

Ensayo de Investigación

Hidrogeles de quitosano para la adsorción de contaminantes del agua

Chitosan hydrogels for the adsorption of water pollutants

Billy Alberto Ávila Camacho^{1*}, Norma Aurea Rangel Vázquez¹
Didilia Ileana Mendoza Castillo¹, Hilda Elizabeth Reynel Ávila¹

¹Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de Aguascalientes

Autor de correspondencia:
*billyavila67@gmail.com

Recibido: 09-11-2023 Aceptado: 12-06-2025 (Artículo Arbitrado)

Resumen

En el presente trabajo se reporta la síntesis y caracterización de un hidrogel de quitosano para la adsorción de una mezcla de tres metales pesados (mercurio, níquel y cobre). Mediante la técnica de IR se apreciaron los grupos funcionales del hidrogel y de las adsorciones. Las isothermas de adsorción de un sistema ternario a 40 °C y un pH de 4, indicaron las capacidades de adsorción máximas de 0.560, 0.016 y 0.144 mmol/g para mercurio, níquel y cobre respectivamente. Se calcularon los parámetros de las isothermas de Langmuir y Freundlich y con base en el coeficiente de regresión lineal R² el modelo de Freundlich se adaptó mejor para el caso del mercurio y el níquel y el modelo de Langmuir fue mejor para el cobre.

Palabras clave: Adsorbente, agua, metales, remediación.

Abstract

In this work, the synthesis and characterization of a chitosan hydrogel for the adsorption of a mixture of three heavy metals (mercury, nickel, and copper) is reported. The functional groups of the hydrogel and adsorptions were observed using the IR technique. The adsorption isotherms of a ternary system at 40 °C and a pH of 4 indicated maximum adsorption capacities of 0.560, 0.016, and 0.144 mmol/g for mercury, nickel and copper, respectively. The Langmuir and Freundlich isotherm parameters were calculated, and based on the linear regression coefficient R², the Freundlich model was best suited for mercury and nickel, while the Langmuir model was more suitable for copper.

Keywords: Adsorbent, water, metals, remediation.

Introducción

La existencia de contaminantes como oligoelementos en el medio ambiente, principalmente en el agua, afectan de manera significativa la salud. Diversos estudios han demostrado que estos elementos, especialmente los metales pesados, pueden afectar la calidad del agua, así como la de diversos alimentos y, por lo tanto, la salud (Sadegh y Ali 2023). Los metales pesados son un grupo de elementos químicos densos ($> 5 \text{ g/cm}^3$) que se consideran tóxicos en bajas concentraciones. Estos elementos incluyen aluminio (Al), níquel (Ni), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), cadmio (Cd), mercurio (Hg), plomo (Pb), entre otros (Sharma, 2015). La contaminación del agua se

genera principalmente por actividades antropogénicas, como la minería, la fundición de metales y la descarga de aguas industriales y urbanas (Kapoor y Singh 2021).

Existen diferentes procesos para eliminar los metales pesados del agua, por ejemplo, intercambio iónico (Al-Enezi, Hamoda, Fawzi, 2004; Rengaraj y Yeon 2021), precipitación química (Matlock, Howerton, Atwood, 2002), nanofiltración (Al-Rashdi, Johnson, Hilal, 2013; Moradi, Zinadini, Derakhshan, 2020), floculación (Sun, Zhou, Pan, Zhu, Yu, Zheng. 2020) entre otros. Específicamente la adsorción se considera como un método eficaz y económico para dicho fin

(Duan, Ma, Wang, Zhou, 2020; Chakraborty, Asthana, Singh, Jain, Susan, 2022). La quitina es el segundo polímero natural más abundante en el mundo después de la celulosa. Después de la desacetilación de ésta, se produce quitosano, un polisacárido lineal basado en unidades de glucosamina.

El quitosano es un biopolímero adecuado para eliminar iones de metales pesados del agua (Li, Wang, Yuan, Sun, 2016; Wang, Xiaohong, Ganghu, Chen, Hao, Li, 2019, Hao y Liang 2020; Lin, Yang, Liang, Zeng, Zhang, 2021) debido a que sus grupos químicos como los grupos amino e hidroxilo, pueden actuar como sitios de quelación.

