

Adsorbentes sustentables de bajo costo para la remoción de contaminantes tóxicos en agua.

Low-cost sustainable adsorbents for the removal of toxic pollutants in water.

Evelyn Cristel Bernal-Silva¹, Ernesto Campos-Bustos¹, Josué Nava-Martínez², Paloma Ramírez Zúñiga y Araceli Jacobo-Azuara^{*3}

¹División de Ciencias Naturales y Exactas, Departamento de Farmacia, Col. Noria Alta s/n CP 36050, Guanajuato, Gto., México

²División de Ciencias Naturales y Exactas, Departamento de Ingeniería Química, Col. Noria Alta s/n CP 36050, Guanajuato, Gto., México

³División de Ciencias Naturales y Exactas, Departamento de Química, Col. Noria Alta s/n CP 36050, Guanajuato, Gto., México

*azuara@ugto.mx¹

Resumen

En este proyecto analizó la capacidad de adsorción de bioadsorbentes naturales como la cáscara de naranja y cáscara de huevo para su uso de la remoción de contaminantes tóxicos en agua, enfocándose específicamente en iones metálicos como plomo, cobre y algunos colorantes industriales. Estos contaminantes son comúnmente vertidos por industrias como la textil, representando una amenaza significativa para los ecosistemas acuáticos y la salud humana. Los datos de equilibrio de adsorción se obtuvieron utilizando un adsorbente de lote a condiciones de $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $\text{pH} = 4$, en donde se puso en contacto una masa conocida del bioadsorbente con un volumen de plomo o cobre, para posteriormente analizar la concentración en equilibrio por Espectrometría de Absorción Atómica. Los bioadsorbentes se caracterizaron con la técnica de espectroscopía infrarroja (FTIR) para determinar los grupos funcionales presentes en el material adsorbente. Los resultados experimentales del equilibrio de adsorción se interpretaron con el modelo de la isoterma de Langmuir. Para la remoción de plomo, se observó una máxima capacidad de adsorción de 30 mg/g y de 12 mg/g para la cáscara de huevo y la cáscara de naranja, respectivamente. En el caso del cobre, se observó una máxima capacidad de adsorción de 15 mg/g para ambos bioadsorbentes. Este estudio contribuye al desarrollo de tecnologías limpias dentro del marco de la economía circular y el aprovechamiento de residuos orgánicos.

Palabras clave: bioadsorción, agua, contaminantes tóxicos.

Introducción

Las aguas residuales generadas por las industrias han sido objeto de estudio durante décadas debido a la problemática ambiental que representan, principalmente por su alta demanda de oxígeno y el impacto negativo que provocan en la vida acuática al limitar la penetración de la luz en los cuerpos de agua receptores. Entre los métodos tradicionales para su tratamiento se encuentran la adsorción con carbón activado, sistemas con oxigenación inducida, electrolisis y digestión anaerobia, dichos procesos suelen implicar costos operativos y de mantenimiento elevados, dificultando su aplicación en pequeñas industrias (Vargas Rodríguez *et al.* 2009).

En este contexto, la bioadsorción se presenta como una alternativa eficiente, económica y ambientalmente viable. Este término describe la captación de compuestos por medio de una biomasa (viva o muerta), a través de mecanismos físicoquímicos como la adsorción o el intercambio iónico, involucrando una fase sólida (adsorbente) y una fase líquida (disolvente) que contiene las especies que van a ser adsorbidas (adsorbato) (Vargas Rodríguez, M., *et al.*, 2009). El proceso de bioadsorción no requiere de nutrientes y no presenta limitaciones biológicas, además los niveles de remoción comparada con los métodos tradicionales son muy significativos. Este tipo de tratamiento se encuentra influenciado por varios factores tales como la concentración inicial del metal, el tamaño de la partícula, el pH, entre otros. Los bioadsorbentes son materiales derivados de microorganismos, bacterias, hongos, algas marinas, plantas o algunos polímeros naturales que han demostrado su capacidad para eliminar metales pesados presentes en aguas residuales (Guerra Hernández *et al.* 2025 y Duany *et al.* 2022).

