie <i>et. al</i> (2009)
Bagazo de	Agave o Pita	-	×	×	×	-	-	-	Velazquez-Jimenez <i>et. al</i> (2013)
	Caña de azúcar	-	-	-	-	-	-	×	Pehlivan <i>et. al</i> (2013)
Borra de	Café y/o té	×	×	×	×	-	-	-	Djati <i>et. al</i> (2006)
		-	×	×	-	-	-	-	Minamisawa <i>et. al</i> (2004)
		-	-	-	-	-	-	×	Prabhakaran <i>et. al</i> (2009)
		-	×	×	-	-	-	-	Angeles (2009)
Cáscara de	Toronja	-	×	-	-	×	-	-	Torab-Mostaedi <i>et. al</i> (2013)
	Yuzu o citrus junos o naranjita japonesa	-	×	×	-	-	-	-	Minamisawa <i>et. al</i> (2004)

Recopilación, traducción y ordenamiento del Mg. Luis Rosas Angeles Villón

CONTINÚA

Continuación de la Tabla 1.

Adsorbente	Especie o Nombre común	Adsorbatos metálicos							Referenciales
		(II)					(III)	(V)	
		Cu	Cd	Pb	Zn	Ni	Cr	As	
Desechos agrícolas de la cosecha del	Té, café, cáscaras de avellana, almendras, maní, abeto rojo, maple, almendra de palma, arroz, coco, mazorcas de maíz y manzana	×	×	×	-	×	×	-	Demirbas (2008)
Fruto del	Abeto o piña cono	-	×	-	-	-	-	-	Izanloo <i>et. al</i> (2005)
Hoja de la	Palma datilera	-	-	×	-	-	-	-	Boudrahem <i>et. al</i> (2011)
	Sábila o aloe	-	×	×	-	-	-	-	Minamisawa <i>et. al</i> (2004)

Recopilación, traducción y ordenamiento del Mg. Luis Rosas Angeles Villón

Tabla 2. Adsorbentes de origen mineral para metales pesados en solución acuosa.

Adsorbente	Material de origen – Sustancia Adsorptiva	Adsorbatos metálicos						Referenciales
		(II)					(III)	
		Cu	Cd	Pb	Zn	Ni	Cr	
Arcilla	Jebel Tejra, Túnez	-	×	-	-	-	×	Ghorbel-Abid <i>et. al</i> (2010)
Cenizas de carbón	Planta de Poder de Brasov, Rumania	×	×	-	-	-	-	Visa <i>et. al</i> (2009)
	Empresa Egipcia Geos Company	×	-	-	×	-	-	Salam <i>et. al</i> (2011)
Carbón (Charcoal)	Cáscara de maní	×	-	-	×	-	-	Salam <i>et. al</i> (2011)
Carbón activado	Residuos agrícolas del café – H_3PO_4 ó $ZnCl_2$	-	×	×	-	-	-	Boudrahem, Soualah <i>et. al</i> (2011)
	Cáscara de coco – $CaCO_3$	-	×	-	×	×	-	Guijarro-Aldaco <i>et. al</i> (2011)
	Carbón bituminoso – $CaCO_3$	-	×	-	×	×	-	
	Carbón lignita – $CaCO_3$	-	×	-	×	×	-	
	Shanxi Xinhua Chemical Co. Ltd. – Ácido tánico	-	×	-	-	-	-	Liu, Chen <i>et. al</i> (2010)
	Carbón de lignina - KOH	×	-	-	-	-	-	Suhas <i>et. al</i> (2007)
Sílica gel	SiO_2 - AMPS	×	-	-	-	-	-	Wang <i>et. al</i> (2009)
Zeolita	Silicatos de Aluminio de Tochigi-Japón	-	×	×	-	-	-	Minamisawa <i>et. al</i> (2004)
	Natural de Dar el Emara Company- Egipto	×	-	-	×	-	-	Salam <i>et. al</i> (2011)
	Sintética de piedra pómez	×	-	×	×	×	×	Catalfamo <i>et. al</i> (2006)

Recopilación, traducción y ordenamiento del Mg. Luis Rosas Angeles Villón

VIII. ANEXOS

Tabla A.1. Terminología aplicada en los procesos fisico-químicos de adsorción.

Término	Definición
Adsorbato	Especie molecular gaseosa, sustancia disuelta o líquida que se adhiere o se fija por adsorción a una capa superficial extremadamente fina de una sustancia sólida.
Adsorbente	Material sólido utilizado para capturar un gas o un líquido; a menudo se emplea carbón activado con esta finalidad debido a su alta área superficial por unidad de masa. En inglés el término es adsorber.
Adsorción	Un aumento en la concentración de una sustancia disuelta en la interfase de las fases condensada y líquida debido a la acción de las fuerzas superficiales. La adsorción también puede ocurrir en la interfase de las fases condensada y gaseosa.
Adsorptiva	Sustancia que está presente en una o ambas fases que posibilitan o promueven que se produzca la adsorción
Capacidad de adsorción	Para solutos fuertemente adsorbidos de solubilidad limitada, el valor de la cantidad de sustancia adsorbida alcanzado en una solución saturada se denomina la capacidad de adsorción del adsorbente para un soluto específico; su valor también depende, en general, de la naturaleza y, en el caso de más de dos componentes, de la composición relativa del líquido.

IUPAC Compendium of Chemical Terminology - Gold Book (2012). Traducida y recopilada por el Mg. Rosas Angeles Villón

CONTINÚA

Continuación de la Tabla A.1.

Término	Definición
Carbón activado	Un material de carbono poroso, cuyo quemado ha involucrado una reacción con gases, a veces con la adición de productos químicos, como por ejemplo, $ZnCl_2$, antes, durante o después de la carbonización con el fin de aumentar sus propiedades de adsorción.
Carbón (Charcoal)	Carbón obtenido por la quema de madera, turba (peat), hulla (coal) o algún material orgánico natural.
Cenizas (Fly ash)	Partículas finamente divididas de cenizas arrastradas en los gases de combustión resultantes de la combustión de combustible.
Complejo de adsorción	Entidad constituida por el adsorbato y la porción del adsorbente por el que está delimitado
Coque	Carbón con un alto contenido de carbono en estado no grafitico. Este es producido mediante la pirólisis de la materia orgánica que ha pasado, al menos en parte, a través de un estado líquido o líquido-cristalino durante el proceso de carbonización. El coque puede contener materia mineral.

IUPAC Compendium of Chemical Terminology - Gold Book (2012). Traducida y recopilada por el Mg. Rosas Angeles Villón

CONTINÚA

Continuación de la Tabla A.1.

Término	Definición
Fisisorción o Adsorción Física	Cuando las fuerzas involucradas son las intermoleculares es decir las fuerzas de van der Waals, las responsables de la imperfección de los gases reales y de la condensación de los vapores, lo cual no implica un cambio significativo del patrón de los orbitales electrónicos de las especies involucradas
Quimisorción o Adsorción Química	Cuando se forma un enlace químico entre el adsorbato y el adsorbente en una monocapa sobre la superficie del sólido.
Sorción	Proceso en medio coloidal por el cual se adsorbe o absorbe una sustancia sobre o dentro de otra sustancia.

IUPAC Compendium of Chemical Terminology - Gold Book (2012). Traducida y recopilada por el Mg. Rosas Angeles Villón