Se ha investigado ampliamente la adsorción de metales pesados utilizando adsorbentes a base de quitosano, debido a sus características y ventajas específicas, como biocompatibilidad, baja toxicidad, biodegradabilidad y alta capacidad de adsorción, lo hacen un material altamente eficiente (Vieira, Oliveira, Guibal, Rodríguez, Beppu. 2011; Suc y Ly 2013, Purnaratne, 2015; Zhang, Zhao, Cheng, Wang, Li, Han, Li, 2021; Chen, Yu, Kang, Sun, Zhang, Wang, 2022). Específicamente los hidrogeles se definen como redes tridimensionales compuestas de polímeros que tienen la capacidad de hincharse y absorber cierto volumen de agua en su estructura. Estos materiales, regularmente están conformados por diversas moléculas de polímeros con naturaleza hidrofílica, los cuales se pueden reticular mediante enlaces químicos, interacciones iónicas o enlaces de hidrógeno (Muya, Sunday, Baker, Iwuoha, 2016).

La capacidad de hinchamiento de los hidrogeles se debe principalmente a los grupos funcionales hidrofílicos que se encuentran dentro de la red polimérica que conforma al hidrogel, permitiéndole absorber y retener grandes cantidades de agua, hasta 400 veces su peso original (Hernández y Mijangos 2009; Ahmed, 2015). Esta capacidad permite la penetración de los adsorbatos en el interior del adsorbente, y, por lo tanto, una utilización más eficaz de los sitios activos del polímero (Muya et al., 2016).

El objetivo de este trabajo fue la síntesis y caracterización de hidrogeles de quitosano entrecruzados con glutaraldehído en forma de membranas para llevar a cabo la adsorción de los iones de metales pesados Hg^{2+} , Ni^{2+} y Cu^{2+} en soluciones acuosas en un sistema ternario, posteriormente, se llevó a cabo la

modelación de las isothermas de adsorción empleando el modelo de Langmuir y Freundlich y se caracterizó el material mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y difracción de rayos x (DRX).

Metodología

Materiales

El quitosano de bajo peso molecular (50,000-190,000 Da basado en su viscosidad) con un grado de desacetilación del 75-85 %, cloruro mercuríco ($HgCl_2$), nitrato de cobre ($Cu(NO_3)_2 \cdot H_2O$), nitrato de níquel ($Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) y glutaraldehído (25 %) fueron suministrados por Sigma-Aldrich. El ácido acético (99.7 %) fue comprado de J. T. Baker y el agua desionizada fue suministrada por la marca MAPLA.

Síntesis de los hidrogeles de quitosano

Se disolvió 1.5 g de quitosano en una solución de ácido acético al 3 %. La solución de quitosano se puso en agitación magnética durante 3 horas a 50 °C con una agitación constante de 80 rpm. Posteriormente, se preparó una solución de glutaraldehído al 1 %, se agregó a la solución de quitosano lentamente y se agitó durante 2 horas extra. Se obtuvo una solución viscosa con un color amarillo pálido, ésta se centrifugó a 6000 rpm durante 5 minutos para sedimentar las partículas que quedaron suspendidas en la solución y finalmente se vertió en cajas de Petri para dejar secar a temperatura ambiente durante 72 horas y obtener las películas de quitosano entrecruzadas con glutaraldehído.

Caracterización del hidrogel

Se realizó la caracterización del adsorbente antes y después de los experimentos de adsorción de los iones de metales pesados empleando difracción de rayos x (DRX) y espectroscopia infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) para determinar la estructura cristalina y los grupos funcionales presentes en el hidrogel respectivamente.

FTIR

Para determinar los grupos funcionales del hidrogel se realizó un análisis mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) empleando un espectrofotómetro infrarrojo Nicolet iS10 de Thermo Scientific. Para el análisis se realizaron 32 barridos y se recolectaron los espectros en un rango de número de onda de 4000 – 600 cm^{-1} .

DRX

Para identificar la estructura cristalina del hidrogel se realizó un análisis mediante DRX empleando un difractómetro Emyrean de Malvern-Panalytical equipado con un detector PIXer ID. El equipo fue operado a 45 kV y 40 mA y se empleó una radiación de $\text{CuK}\alpha 1$ ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$).