En particular, residuos agroindustriales como la cáscara de naranja y el cascarón de huevo representan materiales prometedores para la bioadsorción. La cáscara de naranja está compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y pectinas, además de ciertos pigmentos, lo que la hace ideal para la adsorción de colorantes (Vargas Rodríguez *et al.* 2009). Por su parte, el cascarón de huevo, generado en grandes

cantidades por la industria alimentaria, presenta una estructura porosa y está constituido principalmente por carbonato de calcio (CaCO_3) y proteínas con grupos funcionales que pueden enlazar iones metálicos como plomo y cobre (Miljan Marković *et. al.*, 2023 y García Albortante *et. al.*, 2015). El objetivo principal de este proyecto fue evaluar la eficiencia de bioadsorbentes naturales como la cáscara de naranja y cáscara de huevo para la remoción de contaminantes presentes en el agua, específicamente metales pesados (plomo y cobre) y colorantes sintéticos, mediante el equilibrio de adsorción y caracterización fisicoquímica de los materiales.

Cáscara de huevo como bioadsorbente

El uso de residuos agroindustriales como la cáscara de huevo ha despertado un creciente interés en el ámbito ambiental, particularmente en el tratamiento de aguas contaminadas. Este residuo, considerado de bajo costo y fácil obtención, ha demostrado ser un bioadsorbente eficaz para la remoción de diversos contaminantes, incluyendo metales pesados, colorantes y nutrientes como el fósforo. La cáscara de huevo está compuesta principalmente por carbonato de calcio (CaCO_3), además de biomaterial y fosfato cálcico. Zonato *et al.* (2022) reportaron que la cáscara de huevo sin modificar también puede remover eficientemente colorantes y metales pesados (Cd^{2+} y Cr^{3+}), atribuyendo su capacidad a su estructura porosa y carga superficial neutra a pH 7, además de la facilidad para ser usada sin necesidad de activación química

Cáscara de naranja como bioadsorbente

La cáscara de naranja constituye entre el 50 % y el 60 % del peso total del fruto procesado, y representa un residuo significativo en la industria de jugos cítricos. Este subproducto está compuesto principalmente por celulosa, hemicelulosa, pectina y lignina, con abundantes grupos funcionales como hidroxilos, carboxilos y aminas, que facilitan su interacción con diversos contaminantes. Diversas investigaciones han demostrado el potencial de la cáscara de naranja como bioadsorbente para la remoción de metales pesados y colorantes.

Metodología

Procesamiento del bioadsorbente

La recolección de cáscaras de huevo y naranja se llevó a cabo en negocios y residencias de la ciudad de Guanajuato, Gto., para asegurar higiene y evitar riesgos sanitarios, se lavó el material obtenido, retirando la membrana de las cáscaras de huevo y la pulpa de las cáscaras de naranja. Posteriormente, se realizó la molienda del material (trozos pequeños) con ayuda de un mortero de porcelana, se secó en mufla a 100°C por 24 horas para finalmente triturar los materiales con el mortero de porcelana y con ayuda tamices del No. 30, asegurar un tamaño de partícula entre 1 mm y 0.5 mm.



Figura 1. Esquema del proceso de obtención y procesamiento de los materiales de cáscara de naranja y huevo. (Fuente: Elaboración propia, 2025)

Caracterización del bioadsorbente

El punto de carga cero de los bioadsorbentes se realizó mediante la siguiente metodología: se empleó 1 gramo de cada muestra, que fue depositada en un tubo Falcon de 50 mL, al cual se le adicionaron 30 mL de agua desionizada. Se utilizaron 14 tubos para cada material y cada uno de ellos se ajustó con ayuda de soluciones estándar al pH deseado (1 a 14). Las muestras se mantuvieron en reposo durante un periodo de 5 días a temperatura constante (25°C) con el fin de alcanzar el equilibrio del sistema. Al finalizar este tiempo, se procedió a medir el pH final de cada solución para determinar el punto de carga cero de los materiales estudiados.

