



Revista Colombiana de Química
ISSN: 0120-2804
ISSN: 2357-3791
rcolquim_fcbog@unal.edu.co
Universidad Nacional de Colombia
Colombia

Adsorción de Cd(II) y Pb(II) presentes en solución acuosa con hueso de nanche (*Byrsonima crassifolia*)

Espinosa-Rodríguez, Miguel Ángel; Hidalgo-Millán, Antonio; Delgado-Delgado, Raúl; Olvera-Izaguirre, Lizeth; Bernal-Jácome, Luis Armando

Adsorción de Cd(II) y Pb(II) presentes en solución acuosa con hueso de nanche (*Byrsonima crassifolia*)

Revista Colombiana de Química, vol. 49, núm. 2, 2020

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=309063462007>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional.

Adsorción de Cd(II) y Pb(II) presentes en solución acuosa con hueso de nanche (*Byrsonima crassifolia*)

Adsorption of Cd(II) and Pb(II) present in aqueous solution with nanche stone (*Byrsonima crassifolia*)

Adsorção de Cd(II) e Pb(II) presente em solução aquosa com osso nanche (*Byrsonima crassifolia*)

Miguel Ángel Espinosa-Rodríguez
Universidad Autónoma de Nayarit, México
emiguel@uan.edu.mx

Redalyc: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=309063462007>

Antonio Hidalgo-Millán
Universidad Autónoma de Nayarit, México

Raúl Delgado-Delgado
Universidad Autónoma de Nayarit, México

Lizeth Olvera-Izaguirre
Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México

Luis Armando Bernal-Jácome
Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México

Recepción: 26 Abril 2019
Aprobación: 02 Abril 2020

RESUMEN:

El hueso de nanche es un residuo agrícola con gran potencial de uso como adsorbente. Al respecto, se evaluó la capacidad de adsorción de iones Cd(II) y Pb(II), presentes en solución acuosa, utilizando este residuo. Las pruebas realizadas en este estudio fueron: la determinación del punto de carga cero (pH_{PZC}), determinación de sitios activos (método de Boehm y espectroscopía FTIR) y el desarrollo de los modelos matemáticos de Langmuir, Freundlich y Prausnitz-Radke, a través de isoterma de adsorción. Los resultados obtenidos del pH_{PZC} del hueso de nanche estuvieron en un rango ácido (6,0), mientras que la concentración de sitios ácidos y básicos fue de 0,1037 y 0,046 mol/g, respectivamente. Los espectros infrarrojos (FTIR) detectaron sitios funcionales ácidos asociados al grupo fenol, ácidos carboxílicos y lactonas. Finalmente, la capacidad de adsorción del hueso de nanche para Cd(II) y Pb(II) se incrementó con el pH y alcanzó porcentajes de remoción hasta de 84 % para Cd(II) a pH 8, y de 82% para Pb(II) a pH 5. En conclusión, el pH y la presencia de sitios funcionales ácidos fueron determinantes en la eliminación de los iones Pb(II) y Cd(II).

PALABRAS CLAVE: residuos agrícolas, metales pesados, sitios activos.

ABSTRACT:

The nanche stone is an agricultural residue that has great potential as adsorbent. Then, the adsorption capacity of Cd(II) and Pb(II) ions present in aqueous solution was evaluated, using the stone as adsorbent. The tests performed for this purpose were the determination of point of zero charge (pH_{PZC}), determination of active sites (Boehm method and FTIR spectroscopy), and the development of the mathematical models of Langmuir, Freundlich, and Prausnitz-Radke through adsorption isotherms. The results obtained from the pH_{PZC} of the nanche stone were in an acidic range (6,0), while the concentration of acid and basic sites were 0.1037 and 0.046 mol/g respectively. The infrared spectra (FTIR) detected acid functional sites associated with the phenol group, carboxylic acids, and lactones. Finally, the adsorption capacity of nanche stone to Cd(II) and Pb(II), increased with the

NOTAS DE AUTOR

emiguel@uan.edu.mx

pH, achieving percentages of removal up to 84% for Cd (II) to pH 8, and of 82% for Pb(II) to pH 5. In conclusion, the pH and the presence of acidic functional sites were decisive in the elimination of the Pb(II) and Cd(II) ions.

KEYWORDS: agricultural residues, heavy metals, active sites.

RESUMO:

O osso Nanche é um resíduo agrícola que possui grande potencial como adsorvente, neste respeito, a capacidade de adsorção de íons Cd(II) e Pb(II) presentes em solução aquosa foi avaliada, utilizando osso como adsorvente. Os testes realizados para este fim foram a determinação do ponto zero de carga (pH_{PZC}), a determinação de sites ativos (método Boehm e espectroscopia FTIR) e o desenvolvimento dos modelos matemáticos de Langmuir, Freundlich e Prausnitz-Radke através de isotermas de adsorção. Os resultados obtidos do pH_{PZC} do osso nanche foram em uma faixa ácida (6,0), enquanto a concentração de ácidos e sites básicos foram 0,1037 e 0,046 mol / g, respectivamente. Os espectros de infravermelho (FTIR) detectaram sites funcionais ácidos associados ao grupo fenol, ácidos carboxílicos e lactonas. Finalmente, a capacidade de adsorção do osso nanche para Cd(II) e Pb(II), aumentou com o pH, atingindo porcentagens de remoção de até 84% para o Cd(II) em pH 8, e 82% para Pb(II) a pH 5. Em conclusão, o pH e a presença de sites funcionais ácidos foram decisivos na eliminação dos íons Pb (II) e Cd (II).

PALAVRAS-CHAVE: resíduos agrícolas, metais pesados, sites ativos.

INTRODUCCIÓN

Las condiciones climáticas que prevalecen en regiones tropicales y subtropicales que van desde Tamaulipas, San Luis Potosí, Veracruz, Tabasco, Yucatán y Quintana Roo, en la vertiente del Golfo de México, hasta Sinaloa, Nayarit, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas, en la vertiente del Pacífico, hacen posible la producción de especies como la changunga o nanche (*Byrsonima crassifolia*) [1]. Se han reportado importantes áreas cultivadas de esta especie a lo largo de la costa de Nayarit, en municipios con vegetación de sabana como Acaponeta, Compostela, Santiago Ixcuintla, Rosamorada, Ruiz y San Blas [2]. De acuerdo con el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), al cierre agrícola de 2018, de los once estados que producen nanche en México, Guerrero es el principal productor, con 3876,2 toneladas; seguido por Nayarit y Michoacán, con 901,6 y 885,2 toneladas, respectivamente [3].