Estudios de adsorción multicomponente de Hg^{2+} , Ni^{2+} y Cu^{2+}

Primeramente, se prepararon 500 ml de solución con 2 mmol L^{-1} de cada una de las sales (cloruro mercúrico, nitrato de cobre y nitrato de níquel) y se ajustó el pH de las soluciones a 4. La concentración de los adsorbatos se mantuvo fija mientras que la masa del adsorbente varió desde 0.01 hasta 0.07 g. Los experimentos fueron por lotes empleando un volumen de 10 ml a una temperatura constante de 40°C y una agitación de 120 rpm durante 24 horas.

A las 24 horas, se separó el adsorbente de las soluciones con los metales y se diluyeron para ser cuantificadas mediante espectroscopia de absorción atómica (espectrómetro iCE 3000 series). Todos los experimentos se hicieron por duplicado. Para la obtención de las capacidades de adsorción, se empleó la ecuación (1).

$$q_e = \frac{(C_o - C_e)V}{m} \quad (1)$$

Donde, q_e es la capacidad de adsorción, C_o y C_e son las concentraciones iniciales y en equilibrio de las soluciones de metales pesados respectivamente, V es el volumen empleado y m es la masa del adsorbente.

Modelación de las isotermas de adsorción

Los resultados obtenidos de los modelos de isotermas de adsorción muestran información sobre la interacción adsorbato/adsorbente, al igual que la representación del equilibrio de estos. El equilibrio se alcanzó al momento en que la superficie del adsorbente quedó saturada del adsorbato contenido en una fase líquida, lo que permitió determinar la capacidad de adsorción en el equilibrio. Además, la forma de la isoterma proporciona información sobre los mecanismos generales de los procesos de adsorción (Raji, Karim, Karam, Khalloufi, 2023).

Se usaron diferentes modelos de adsorción para correlacionar la información experimental obtenida de la remoción de Hg^{2+} , Ni^{2+} y Cu^{2+} en un sistema ter-

nario. El modelo de Langmuir (ver ecuación 2), por ejemplo, es un modelo de dos parámetros e indica que la adsorción se da en una monocapa y es proporcional al tamaño de la superficie del adsorbente, en donde hay un número finito de sitios que se encuentran distribuidos de manera homogénea y poseen la misma afinidad (Ayawei, Ebelegi, Wankasi, 2017).

$$q_e = \frac{q_L K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2)$$

Donde, q_e es la capacidad de adsorción en equilibrio (mg/g), C_e es la concentración del soluto en equilibrio (mg/L), q_L es la capacidad de adsorción máxima predicha por el modelo de Langmuir (mg/g) y K_L es la constante de Langmuir (L/mg). El modelo de Freundlich (ecuación 3) representa un proceso en el cual es posible la adsorción multicapa. De acuerdo con este modelo, durante el proceso de adsorción los sitios de unión más fuertes serán ocupados primeramente por los adsorbatos (Ayawei et al., 2017).

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (3)$$

Siendo, K_F la constante de Freundlich [(mg/g) (mg/L) $^{1/n}$] y $1/n$ (adimensional) el factor de heterogeneidad.

Resultados y discusión

Caracterización del hidrogel

En la Figura 1a se muestra la membrana de quitosano puro y en la Figura 1b el quitosano entrecruzado con glutaraldehído en donde, se observó un cambio de color en la estructura del hidrogel reticulado hacia un amarillo-naranja intenso, indicativo de una adición aldólica catalizada por aminas (Webster, Halling, Grant, 2007).

En la Figura 2a se aprecia el espectro de FTIR del quitosano puro y reticulado, la banda en la región de 3343 y 3258 cm^{-1} fue atribuida al estiramiento de OH y NH respectivamente, así como los enlaces de hidrógeno. La vibración a 2919 y 2867 cm^{-1} correspondió al estiramiento simétrico y asimétrico del CH, entre 1631 y 1316 cm^{-1} las vibraciones fueron atribuidas a la presencia de grupos acetilo residual, específicamente al estiramiento de C=O y C-N, respectivamente. El balanceo de las aminas primarias NH_2 fue confirmado por la presencia de la banda en el número de onda 1547 cm^{-1} .