Para la determinación de los puntos ácidos y puntos básicos del material, para lo cual se emplearon dos tubos Falcon de 50 mL para cada bioadsorbente, a los cuales se les agregó 1 gramo del material, uno de los tubos fue llenado con 40 mL de solución estándar HCl 0.1 N y el segundo con 40 mL de NaOH 0.1 N. Las muestras se conservaron en reposo durante 7 días a temperatura constante de 25 °C. Posterior a este tiempo, se extrajeron alícuotas de 20 mL de cada solución, las cuales se sometieron a titulación mediante la adición progresiva de la solución titulante en incrementos de 1 mL hasta alcanzar un volumen total de 50 mL, registrándose el cambio de pH en cada adición para la construcción de las gráficas y la cuantificación precisa de los sitios ácidos y básicos presentes en el material.

Por último, ambos materiales fueron sometidos a un análisis espectrofotométrico mediante la espectroscopía infrarroja (IR) con el objetivo de identificar y caracterizar los grupos funcionales presentes en su estructura.

Equilibrio de adsorción

Para obtener los datos de equilibrio de adsorción se empleó 1 gramo de material en tubos Falcon de 50 mL en contacto con 30 mL de solución de cada contaminante (Plomo, Cobre, Azul de Metileno y Naranja de Metilo) a diferentes concentraciones (5, 10, 20, 50 y 100 ppm). Para la Cáscara de Huevo se ajustó a un pH de 5 y para la Cáscara de Naranja se empleó un pH de 4. La temperatura se mantuvo constante a 25 °C durante 5 días hasta alcanzar el equilibrio de adsorción. Durante el tiempo mencionado, se realizó el control de pH por medio de un electrodo y se ajustaron con ayuda de HCl a 0.05M, 0.1M y 1M; y de NaOH a 0.05M, 0.1M y 1M. Al final de los 5 días, se tomaron alícuotas de 10 ml de cada solución para posteriormente cuantificar la concentración de cada alícuota. Para determinar la concentración de los contaminantes se emplearon diferentes métodos de acuerdo con el tipo de contaminante. Se empleó espectrometría UV-Visible para colorantes (Azul de metileno y Naranja de Metilo) y Absorción Atómica para metales pesados (Plomo y Cobre). El porcentaje de remoción para cada uno de los bioadsorbentes se obtuvo con la siguiente ecuación:

$$\% R = \frac{C_0 - C_{eq}}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

Donde:

- % R = Porcentaje de remoción de metales pesados, %.
- C_0 = Concentración inicial del contaminante, $\mu\text{g/L}$.
- C_{eq} = Concentración en el equilibrio después de la adsorción, $\mu\text{g/L}$.

Los datos de equilibrio de adsorción se llevaron a cabo en un sistema de adsorción experimental de lote (ver Figura 2), este sistema consta de tubos de centrifuga (3) donde será depositado el adsorbente (4), y posteriormente los tubos serán sumergidos en baño maría (1) manteniendo la temperatura deseada usando un recirculador de agua (2).

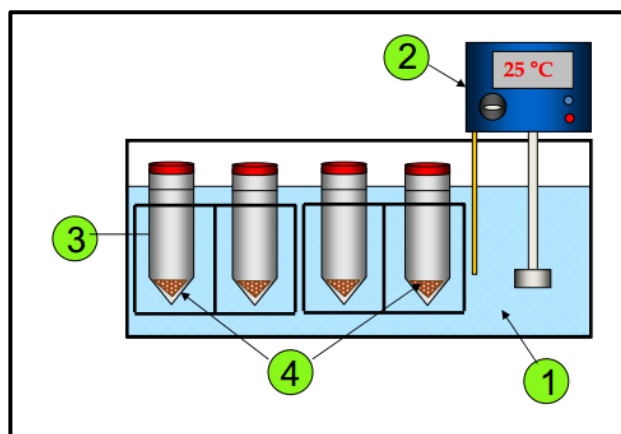


Figura 2. Ilustración de un adsorbedor de lote a temperatura constante. (Fuente: Elaboración propia, 2025)