El fruto de nanche es una drupa globosa amarillenta, ligeramente anaranjada, con abundante pulpa agrídulce que rodea el endocarpio y contiene de una a tres semillas blancas, rodeadas por una testa delgada. El exocarpio es delgado, de color amarillo, verde o rojizo cuando el fruto está maduro. El mesocarpio (parte comestible) es de consistencia pastosa. El endocarpio es redondeado u oval, rígido y reticulado. La semilla encerrada en el endocarpio (duro y leñoso) es ovoide o subglobosa, arrugada, gruesa o ligeramente comprimida. La testa de la semilla es de color café claro; es lisa, lustrosa, membranosa y muy delgada. El embrión es curvo, enrollado, de color amarillo verdoso y ocupa la cavidad de la semilla [4].

Tanto el árbol como el fruto de *Byrsonima crassifolia* han sido utilizados como alimento, planta medicinal y ornamental, combustible, curtiente, colorante, forrajero, maderable y también en la reforestación [5-7]. Sin embargo, los residuos de su fruto (hueso del nanche) no han sido aprovechados, a pesar de que poseen gran potencial como adsorbentes de metales pesados, contenidos en aguas residuales industriales.

En los últimos años, los residuos agrícolas han sido utilizados en procesos de adsorción para la remoción de metales pesados. Por ejemplo, la cáscara de naranja se ha usado en la remoción de Pb(II) [8]; las cáscaras de coco y cacahuete, las semillas de almendra, la cáscara de nuez y la semilla de tamarindo se usan en la remoción de Cr(VI) [9]. En la remoción de Pb(II), se usan residuos de hortalizas [10]. En la remoción de Cd(II) y Pb(II), residuos de café [11]. En la remoción de Cu(II), cáscara de maní y nuez, semillas de ciruela, corteza de eucalipto, hueso de aceituna, hueso de durazno y aserrín de pino [12]. La cáscara de maní se usa en la remoción de Cu(II) y Cr(III) [13]. También, se usan residuos de maíz en la remoción de Cd(II) y Pb(II) [14]. La vaina de cacao, el tallo de plátano, las cáscaras de arroz y de coco, la corteza de papaya y melón, residuos de soya, las semillas de uva y las cáscaras de nuez y moringa, entre otras, se usan también en la remoción de Pb(II) [15].

Ahora bien, la adsorción es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapados o retenidos en la superficie de un material. Es decir, es un proceso en el que un contaminante soluble (adsorbato) es eliminado del agua mediante el contacto con una superficie sólida (adsorbente) [14,15].

Por su parte, los metales pesados contaminantes, como el cadmio y plomo, pueden encontrarse en el ambiente, especialmente en el agua, como resultado de actividades humanas. Su eliminación resulta de interés, pues se trata de elementos potencialmente tóxicos, debido a que el cadmio y el plomo pueden dañar el sistema nervioso, el hígado y los huesos; sin contar con que también pueden interferir con el funcionamiento normal de varias metaloenzimas [14].

En este contexto, el objetivo de esta investigación fue determinar la capacidad de adsorción de Cd(II) y Pb (II), presentes en solución acuosa, usando el hueso de *Byrsonima crassifolia* como precursor. La capacidad de adsorción se analizó en función del pH y la concentración en el equilibrio de los iones Cd(II) y Pb(II). Finalmente, la contribución de este artículo se enfoca en el aprovechamiento de los residuos agrícolas para los problemas de contaminación del agua por metales pesados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Preparación del hueso de nanche

Se lavó el hueso de nanche con una solución 0,01 M de ácido clorhídrico (HCl), para eliminar toda la pulpa o mesocarpio presentes en la muestra. Posteriormente, se lavó con agua destilada en repetidas ocasiones para eliminar la presencia de HCl y se transfirió a un horno Fisher Scientific., a 60 °C, hasta que la muestra se secó por completo. El material seco se molió manualmente, hasta obtener partículas con diámetros de malla número 14 del sistema USA Standard ASTM, con las cuales se realizaron las pruebas de adsorción.

Determinación del punto de carga cero

El proceso para determinar el punto de carga cero (pH_{PZC}) fue el siguiente: se preparó agua desionizada, calentándola hasta alcanzar la temperatura de ebullición, y se mantuvo así durante 20 min para asegurar la eliminación del dióxido de carbono (CO_2) disuelto en el agua. Posteriormente, en un matraz Erlenmeyer, se adicionaron 20 mL de agua desionizada fría y 1,0 g de hueso de nanche. El matraz se tapó con un tapón de hule y se dejó en agitación constante durante 48 h, a 25 °C, hasta que alcanzó el equilibrio. Transcurrido este tiempo, se midió el pH de la solución, el cual corresponde al pH_{PZC} [16,17]. La prueba se realizó por triplicado.

Sitios activos

La cantidad de sitios activos en el hueso de nanche (HN) se determinó a través del método de titulación ácido-base propuesto por Boehm [18-20]. Se pesaron 0,3 g de HN y se mezclaron con 20 mL de HCl y NaOH 1,0 M, por separado. Las soluciones se agitaron durante 120 h, a 25 °C, hasta que alcanzaron el equilibrio. Terminado el tiempo de agitación, cada muestra se filtró y se tomó todo el volumen filtrado para su neutralización. Los sitios ácidos se neutralizaron con NaOH 1,0 M y los sitios básicos con HCl 1,0 M. La prueba se realizó también por triplicado.

Determinación de sitios funcionales (espectroscopía FTIR)

Para determinar los sitios funcionales en el hueso de nanche, se empleó la técnica de espectroscopía infrarroja (IR). Se obtuvieron espectros con un espectrómetro infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) marca Thermo Scientific, modelo Nicolet iS10 Smart iTR. Este equipo optimiza su radio de espectro en la región media de infrarrojo ($4000-400\text{ cm}^{-1}$), utilizando el método de reflectancia atenuada [21]. Para llevar a cabo las mediciones, la muestra del HN en polvo se dispuso directamente sobre el cristal de detección del equipo [22,23].

Isotermas de equilibrio de adsorción

Se prepararon soluciones patrón de plomo y cadmio, con una concentración inicial de 1000 mg/L. Las soluciones fueron preparadas con nitrato de plomo [$Pb(NO_3)_2$], al 99% de pureza, marca Merck y nitrato de

cadmio tetrahidratado $[\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$, de al menos 98,5% de pureza, marca Merck; ambas aforadas en un litro de agua desionizada.

A partir de esta solución, se elaboraron diluciones a diferentes concentraciones (10, 30, 50 y 100 mg/L). Posteriormente, se adicionaron 50 mL de las soluciones con diferentes concentraciones de Pb(II) y Cd(II), en frascos de 100 mL. Luego, se agregó 1,0 g de HN (adsorbente) a cada solución. Las mezclas con plomo se ajustaron a pH 3, 4 y 5 y las de cadmio a pH 7 y 8. Las mezclas se mantuvieron a 25 °C durante 7 días hasta que se alcanzó el equilibrio.