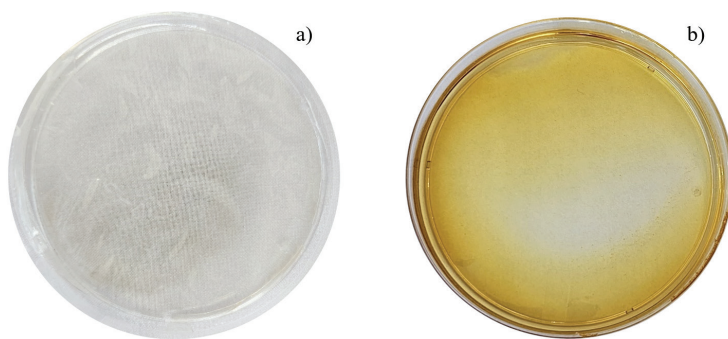


Figura 1. Membrana de a) quitosano puro y b) quitosano reticulado con glutaraldehído.

Fuente: Elaboración propia.

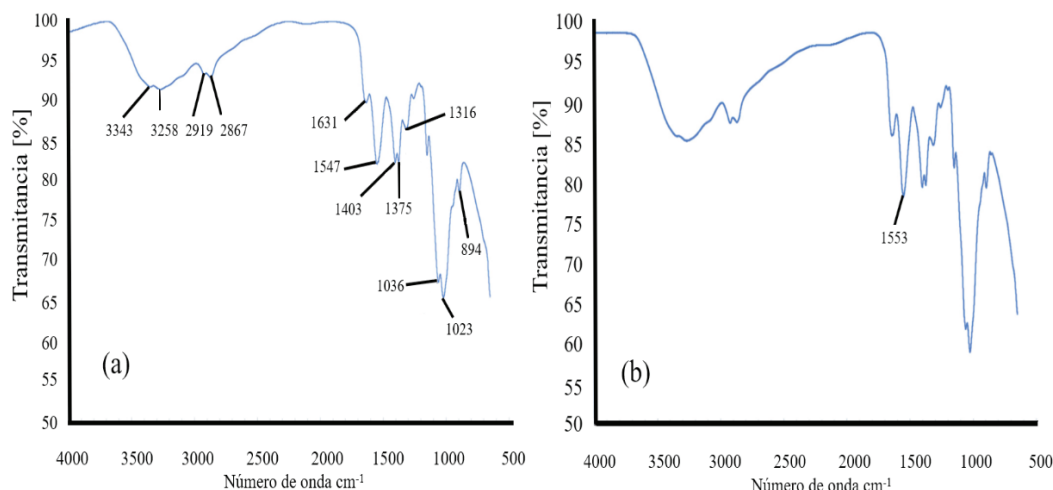


Figura 2. Espectro IR del (a) quitosano puro y (b) reticulado con glutaraldehído.

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, las 2 pequeñas bandas a 1403 y 1375 cm^{-1} fueron asignadas al balanceo o flexión simétricos de CH_2 y CH_3 . El estiramiento de los enlaces $\text{C}-\text{O}$ fue confirmado por el pico de mayor intensidad en la región 1036 y 1023 cm^{-1} , finalmente el pequeño pico a 894 cm^{-1} se atribuyó al balanceo fuera de plano de los enlaces $\text{C}-\text{H}$ pertenecientes a los anillos de monosacárido que conforman al polímero (Queiroz, Teodosio, Sabry, Sassaki, Rocha, 2014; Knidri, Belaabed, Khalfauy, Laajeb, Addaou, Lahsini, 2017).

La Figura 2b muestra el espectro de FTIR del quitosano reticulado con glutaraldehído, a diferencia del quitosano puro se observó un cambio en la intensidad de los picos, principalmente los que corresponden al balanceo de los enlaces $\text{O}-\text{H}$ y $\text{N}-\text{H}$, así como el balanceo de las aminas primarias, lo cual indicó un aumento en la cantidad de grupos funcionales por unidad de volumen, debido a la unión de 2 o más cadenas de quitosano en el entrecruzamiento con el glutaraldehído (Jones, Ramsay Keir, Dobriner, 1952).

La Figura 3a presenta el difractograma de rayos X

del quitosano puro. Este mostró 3 picos de difracción característicos en la escala 2θ a 10° , 13° y 20° , indicando una estructura altamente cristalina debido a la estructura ordenada del quitosano (Kumar, Koh, 2012; Je, Li, Xing, Liu, Hu. Li, 2016; Morsy, Mostafa, Aryn, El-Ebissy, Salah, Youssef, 2019). Por otro lado, en la Figura 3b se observa el quitosano reticulado, donde el pico a 13° desapareció y el de 10° disminuyó su intensidad, es decir, se generó una estructura amorfa.