Resultados

En la Figura 3 se muestra el espectro infrarrojo de la cáscara de naranja, donde se muestran nuevamente picos característicos similares a los obtenidos en el espectro infrarrojo de la cascara de naranja natural, pero con un alargamiento en los picos de la señal de absorción del espectro. Los principales componentes de la cáscara de naranja son proteínas, pectinas, celulosas, pigmentos y lignina, por lo cual, el espectro muestra picos indicando la naturaleza compleja del material modificado. El pico de adsorción intenso y ancho alrededor de $\lambda=3440\text{cm}^{-1}$ corresponde a las vibraciones de estiramiento del enlace O-H de compuestos poliméricos como celulosa, pectina, hemicelulosa y lignina; esto debido a las especies solubilizadas por el tratamiento con agua. El pico observado a $\lambda=2920\text{cm}^{-1}$ puede atribuirse a las vibraciones de enlaces C-H. Los picos alrededor de $\lambda=1740\text{cm}^{-1}$ corresponden al estiramiento carbonilo C=O lo que indica la vibración de los grupos carbonilo de la pectina, hemicelulosa y lignina en la biomasa estudiada. El pico observado a $\lambda=1640\text{cm}^{-1}$ y $\lambda=1440\text{cm}^{-1}$ corresponden a los grupos C=C y C-H por la presencia de alifáticos y aromáticos, grupos en el plano de deformación, vibraciones de metilo, metileno y grupos metoxi; sufriendo un alargamiento en la señal de absorción debido a los sitios de posible enlace con el Ca. La intensa banda que comprende desde los $\lambda=1380\text{cm}^{-1}$ hasta $\lambda=1270\text{cm}^{-1}$ que corresponde al grupo C-O de alcoholes y ácidos carboxílico sufre también un alargamiento en la señal de absorción posiblemente a los sitios de enlace con el Ca. Y por último se observa una intensa y ancha banda en la región $\lambda=1120\text{cm}^{-1}$ que corresponde a un alargamiento del tipo C-O-C asimétrico y que posiblemente sería el responsable del enlace glicosídico de los polímeros presentes en la muestra y por lo tanto la deformación provocada al enlace glicosídico por las interacciones del Ca con algunos grupos funcionales serían el responsable de dicha señal.

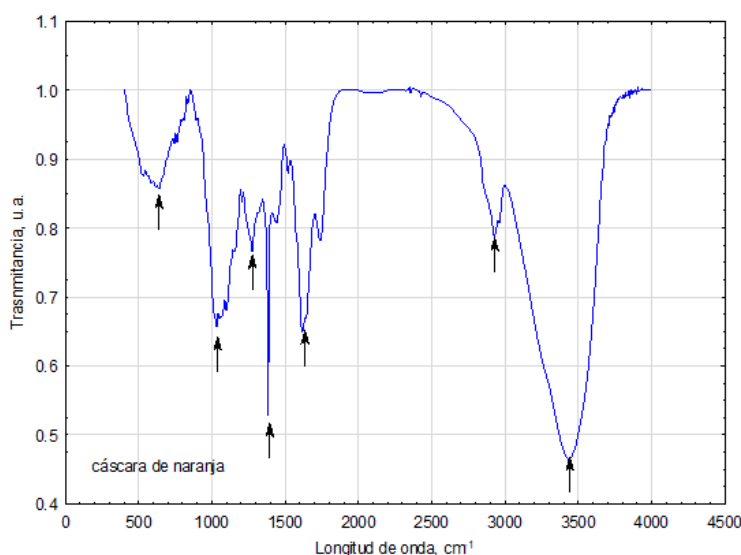


Figura 3. Diagrama de FTIR para la cáscara de naranja. (Fuente: Elaboración propia, 2025)

En la Figura 4 se exhibe el espectro en el infrarrojo del cascarón de huevo. El espectro infrarrojo del cascarón de huevo presenta un pico significativo a 1397cm^{-1} , el cual se relaciona al enlace C-O en el carbonato debido a una vibración de estiramiento, la cual mostró un enlace de coordinación entre el oxígeno del carbonato y el metal calcio. También, se observan un pico a 711cm^{-1} , el cual se puede asociar a la deformación dentro del plano del carbonato de calcio. Por otro lado, la presencia de amidas y aminos por parte de la membrana de cascarón de huevo se puede asociar con la presencia de pico significativo correspondiente al enlace N-H en el intervalo de $3100\text{-}3500\text{cm}^{-1}$.