El pH de todas las mezclas se ajustó diariamente con NaOH y HNO₃ 0,1 N, según el caso. Posteriormente, la mezcla se filtró para remover el adsorbente y se determinó la concentración de Pb(II) y Cd(II) remanente por absorción atómica [24,25] en un espectrómetro modelo iCAP 7000 ICP-OES, marca Thermo Scientific.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización química

En la Tabla 1, se presentan los resultados promedio de la caracterización química del HN.

TABLA 1.

Precursor	Sitios ácidos (mol/g)	Sitios básicos (mol/g)	pH _{PZC}
Hueso de nanche	0,1037 (0,007)	0,0460 (0,0009)	6,0

Caracterización química del precursor.

Los resultados de caracterización química (Tabla 1) indican la posible existencia de grupos funcionales ácidos en la superficie del precursor, lo cual hace que las partículas en la solución presenten una carga eléctrica que influye en el fenómeno de adsorción. Esto, a su vez, se cuantifica aquí con el pH_{PZC}. De esta manera, cuanto mayor es la concentración de grupos ácidos, más disminuye el pH_{PZC} [26]. El incremento de la adsorción del ion Cd(II), conforme aumenta el pH, es atribuido probablemente a la hidrólisis del cadmio. Generalmente, en solución acuosa, este elemento se presenta como Cd(II), Cd(OH)⁺, Cd(OH)₂, Cd(OH)₃⁻ y Cd(OH)₄²⁻, a diferentes valores de pH [27]. A pH < 5,8, existe competencia entre los iones H⁺ y el ion Cd(II) por los sitios activos y, en estos rangos, se presenta la menor adsorción [24,27,28]. Además, a pH del medio menor al pH_{PZC}, el número de cargas positivas en la superficie del HN se incrementa, lo cual no favorece la adsorción del Cd(II), debido a la repulsión electrostática [27]. A valores de pH del medio superiores al pH_{PZC}, la menor concentración del ion H⁺ conduce a una mayor adsorción del Cd(II) [27], de ahí que se optara por evaluar la adsorción del Cd(II) a pH de 7 y 8.

Por otra parte, el diagrama de especiación del plomo obtenido con la sal de Pb(NO₃)₂ [17], mostró el rango de pH con el que se iba a trabajar. En la Figura 1, se presenta el diagrama de especiación en el cual se observa que, a pH de 5,5, predomina el ion Pb²⁺; pero, a pH de 5, empieza a formarse el precipitado de hidróxido de plomo [Pb(OH)₂(s)] y la especie soluble Pb(OH)⁺. Con pH entre 12 y 13, las especies más comunes de hidróxido son el Pb(OH)₄²⁻ y el Pb(OH)₃⁻. Con base en este diagrama de especiación, se optó por analizar la remoción del ion Pb(II) a pH de 3, 4 y 5.

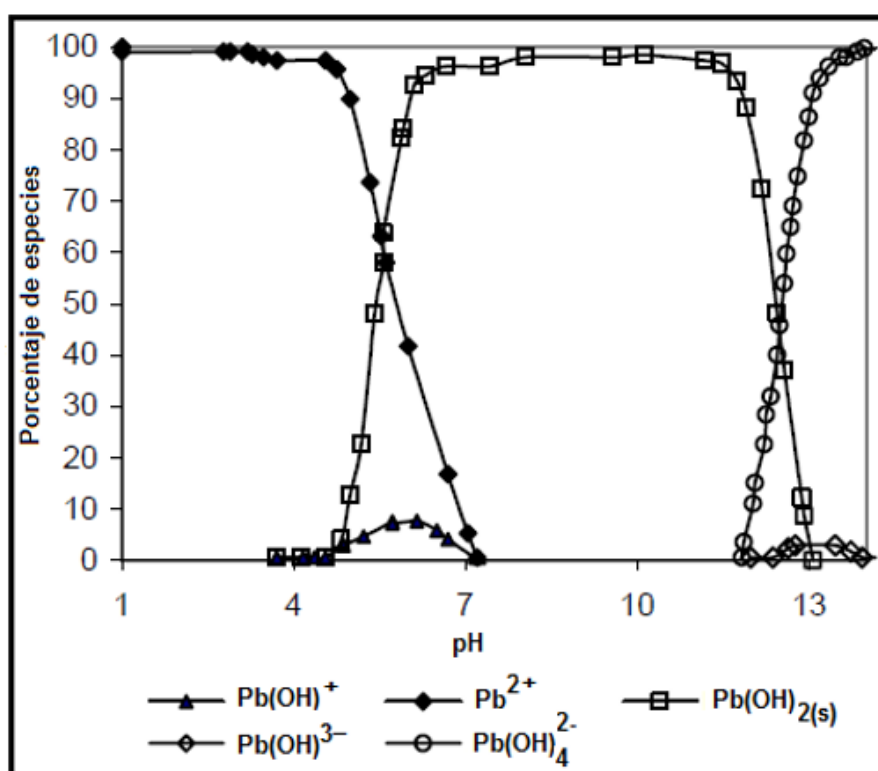


FIGURA 1.
Especies del plomo en función del pH [16].

En cuanto a la Figura 1, a pH menor de 5,5, predomina el ion Pb(II), lo cual indica un $\text{pH} < \text{pH}_{\text{PZC}}$. Se asume, entonces, que los iones H^+ son liberados de la superficie del sólido, mientras se cargan negativamente. Esto, a su vez, favorece la adsorción del ion plomo. Por otra parte, a $\text{pH} > \text{pH}_{\text{PZC}}$, las especies hidroxiladas afectan el proceso de adsorción, particularmente, el $\text{Pb(OH)}_{2(s)}$, que empieza a precipitarse sobre la superficie del adsorbente, lo cual conduce a un decaimiento en la adsorción del ion plomo. Estos resultados son consistentes con los de trabajos similares [15,17,29,30].

Caracterización FTIR

En la Figura 2 se presenta el espectro IR obtenido para el HN. Se observan picos característicos del grupo funcional ácido carboxílico, los cuales secuestran metales pesados [31]. Se notan tres bandas de interés: una ubicada entre los 3200 y 3400 cm^{-1} , asociada al grupo fenol (O-H); otra entre los 2800 y los 3100 cm^{-1} , vinculada a grupos de ácidos carboxílicos (R-COOH); y una tercera entre los 1600 y los 1800 cm^{-1} , relacionada con grupos de lactonas-anhídrido carboxilo (C=O) [10,23,32-37].