Este cambio fue atribuido a la deformación de los enlaces de hidrogeno del quitosano debido a la sustitución de grupos amino por los grupos imina, lo cual modifica la regularidad de empaquetamiento de las cadenas de quitosano (Li, Shan, Zhou, Fang, Wang, Xu, Sun, 2014).

Isotermas de adsorción experimentales en soluciones multicomponente

En la Figura 4 se observan las isotermas experimentales obtenidas de la adsorción ternaria de Hg^{2+} , Ni^{2+} y Cu^{2+} en hidrogeles de quitosano. En la Figura 4a se apreció que, en la isoterma del Hg^{2+} , la capacidad

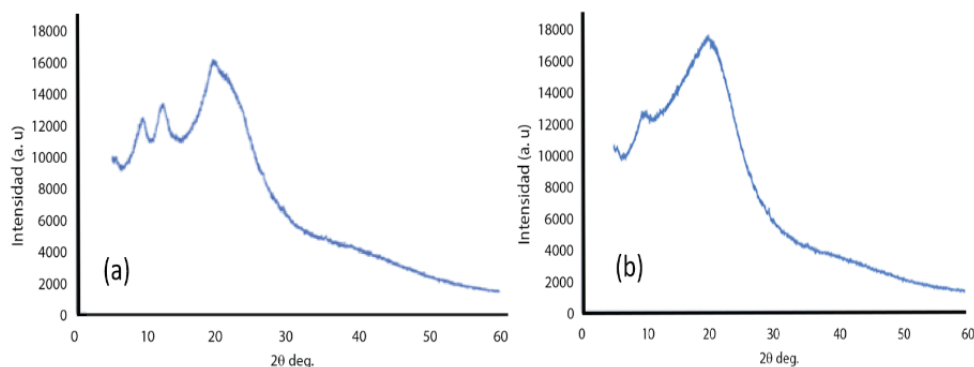


Figura 3. Difractograma del (a) quitosano puro y (b) reticulado con glutaraldehído.
Fuente: Elaboración propia.

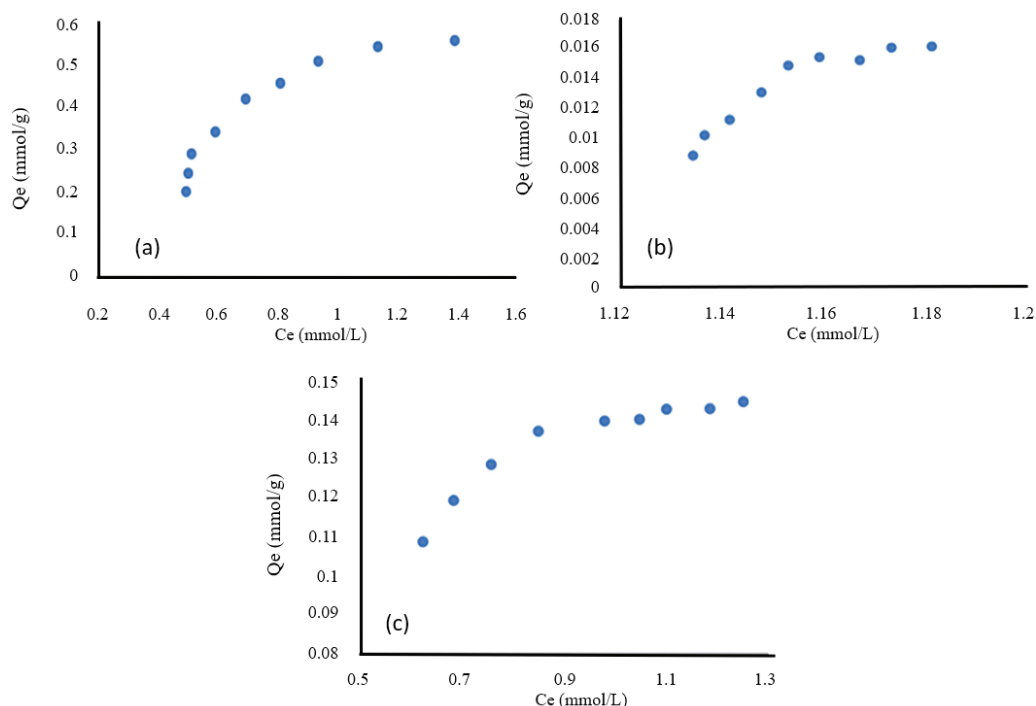


Figura 4. Isothermas de adsorción ternarias de a) Hg^{2+} , b) Ni^{2+} y c) Cu^{2+} .
Fuente: Elaboración propia.