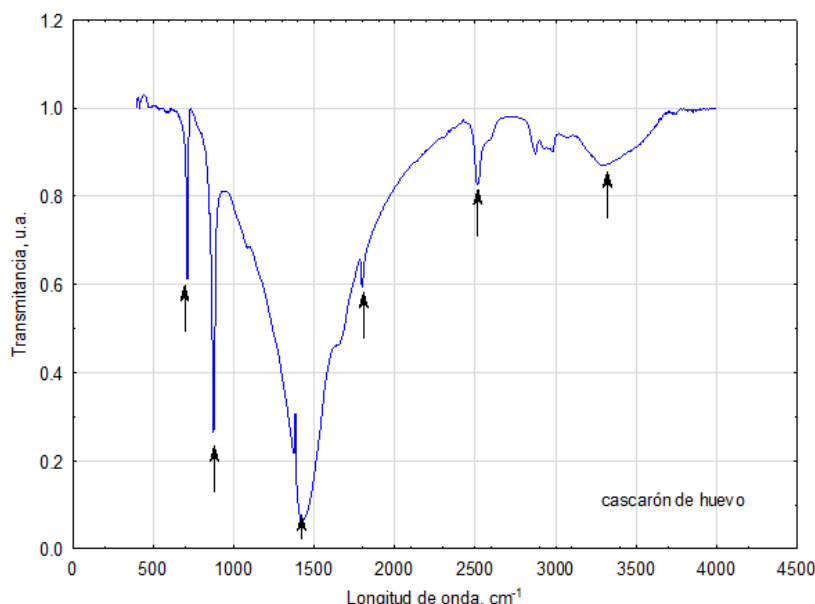


Figura 4. Diagrama de FTIR para el cascarón de huevo. (Fuente: Elaboración propia, 2025)

Los datos de equilibrio de adsorción para el plomo y cobre sobre cada uno de los bioadsorbentes se muestran en las Figuras 5 y 6. Cada uno de los equilibrios se interpretaron con el modelo de la isoterma de Langmuir con un porcentaje de desviación por arriba del 95 % en promedio.

Para el equilibrio de plomo sobre cada uno de los bioadsorbentes se observa que la capacidad de adsorción a una concentración de equilibrio de 15 mg/L es 3.2 veces más para el cascarón de huevo (ver Figura 5) que para la cáscara de naranja, esto puede ser debido a presencia de sitios básicos originados por el calcio presente en el cascarón de huevo, lo que puede favorecer una interacción electrostática entre el ion plomo y este tipo de sitios, también se puede deber a un posible intercambio iónico; en el caso del equilibrio sobre la cáscara de naranja esas interacciones solo se pueden dar en algunos sitios activos originados por la presencia de la lignina.