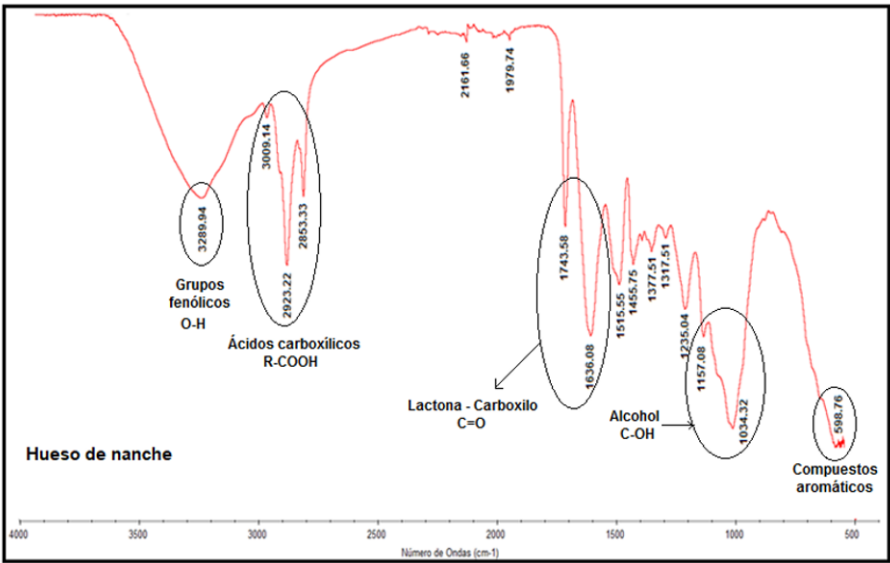


FIGURA 2.
Espectro IR del hueso de nanche.

Isotermas de equilibrio de adsorción para Pb(II)

En la Tabla 2, se desglosan los resultados obtenidos de la masa adsorbida del ion Pb(II) por cada gramo de HN, representado a través de los modelos de Langmuir, Freundlich y Prausnitz-Radke.

TABLA 2.
Resultados de modelos matemáticos para Pb(II) a pH 3, 4 y 5 para el hueso de nanche.

pH	*Ce (mg/l)	**q _{exp} (mg/g)	q _{Langmuir} (mg/g)	% desv.	q _{Freundlich} (mg/g)	% desv.	q _{Prausnitz} (mg/g)	% desv.
3	8,80	1,19	1,00	18,73	0,75	57,17	1,16	1,98
	18,90	1,64	1,91	14,24	1,62	0,75	1,85	11,64
	21,80	2,25	2,13	5,68	1,87	20,27	2,05	10,13
	43,80	3,48	3,46	0,60	3,76	7,47	3,49	0,42
	11,10	0,79	1,48	46,37	1,47	46,09	0,79	0,11
4	15,90	2,15	2,11	1,54	2,11	1,90	2,13	0,71
	26,50	3,46	3,51	1,31	3,51	1,33	3,61	4,10
	33,90	4,73	4,48	5,63	4,49	5,33	4,63	2,36
	2,40	1,23	1,97	37,53	1,95	37,14	1,93	36,09
5	4,80	4,17	3,62	15,29	3,49	19,63	3,44	21,23
	9,70	6,44	6,35	1,44	6,31	2,12	6,31	2,11
	11,45	7,00	7,15	2,20	7,25	3,44	7,28	3,87

Ce = Concentración en el equilibrio.

**q_{exp} = masa de plomo adsorbida experimentalmente.

Los resultados (Tabla 2) indican un mejor ajuste de datos a todos los pH en los modelos de Langmuir, según el porcentaje de desviación estándar. A pH 5, los modelos de Freundlich y Prausnitz-Radke también se ajustan adecuadamente. Estos resultados están representados en las Figuras 3-5, donde se grafica la concentración en

el equilibrio (C_e), contra la masa de plomo adsorbido (q) a pH 3, 4 y 5, respectivamente, con los 3 modelos descritos en la Tabla 2.

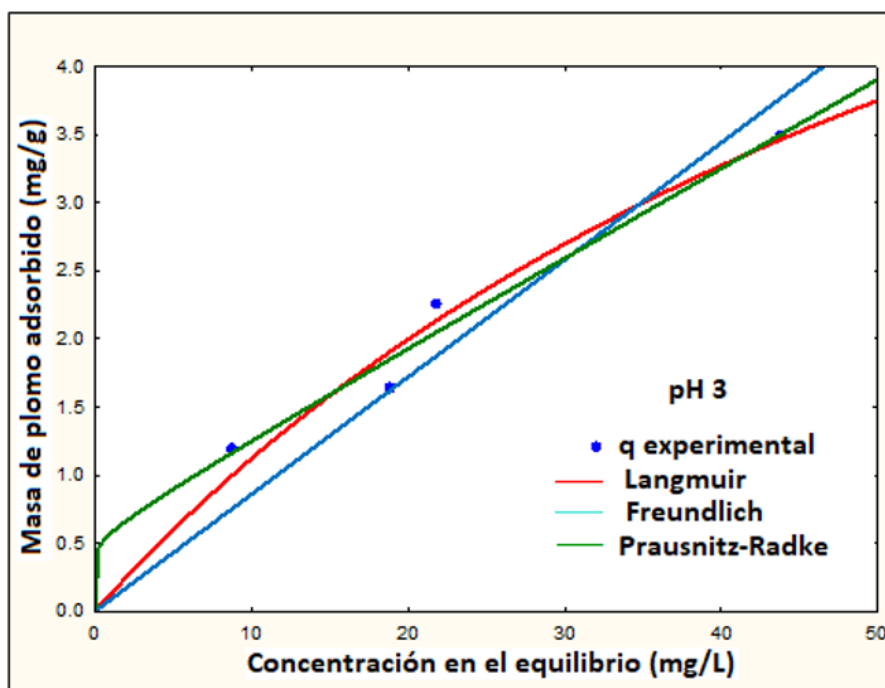


FIGURA 3.

Isotermas de adsorción de Pb(II) con el hueso de nanche a pH 3.