de adsorción máxima fue de 0.560 mmol/g, para el Ni^{2+} (ver Figura 4b) fue de 0.016 mmol/g y para el Cu^{2+} (ver Figura 4c) la capacidad de adsorción fue 0.144 mmol/g. La capacidad de adsorción del níquel y cobre fueron bajas, debido a la competencia entre estos iones por los sitios activos del adsorbente (Sellaoui, Mendoza, Reynel, Ávila, Díaz, Ghalla, Lamine, 2019).

Por otro lado, el mercurio fue el adsorbato que se removió en mayor cantidad, lo cual fue atribuido a la diferencia de electronegatividades de los 3 iones, lo cual contribuye a una mayor estabilidad en los complejos formados por el mercurio y los grupos funcio-

nales reactivos del adsorbente (Sellaoui et al., 2019; Neris, Luzardo, da Silva, Velasco, 2019).

En la Tabla 1 se observan los parámetros de las isothermas de Langmuir y Freundlich. Para el caso del mercurio y el níquel, la isoterma de Freundlich fue la que mejor se adaptó debido a que el coeficiente de regresión lineal R^2 de 0.8420 y 0.8088 respectivamente, mientras que para el caso del cobre fue la isoterma de Langmuir, ya que el valor del coeficiente R^2 fue de 0.9015.

El parámetro $1/n$ es menor a 1 en el caso del Hg, indicando que el fenómeno de adsorción es favora-

Tabla 1. Parámetros isotérmicos para la eliminación de Hg^{2+} , Ni^{2+} y Cu^{2+} .

Isoterma	Parámetro	Hg	Ni	Cu
Langmuir	K_L	0.0682	0.8063	1.8026
	R_L	0.8820	0.5087	0.2840
	R^2	0.8247	0.7689	0.9015
Freundlich	K_f	0.4928	0.0018	0.1377
	$1/n$	0.904	13.864	0.3668
	R^2	0.8420	0.8088	0.8672

Fuente: Elaboración propia.

ble, sin embargo, el mismo parámetro para el Ni tiene un valor de 13.864, es decir, el fenómeno de adsorción no es favorable para este caso, por otro lado, el parámetro R_L de Langmuir para el caso del Cu fue de 0.2840 lo que determinó un proceso favorable (Ayub, Raza, Majeed, Tariq, Irfan. 2020).

Conclusiones

Utilizando hidrogeles obtenidos del quitosano fue posible efectuar la adsorción de diversos tipos de contaminantes del agua como, mercurio, níquel y cobre con la finalidad de mejorar la calidad del agua para riego y consumo. Con base en los resultados obtenidos, el orden de adsorción fue $Hg > Cu > Ni$. Mientras que, los modelos isotérmicos, determinaron que es probable una adsorción multicapa para el caso del Hg debido a la elevada capacidad de adsorción que se calculó.

Referencias

Ahmed, E. M. (2015). Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. *Journal of advanced research*, 6(2), 105-121. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2013.07.006>.

Al-Rashdi, B. A. M., Johnson, D. J., & Hilal, N. 2013. Removal of heavy metal ions by nanofiltration. *Desalination*, 315, 2-17. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.05.022>.

Ayawei, N., Ebelegi, A. N., & Wankasi, D. (2017). Modelling and interpretation of adsorption isotherms. *Journal of chemistry*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/3039817>.

Ayub, A., Raza, Z. A., Majeed, M. I., Tariq, M. R., & Irfan, A. (2020). Development of sustainable magnetic chitosan biosorbent beads for kinetic remediation of arsenic contaminated water. *International journal of biological macromolecules*, 163, 603-617. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.06.287>.

Chakraborty, R., Asthana, A., Singh, A. K., Jain, B., & Susan, A. B. H. 2022. Adsorption of heavy metal ions by various low-cost adsorbents: a review. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102(2), 342-379. <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1722811>.

Chen, M., Yu, M., Kang, R., Sun, H., Zhang, W., Wang, S., ... & Wang, J. (2022). Removal of Pb (II) and V (V) from aqueous solution by glutaraldehyde crosslinked chitosan and nanocomposites. *Chemosphere*, 297, 134084. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134084>.