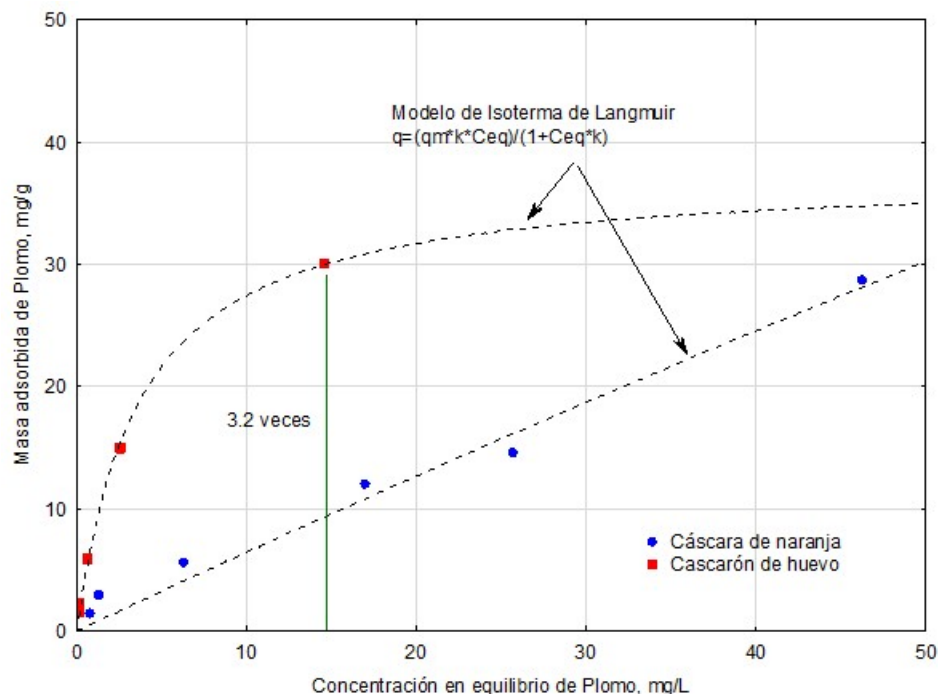


Figura 5. Isotherma de equilibrio de adsorción de plomo sobre bioadsorbentes a pH = 4 y T = 25 °C. (Fuente: Elaboración propia, 2025).

El equilibrio de adsorción para el ion cobre sobre los bioadsorbentes se muestra en la Figura 6, se observa que la máxima capacidad de adsorción para ambos materiales es de aproximadamente 15 mg de cobre por cada g de bioadsorbente, esto es debido a que no hay mucha afinidad electrónica entre el ión cobre y los sitios básicos del cascarón de huevo a comparación con lo que pasó con el ion plomo que se adsorbió 4 veces más a una concentración en equilibrio de 15 mg/L para ambos casos.

El porcentaje de remoción para los iones metálicos y los colorantes se muestran en la Figura 7, se observa que ambos bioadsorbentes son más selectivos en el siguiente orden $Pb > Cu > \text{Azul de Metileno} > \text{Naranja de Metilo}$, se puede ver que en el caso de los colorantes el porcentaje de remoción promedio esta entre el 15 y el 60 %, mientras que para los metales pesados es superior al 90 % de remoción.

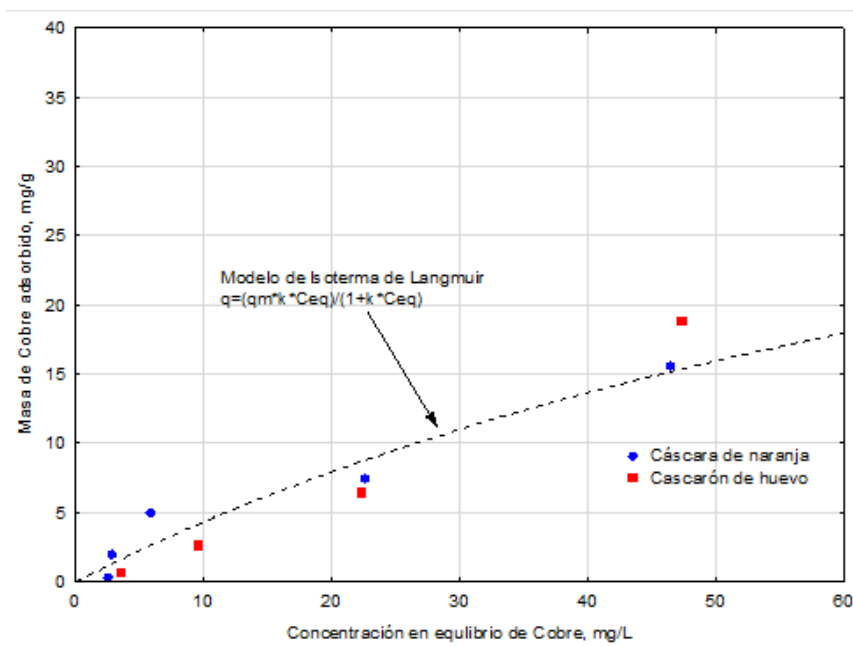


Figura 6. Isoterma de equilibrio de adsorción de cobre sobre bioadsorbentes a pH = 4 y T = 25 °C. (Fuente: Elaboración propia, 2025)