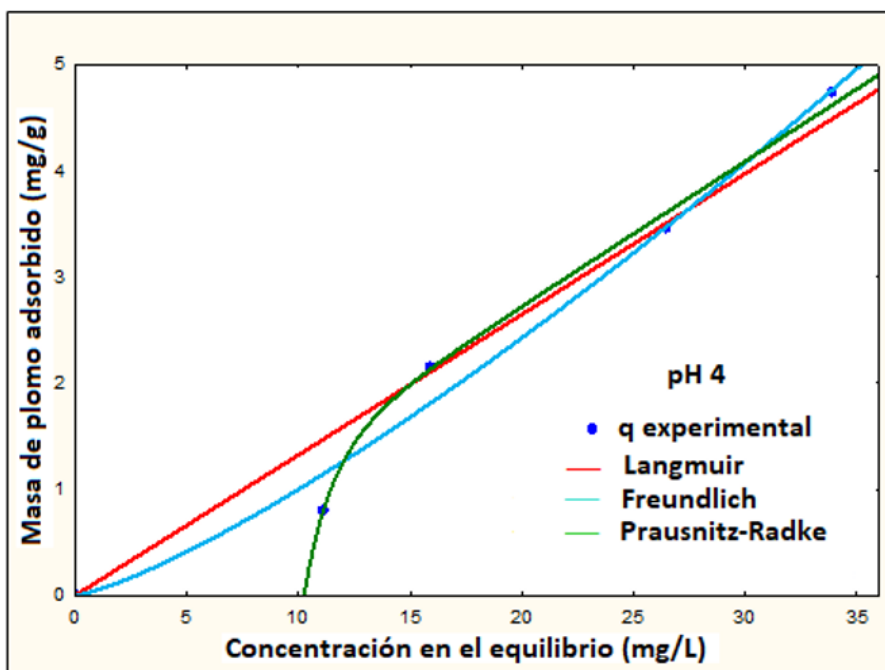


FIGURA 4.

Isotermas de adsorción de Pb(II) con el hueso de nanche a pH 4.

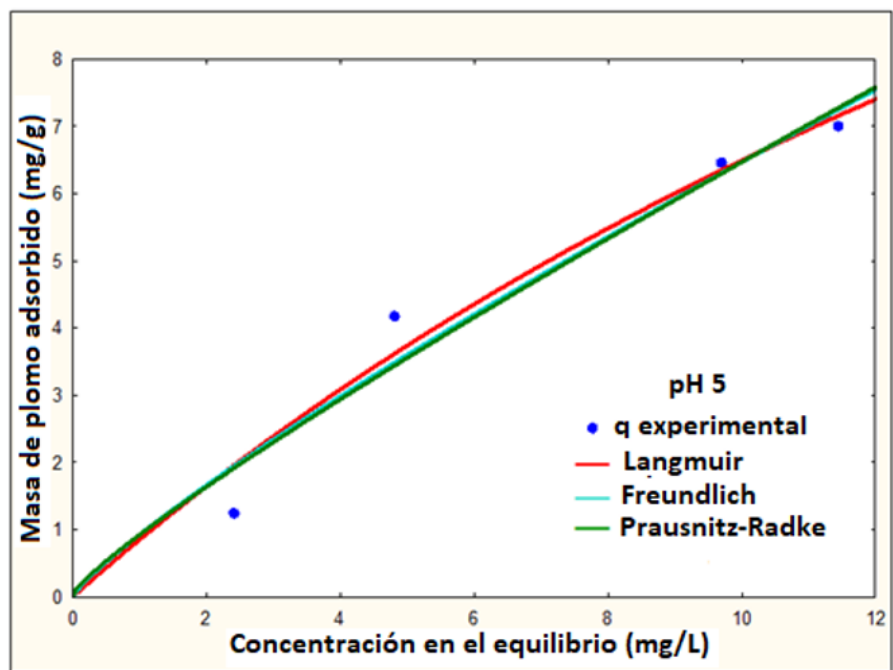


FIGURA 5.
Isotermas de adsorción de Pb(II) con el hueso de nanche a pH 5.

De acuerdo con lo que muestran las Figuras 3-5, es claro que, a mayor pH, la masa de plomo adsorbida aumenta; con mejores eficiencias de remoción a pH 5. En los modelos utilizados, las isotermas de Langmuir son las que mejor se ajustaron a todos los pH. En este contexto, considerando el modelo de Langmuir, tenemos que, por ejemplo, para una concentración en el equilibrio de 12 mg/L a pH 3, la masa de Pb(II) adsorbida por gramo de precursor (HN) fue de 1,3 mg/g; a pH 4, fue de 1,7 mg/g; mientras que para pH 5, aumentó a 7,4 mg/g. El máximo porcentaje de remoción de Pb(II) alcanzado fue 82% a pH 5. En la Tabla 3, se presentan resultados de investigación referente a la máxima capacidad de adsorción ($q_{\text{máx}}$) del ion Pb(II) en solución acuosa con residuos agrícolas.

TABLA 3.

Adsorbente	$q_{\text{máx}}$ (mg/g)	Referencia
Cáscara de vaina de cacao Semillas	4,83 3,66	
de Jatropha curcas L.	8,08	
Cáscara de almendra	0,0023	38 30 39
Hueso de durazno	0,0013	39 39 40
Hueso de albaricoque	1,90	41 42 43
Hueso de mango Hueso	3,455	
de oliva Cáscara de	1,78 5,43	
avellana Cáscara de		
almendra		
Hueso de nanche	7,15	Este estudio

Comparación de $q_{\text{máx}}$ de Pb(II) con diferentes residuos agrícolas.

El $q_{\text{máx}}$ de Pb(II) obtenido en este trabajo de investigación para el HN (Tabla 3), está dentro del rango de los obtenidos por otros investigadores con otros residuos agrícolas; inclusive, en algunos casos, con mayor

capacidad de adsorción. Las diferencias en la capacidad de adsorción se deben a diferentes propiedades de cada adsorbente, como su estructura, los grupos funcionales presentes y el área superficial.

Isotermas de equilibrio de adsorción para Cd(II)

En la Tabla 4, se presentan los resultados obtenidos de la masa adsorbida del ion Cd(II) por cada gramo de HN, representado a través de los modelos de Langmuir, Freundlich y Prausnitz-Radke.

TABLA 4.

pH	*C _e (mg/l)	**q _{exp} (mg/g)	q _{Langmuir} (mg/g)	% desv.	q _{Freundlich} (mg/g)	% desv.	q _{Prausnitz} (mg/g)	% desv.
7	3,3	0,44	0,37	18,4	0,43	3,94	0,3	46,84
	13,1	0,84	0,99	15,14	0,95	11,52	0,7	20,64
	20,0	1,44	1,23	17,06	1,22	18,1	0,88	62,56
	24,0	1,23	1,33	7,59	1,36	9,34	0,98	25,83
	3,0	0,93	1,02	9,51	1,25	26,09	1,18	21,97
8	14,6	3,81	4,33	12,17	4,25	10,42	4,29	11,35
	18,6	5,84	5,28	10,64	5,11	14,17	5,18	12,83
	43,1	9,67	9,73	0,61	9,81	1,47	9,72	0,55

Resultados de modelos matemáticos para Cd(II) a pH 7 y 8 para el hueso de nanche.

C_e = Concentración en el equilibrio.