Duan, C., Ma, T., Wang, J., & Zhou, Y. 2020. Removal of heavy metals from aqueous solution using carbon-based adsorbents: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 37, 101339. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101339>.

G. Al-Enezi, M. Hamoda, N. Fawzi. 2004. Ion exchange extraction of heavy metals from wastewater sludges, *J. Environ. Sci.* 39, 455-464. <https://doi.org/10.1081/ESE-120027536>.

Hao, D., & Liang, Y. (2020). Adsorption of Cu^{2+} , Cd^{2+} , and Pb^{2+} in wastewater by modified chitosan hydrogel. *Environmental Technology*, 43(6), 876-884.

He, X., Li, K., Xing, R., Liu, S., Hu, L., & Li, P. (2016). The production of fully deacetylated chitosan by compression method. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 42(1), 75-81. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2015.09.003>.

Hernández, R., & Mijangos, C. (2009). In situ Synthesis of Magnetic Iron Oxide Nanoparticles in Thermally Responsive Alginate-Poly (N-isopropylacrylamide) Semi-Interpenetrating Polymer Networks. *Macromolecular rapid communications*, 30(3), 176-181. <https://doi.org/10.1002/marc.200800602>.

Jones, R. N., Ramsay, D. A., Keir, D. S., & Dobriner, K. (1952). The intensities of carbonyl bands in the infrared spectra of Steroids I. *Journal of the American Chemical Society*, 74(1), 80-88. <https://doi.org/10.1021/ja01121a019>.

Kapoor, D., & Singh, M. P. (2021). Heavy metal contamination in water and its possible sources. *Heavy metals in the environment* (pp. 179-189). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821656-9.00010-9>.

Khraisheh, M. A., Al-degs, Y. S., & Mcminn, W. A. (2004). Remediation of wastewater containing heavy metals using raw and modified diatomite. *Chemical Engineering Journal*, 99(2), 177-184. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2003.11.029>.

Knidri, H., Belaabed, R., Khalfaouy, R., Laajeb, A., Addaou, A., Lahsini, A. (2017). Physicochemical Characterization of Chitin and Chitosan Produced from Parapenaeus Longirostris Shrimp Shell Wastes. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 8(10): 3648-3653.

Kumar, S., & Koh, J. (2012). Physiochemical, optical and biological activity of chitosan-chromone derivative for biomedical applications. *International journal of molecular sciences*, 13(5), 6102-6116. <https://doi.org/10.3390/ijms13056102>.

Li, B., Shan, C. L., Zhou, Q., Fang, Y., Wang, Y. L., Xu, F., ... & Sun, G. C. (2013). Synthesis, characterization, and antibacterial activity of cross-linked chitosan-glutaraldehyde. *Marine drugs*, 11(5), 1534-1552. <https://doi.org/10.3390/md11051534>.