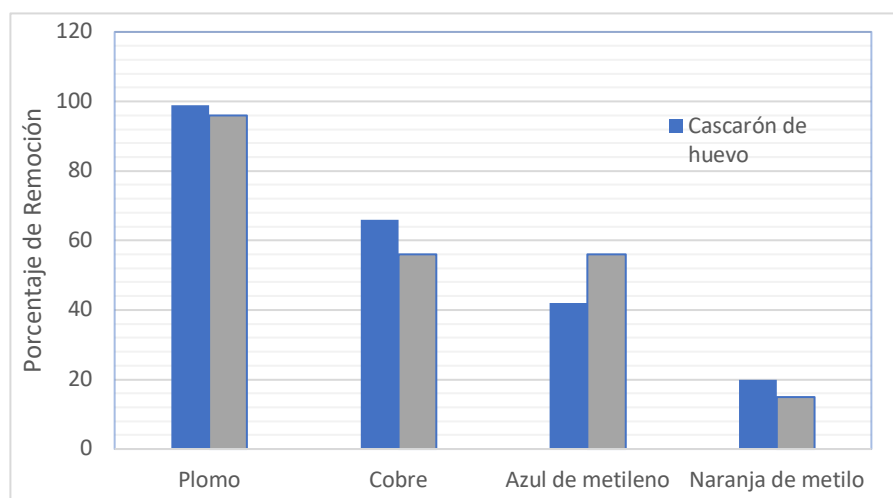


Figura 7. Porcentaje de remoción promedio de los bioadsorbentes para cada adsorbato en solución acuosa. (Fuente: Elaboración propia, 2025)

Conclusiones

La isoterma de Langmuir interpretó satisfactoriamente los datos de equilibrio de adsorción de plomo y cobre sobre cascarón de huevo y la cáscara de naranja.

La capacidad del cascarón de huevo para adsorber plomo aumentó 4 veces con respecto al cobre. Este comportamiento se atribuyó a las interacciones electrostáticas ya que a medida que se incrementó el pH de la solución se disminuyó la repulsión entre el plomo en solución y la superficie del cascarón de huevo.

La adsorción de aniones metálicos es mayor que la de los colorantes en solución acuosa sobre el cascarón de huevo debido a la interacción electrostática entre la carga negativa del metal y la carga positiva de la superficie del cascarón de huevo y los sitios activos de la cáscara de naranja.

Se observó que ambos bioadsorbentes son una opción en la remoción de compuestos tóxicos en agua como metales pesados y colorantes.

Bibliografía/Referencias

- Vargas Rodríguez, M., Cabañas Vargas, D., Gamboa Marrufo, M., & Domínguez Benetton, X. (2009). Evaluación del proceso de biosorción con cáscaras de naranja para la eliminación del colorante comercial Lanazol Navy CE en aguas residuales de la industria textil. *Ingeniería*, 13(3), 39-43. Universidad Autónoma de Yucatán. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/467/46712187005.pdf>
- Duany-Timosthe, Sara, Arias-Lafargue, Telvia, Bessy-Horruitiner, Taimi, & Rodríguez-Heredia, Dunia. (2022). Bioadsorbentes no convencionales empleados en la remoción de metales pesados. Revisión. *Tecnología Química*, 42(1), 94-113. Epub 30 de abril de 2022. Recuperado en 22 de julio de 2025, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852022000100094&lng=es&tlng=es.
- García Albornate, J., Barceló Quintal, D. I., Salazar Peláez, M. L., Solís Correa, H. E., Hernández Moreno, A., & López Chuken, U. J. (2015). *Remoción de Pb (II) utilizando mezclas de bagazo de lirio acuático (Eichhornia crassipes) y cáscara de huevo en un sistema acuoso*. Congreso Internacional de Docencia e Investigación en Química. Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. <https://zaloamati.azc.uam.mx/server/api/core/bitstreams/23ef48bf-24cc-457a-a552-bc40af636ce8/content>
- Miljan Marković, Milan Gorgievski, Nada Štrbac, Vesna Grekulović, Kristina Božinović, Milica Zdravković and Milovan Vuković. *Raw Eggshell as an Adsorbent for Copper Ions Biosorption—Equilibrium, Kinetic, Thermodynamic and Process Optimization Studies*. *Metales* 2023, 13 (2), 206. <https://doi.org/10.3390/met13020206>
- Guerra Hernández, J., & Espinoza Jarrin, J. (2025). Remoción de metales pesados en agua empleando bioadsorbentes magnéticos. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria En Nanociencias Y Nanotecnología*, 18(34), e69834. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2025.34.69834>