**q_{exp} = masa de cadmio adsorbido experimentalmente.

Los resultados indican un mejor ajuste de datos a los pH indicados en los modelos de Langmuir y Freundlich, según el porcentaje de desviación estándar (Tabla 4). A pH 8, el modelo de Prausnitz también se ajusta muy bien a los datos. Estos resultados están representados en la Figura 6 y 7, donde se grafica la concentración en el equilibrio (C_e), frente a la masa de cadmio adsorbido (q) a pH 7 y pH 8, respectivamente, con los 3 modelos descritos en la Tabla 4.

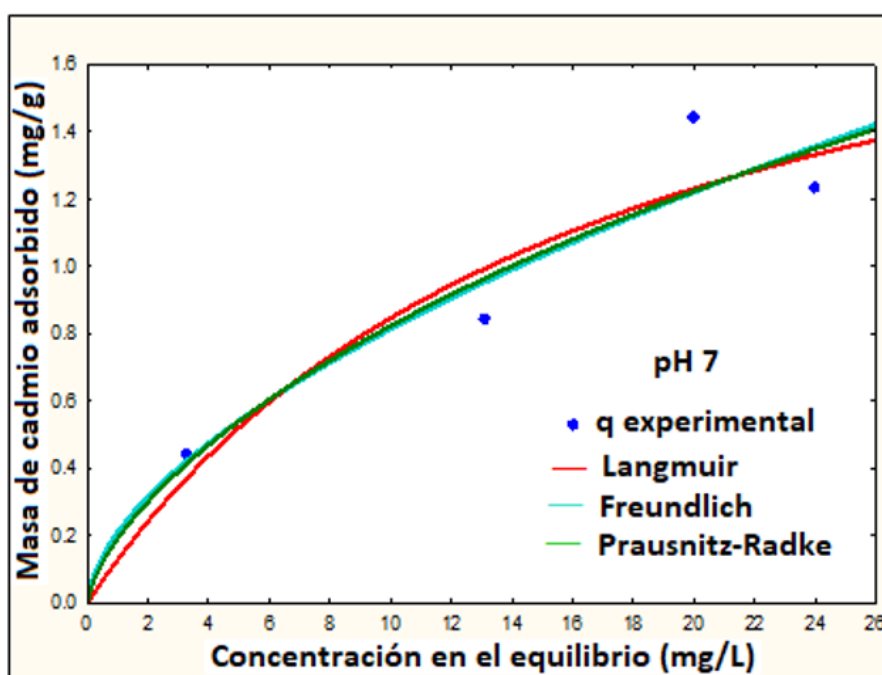


FIGURA 6.
Isotermas de adsorción de Cd(II) con el hueso de nanche a pH 7.

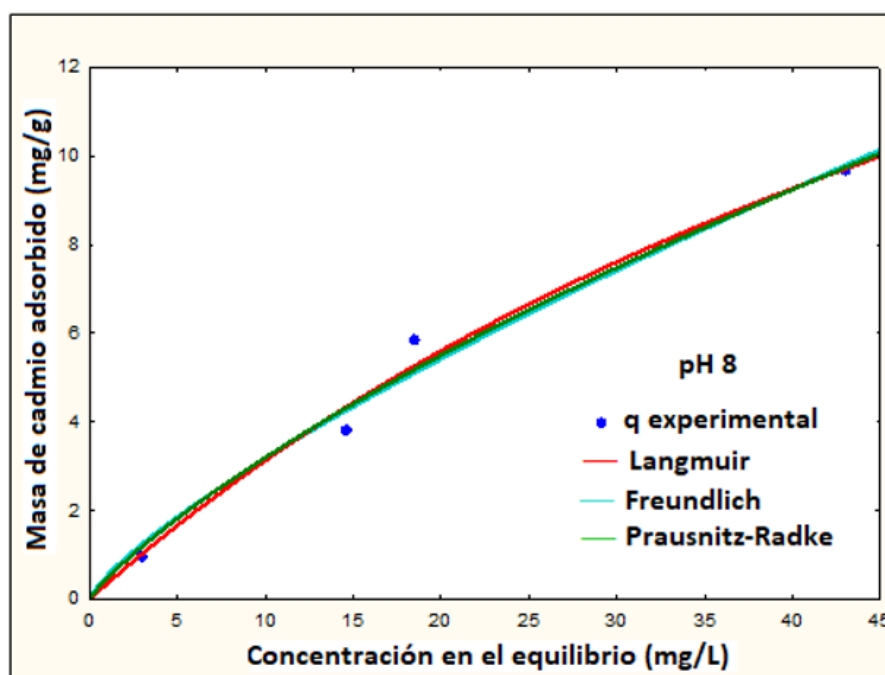


FIGURA 7.
Isotermas de adsorción de Cd(II) con el hueso de nanche a pH 8.

Según se deduce de las Figuras 6 y 7, cuanto mayor es el pH, mayor es la masa adsorbida de cadmio y las mejores eficiencias de remoción ocurren a pH 8. En el caso de los modelos utilizados, las isotermas de Langmuir son las que mejor se ajustaron a todos los pH. En este contexto, considerando el modelo de Langmuir, tenemos, por ejemplo, para una concentración en equilibrio de 20 mg/L a pH 7, la masa de Cd(II) adsorbida por gramo de precursor (HN) fue de 1,2 mg/g; mientras que para pH 8, aumentó a 5,6 mg/g. El máximo porcentaje de remoción de Cd(II) alcanzado fue de 84%, a pH 8.

La Tabla 5 presenta resultados de investigaciones referentes a la máxima capacidad de adsorción ($q_{\text{máx}}$) del ion Cd(II) en solución acuosa con residuos agrícolas.

TABLA 5.

Adsorbente	$q_{\text{máx}}$ (mg/g)	Referencia
Cáscara de vaina de cacao	4,42	
Semillas de uva	3,99	
Cáscara de nuez	1,50	
Granos de café	4,48	38 44 45
Fibra de palma	6,81	46 22 25
Mazorca de maíz	12,0	47 24 28
Cáscara de plátano	5,71	
Bagazo de caña	6,79	
Hueso de oliva	0,90	
Hueso de nanche	9,73	Este estudio

Comparación de $q_{\text{máx}}$ de Cd (II) con diferentes residuos agrícolas

Para el HN, de acuerdo con la Tabla 5, el $q_{\text{máx}}$ de Cd(II) obtenido en esta investigación está dentro del rango de los obtenidos por otros investigadores con otros residuos agrícolas, presentando en algunos casos mayor capacidad de adsorción. Las diferencias, de nuevo, se deben a las propiedades de cada adsorbente, tales como la estructura, grupos funcionales presentes y el área superficial.

CONCLUSIONES

La mayor concentración de sitios ácidos (0,1037 mol/g) encontrados en el HN, con respecto a la concentración de sitios básicos (0,046 mol/g), indica la existencia de grupos funcionales ácidos, lo cual favoreció la adsorción de los cationes de Cd(II) y Pb(II). Lo anterior se observó en la caracterización FTIR, donde se detectaron grupos funcionales como, R-COOH, O-H y C=O, los cuales promueven la adsorción de metales pesados.