- Li, F., Wang, X., Yuan, T., & Sun, R. (2016). A lignosulfonate-modified graphene hydrogel with ultrahigh adsorption capacity for Pb (II) removal. *Journal of Materials Chemistry A*, 4(30), 11888-11896. <https://doi.org/10.1039/C6TA03779H>.
- Lin, Z., Yang, Y., Liang, Z., Zeng, L., & Zhang, A. (2021). Preparation of chitosan/calcium alginate/bentonite composite hydrogel and its heavy metal ions adsorption properties. *Polymers*, 13(11), 1891. <https://doi.org/10.3390/polym13111891>.
- M.M. Matlock, B.S. Howerton, D.A. Atwood. 2002. Chemical precipitation of heavy metals from acid mine drainage, *Water Res.* 36, 4757-4764. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00149-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00149-5).
- Moradi, G., Zinadini, S., Rajabi, L., & Derakhshan, A. A. 2020. Removal of heavy metal ions using a new high performance nanofiltration membrane modified with curcumin boehmite nanoparticles. *Chem. Eng. J.*, 390, 124546. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124546>.
- Morsy, M., Mostafa, K., Ameen, H., El-Ebissy, A. A. H., Salah, A. M., & Youssef, M. A. (2019). Synthesis and characterization of freeze dryer chitosan nano particles as multi functional eco-friendly finish for fabricating easy care and antibacterial cotton textiles. *Egyptian Journal of Chemistry*, 62(7), 1277-1293. <https://doi.org/10.21608/ejchem.2019.6995.1583>.
- Muya, F. N., Sunday, C. E., Baker, P., & Iwuoha, E. (2016). Environmental remediation of heavy metal ions from aqueous solution through hydrogel adsorption: a critical review. *Water Science and Technology*, 73(5), 983-992. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.567>.
- Neris, J. B., Luzardo, F. H. M., da Silva, E. G. P., & Velasco, F. G. (2019). Evaluation of adsorption processes of metal ions in multi-element aqueous systems by lignocellulosic adsorbents applying different isotherms: A critical review. *Chemical Engineering Journal*, 357, 404-420. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.125>.
- Purnaratri, A. (2015). Comparative adsorption of Fe (III) and Cd (II) ions on glutaraldehyde crosslinked chitosan-coated cristobalite. *Oriental Journal of Chemistry*, 31(4), 2071. <http://dx.doi.org/10.13005/ojc/310427>.
- Queiroz, M. F., Teodosio Melo, K. R., Sabry, D. A., Sasaki, G. L., & Rocha, H. A. O. (2014). Does the use of chitosan contribute to oxalate kidney stone formation? *Marine drugs*, 13(1), 141-158. <https://doi.org/10.3390/md13010141>.
- Raji, Z., Karim, A., Karam, A., & Khalloufi, S. (2023). Adsorption of Heavy Metals: Mechanisms, Kinetics, and Applications of Various Adsorbents in Wastewater Remediation—A Review. *Waste*, 1(3), 775-805. <https://doi.org/10.3390/waste1030046>.
- S. Rengaraj, K.-H. Yeon, S.-H. 2001. Moon, Removal of chromium from water and wastewater by ion exchange resins, *J. Hazard. Mater.* 87, 273-287. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00291-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00291-6).
- Sadee, BA y Ali, RJ (2023). Determination of heavy metals in edible vegetables and a human health risk assessment. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 19, 100761. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2022.100761>.
- Sellaoui, L., Mendoza-Castillo, D. I., Reynel-Ávila, H. E., Ávila-Camacho, B. A., Díaz-Muñoz, L. L., Ghalla, & Lamine, A. B. (2019). Understanding the adsorption of Pb²⁺, Hg²⁺ and Zn²⁺ from aqueous solution on a lignocellulosic biomass char using advanced statistical physics models and density functional theory simulations. *Chemical Engineering Journal*, 365, 305-316. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.02.052>.
- Sharma, S. K. (Ed.). (2014). *Heavy metals in water: presence, removal, and safety*. Royal Society of Chemistry. ISBN: 9781849738859.
- Suc, N. V., & Ly, H. T. Y. (2013). Lead (II) removal from aqueous solution by chitosan flake modified with citric acid via crosslinking with glutaraldehyde. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 88(9), 1641-1649. <https://doi.org/10.1002/jctb.4013>.
- Sun, Y., Zhou, S., Pan, S. Y., Zhu, S., Yu, Y., & Zheng, H. 2020. Performance evaluation and optimization of flocculation process for removing heavy metal. *Chemical Engineering Journal*, 385, 123911. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123911>.
- Vieira, R. S., Oliveira, M. L. M., Guibal, E., Rodríguez-Castellón, E., & Beppu, M. M. (2011). Copper, mercury, and chromium adsorption on natural and crosslinked chitosan films: An XPS investigation of mechanism. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 374(1-3), 108-114. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.11.022>.
- Wang, Xiaohong & Wang, Ganghu & Chen, Hao & Li, Xin & Li, Tihai. (2019). Adsorption performance of a polysaccharide composite hydrogel based on crosslinked glucan/chitosan for heavy metal ions. *Composites Part B: Engineering*. Vol. 169, 45-54 pp. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.03.082>.
- Webster, A., Halling, M. D., & Grant, D. M. (2007). Metal complexation of chitosan and its glutaraldehyde cross-linked derivative. *Carbohydrate Research*, 342(9), 1189-1201. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2007.03.008>.
- Zhang, Y., Zhao, M., Cheng, Q., Wang, C., Li, H., Han, X., & Li, Z. 2021. Research progress of adsorption and removal of heavy metals by chitosan and its derivatives: A review. *Chemosphere*, 279, 130927. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130927>.