Por otra parte, los resultados en cuanto a la capacidad de adsorción ($q_{\text{máx}}$) indican un aumento de la eficiencia de remoción de Cd(II) y Pb(II) conforme se incrementa el pH. En el caso de Cd(II), se alcanzó un porcentaje de remoción de 84% a pH 8, con $q_{\text{máx}}$ de 9,73 mg/g; mientras que para el Pb(II) se alcanzó un porcentaje de remoción de 82% a pH 5, con $q_{\text{máx}}$ de 7,15 mg/g.

Los datos experimentales se representaron con los modelos de Langmuir, Freundlich y Prausnitz-Radke. El modelo de Langmuir es el que mejor se ajusta a los diferentes pH. Finalmente, se tiene que el hueso de nanche (nuevo precursor) representa una opción viable y económica para la adsorción de los iones Cd(II) y Pb(II) presentes en solución acuosa.

REFERENCIAS

- [1] R. Niembro, I. Morato y J. Cuevas, "Catálogo de frutos y semillas de árboles y arbustos de valor actual y potencial para el desarrollo forestal de Veracruz y Puebla" [CD-Rom]. Instituto de Ecología, A. C. Xalapa, Veracruz, México, 2004.
- [2] R. Medina, S. Salazar y J. Gómez, "Fruit quality indices in eight nance (*Byrsonima crassifolia* L. H.B.K.) selections", *HortScience*, vol. 39, n° 5, pp. 1070-1073, 2004.
- [3] Gobierno de México, "Datos abiertos. Estadística de producción agrícola", 2018. http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos_a.php

- [4] A. Guzmán, E. Cruz y C. A. Miranda, "Germinación de semillas de *Byrsonima crassifolia* (L.) Kunth", *Rev. Mex. Cien. For.*, vol. 4, n° 20, pp. 82-89, 2013.
- [5] A. Caballero, G. Vela, J. Pérez, R. Escobar y J. Ballinas, "Uso del nanche [*Byrsonima crassifolia* (L.) H.B.K.] en gelatina artesanal para niños", *Etnobiología*, vol. 10, n° 2, pp. 50-55, 2012.
- [6] A. Chávez, J. Ledezma, E. Mendoza, M. Calvo, M. Castro, A. Ávila, C. Sánchez, F. Pérez y M. Muñoz, "Tablas de uso práctico de los alimentos de mayor consumo", México: Mc. Graw Hill, 2014.
- [7] E. Martínez, J. Santiaguillo y J. Cuevas, "Principales usos del nanche [*Byrsonima crassifolia* (L.) H.B.K.]", Chapingo: Universidad Autónoma de Chapingo, 2008.
- [8] N. Tapia, J. Muñoz, F. Torres y A. Yarango, "Biosorción de Pb(II) por cáscara de naranja *Citrus cinesis*, modificada", *Rev. Per. Quím. Ing. Quím.*, vol. 5, n° 2, pp. 39-44, 2003.
- [9] G. Agarwal, H. Bhuptawat y S. Chaudhari, "Biosorption of aqueous chromium (VI) by tamarindus indica seeds", *Bior. Technol.*, vol. 97, pp. 949-956, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.04.030>
- [10] M. Hashem, "Adsorption of lead ions from aqueous solution by okra wastes", *Int. J. Phys. Sci.*, vol. 2, n° 7, pp. 178-184, 2007.
- [11] M. Pacheco, J. Pimentel, W. Roque, "Cinética de la bioadsorción de iones de cadmio (II) y plomo (II) de soluciones acuosas por biomasa residual de café (*Coffea arabica* L.)", *Rev. Soc. Quím. Perú*, vol. 76, n° 3, pp. 279-292, 2010.
- [12] H. Hansen, F. Arancibia y C. Gutiérrez, "Adsorption of copper onto agricultura waste materials", *J. Haz. Mat.*, vol. 180, pp. 442-448, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.050>
- [13] A. Witek, R. Szafran y S. Modelski, "Biosorption of heavy metals from aqueous solutions onto peanut shell as a low cost biosorbent", *Desalination*, vol. 265, pp. 126-134, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.07.042>
- [14] G. García, M. Olguín, A. Colín y E. Romero, "Effect of the pH and temperature on the biosorption of lead (II) and cadmium (II) by sodium-modified stalk sponge of *Zeamays*", *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 19, pp. 177-185, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-011-0537-x>
- [15] P. Emenike, D. Omole, B. U. Ngene e I. Tenebe, "Potentiality of agricultural adsorbent for the sequestering of metal ions from wastewater", *Global J. of Environ. Sci. Manage.*, vol. 2, n° 4, pp. 411-442, 2016. DOI: <https://doi.org/10.22034/gjesm.2016.02.04.010>
- [16] F. Amaringo y A. Hormaza, "Determinación del punto de carga cero y punto isoeléctrico de dos residuos agrícolas y su aplicación en la remoción de colorantes", *Rev. Inv. Agr. Amb.*, vol. 4, n° 4, pp. 27-36, 2013.
- [17] L. Giraldo y J. Moreno, "Pb(II) adsorption from aqueous solutions on activated carbons obtained from lignocellulosic residues", *Braz. J. Chem. Eng.*, vol. 25, n° 1, pp. 143-151, 2008.
- [18] S. Goertzen, K. Thériault, A. Oickle, A. Tarasuk y H. Andreas, "Standardization of the Boehm titration. Part I. CO₂ expulsion and endpoint determination", *Carbon*, vol. 48, pp. 1252-1261, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2009.11.050>
- [19] P. Rodríguez, L. Giraldo y J. Moreno, "Oxidación de la superficie de carbón activado mediante HNO₃ y H₂O₂: efecto sobre la remoción de Ni(II) en solución acuosa", *Rev. Colomb. Quím.*, vol. 40, n° 3, pp. 349-364, 2011.
- [20] K. Peña, L. Giraldo y J. Moreno, "Preparación de carbón activado a partir de cascara de naranja por activación química. Caracterización física y química", *Rev. Colomb. Quím.*, vol. 41, n° 2, pp. 311-323, 2012.
- [21] Thermo Fisher Scientific Inc. Product specifications, Nicolet iS10 FT-IR Spectrometer, 2008. <http://www.unh.edu/research/sites/unh.edu.research/files/images/uic/iS10FTIR.pdf>
- [22] A. Boudaoud, M. Djedid, M. Benalia, A. Chiffa, N. Bouzar y H. Elmsellem, "Removal of nickel (II) and cadmium (II) ions from wastewater by palm fibers", *Sci. Stud. Res.*, vol. 18, n° 4, pp. 391-406, 2017.
- [23] L. Mouni, L. Belkhir, M. Tafer, F. Zougaghe y Y. Kadmi, "Studies on the removal of Pb(II) from wastewater by activated carbon developed from *Apricot stone* activated with sulphuric acid", *Mor. J. Chem.*, vol. 2, n° 5, pp. 452-456, 2014.
- [24] S. Ibrahim, M. Hanafiah y M. Yahya, "Removal of cadmium from aqueous solutions by adsorption onto sugarcane bagasse", *J. Agric. Environ. Sci.*, vol. 1, n° 3, pp. 179-184, 2006.

- [25] I. Abdelfattah, F. El Sayed y A. Almedolab, "Removal of heavy metals from wastewater using corn cob", *Res. J. Pharm., Biol. Chem. Sci.*, vol. 7, n° 2, pp. 239-248, 2016.
- [26] J. Cortés, L. Giraldo, A. García, C. García y J. Moreno, "Oxidación de un carbón activado comercial y caracterización del contenido de grupos ácidos superficiales", *Rev. Colomb. Quím.*, vol. 37, n° 1, pp. 55-65, 2008.
- [27] S. Sobhanardakani y R. Zandipak, "Adsorption of Ni(II) and Cd(II) from aqueous solutions using modified rice husk", *Iran. J. Health Sci.*, vol. 3, n° 1, pp. 1-9, 2015.
- [28] G. Blázquez, F. Heráinz, M. Calero y L. Ruiz, "Removal of cadmium ions with olive stones: the effect of some parameters", *Process Biochem.*, vol. 40, pp. 2649-2654, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.11.007>
- [29] J. Singh, A. Ali y V. Prakash, "Removal of lead (II) from synthetic and batteries wastewater using agricultural residues in batch/column mode", *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 11, pp. 1759-1770, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0326-9>
- [30] B. Shi, W. Zuo, J. Zhang, H. Tong y J. Zhao, "Removal of lead (II) ions from aqueous solution using *Jatropha curcas* L. seed husk ash as a biosorbent", *J. Environ. Qual.*, vol. 45, pp. 984-992, 2016. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq2014.12.0533>
- [31] H. Boehm, "Surface oxides on carbon and their analysis: a critical assessment", *Carbon*, vol. 40, n° 2, pp. 145-149, 2002.
- [32] J. Figueredo, M. Pereira, M. Freitas y J. Órfao, "Modification of the surface chemistry of activated carbons", *Carbon*, vol. 37, n° 9, pp. 1379-1389, 1999.
- [33] T. Ros, A. van Dillen, J. Geus y D. Koningsberger, "Surface oxidation of carbon nanofibres", *Chem. Eur. J.*, vol. 8, n° 5, pp. 1151-1162, 2002.
- [34] M. Momcilović, M. Purenović, A. Bojić, A. Zarubica y M. Randelović, "Removal lead (II) ions from aqueous solutions by adsorption onto pine cone activated carbon", *Desalination*, vol. 276, n° 1-3 pp. 53-59, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.03.013>
- [35] I. Ozdemir, M. Sahin, R. Orhan y M. Erdem, "Preparation and characterization of activated carbon from grape stalk by zinc chloride activation", *Fuel Process. Technol.*, vol. 125, pp. 200-206, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.04.002>
- [36] G. Sharaf El Deen, "Sorption of Cu(II), Zn(II) and Ni(II) from aqueous solution using activated carbon prepared from olive stone waste", *Adv. Environ. Technol.*, vol. 3, pp. 147-161, 2015.
- [37] S. Andrade, C. Veloso, R. Fontan, R. Bonomo, L. Santos, M. Brito y G. Diniz, "Chemical activated carbón from coconut (Cocos nucifera) endocarp waste and its application in the adsorption of b-lactoglobulin protein", *Rev. Mex. Ing. Quím.*, vol. 17, n° 2, pp. 463-475, 2018. DOI: <https://doi.org/10.24275/10.24275/uam/izt/dcbi/revmexingquim/2018v17n2/Andrade>
- [38] A. Obike, J. Igwe, C. Emeruwa y K. Uwakwe, "Equilibrium and kinetic studies of Cu(II), Cd(II), Pb(II) and Fe(II): Adsorption from aqueous solution using cocoa (*Theobroma cacao*) pod husk", *J. Appl. Sci. Environ. Manage.*, vol. 22, n° 2, pp. 182-190, 2018. DOI: <https://doi.org/10.4314/jasem.v22i2.5>
- [39] C. Saka, Ö. Sahin y M. Masuk, "Applications on agricultural and forest waste adsorbents for the removal of lead(II) from contaminated waters", *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 9, pp. 379-394, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-012-0041-y>
- [40] B. Olu Owolabi, O. Oputu, K. Adebawale, O. Ogunsolu y O. Olujimi, "Biosorption of Cd²⁺ and Pb²⁺ ions onto mango Stone and cocoa pod waste: Kinetic and equilibrium studies", *Sci. Res. Essays*, vol. 7, n° 15, pp. 1614-1629, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5897/SRE11.2248>
- [41] M. Martín, I. Rodríguez, G. Blázquez y M. Calero, "Factorial experimental design for optimizing the removal conditions of lead ions from aqueous solutions by three wastes of the olive-oil production", *Desalination*, vol. 278, pp. 132-140, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.05.016>
- [42] K. Conrad y H. Bruun, "Sorption of zinc and lead on coir", *Biores. Technol.*, vol. 98, pp. 89-97, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.11.018>

- [43] Y. Bulut y Z. Tez, "Adsorption studies on ground shells of hazelnut and almond", *J. Haz. Mat.*, vol. 149, pp. 35-41, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.03.044>
- [44] P. Melia, R. Busquets, S. Ray y A. Cundy, "Agricultural wastes from wheat, barley, flax and grape for the efficient removal of Cd from contaminated water", *Royal Soc. Chem.*, vol. 8, pp. 40378-40386, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1039/c8ra07877g>
- [45] G. Belete, "A review on elimination of heavy metals from wastewater using agricultural wastes as adsorbents", *Sci. J. Anal. Chem.*, vol. 5, n° 5, pp. 72-75, 2017. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.sjac.20170505.12>
- [46] M. Patterer, I. Bavasso, J. Sambeth y F. Medici, "Cadmium removal from aqueous solution by adsorption on spent coffee grounds", *Chem. Eng. Trans.*, vol. 60, pp. 157-162, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3303/CET1760027>
- [47] C. Tejada, A. Villabona y V. Ruiz, "Biomasa residual para remoción de mercurio y cadmio: una revisión", *Ingenium*, vol. 6, n° 14, pp. 11-21, 2012.