



Biorremediación de agua contaminada con metales pesados utilizando plumas de pollo en humedales de Ite, Tacna, Perú

Bioremediation of water contaminated with heavy metals using chicken feathers in the ite wetlands, Tacna, Perú

Gilma Lizbeth Chambe Caceres^{1*}; Dante Ulises Morales Cabrera²

¹ Escuela Profesional de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann de Tacna, Ciudad Universitaria Av. Miraflores s/n. Tacna, Perú.

² Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann de Tacna, Ciudad Universitaria Av. Miraflores s/n. Tacna, Perú.

ORCID de los autores:

G. L. Chambe Caceres: <https://orcid.org/0000-0002-6608-0459> D. U. Morales Cabrera: <https://orcid.org/0000-0002-0967-3207>

RESUMEN

Los objetivos planteados en el presente estudio fueron: 1) Determinar el efecto del tratamiento (plumas de pollos de engorde) a diferentes proporciones en la remoción de cobre, 2) Determinar el efecto del tratamiento (plumas de pollos de engorde) a diferentes proporciones en la remoción de hierro y 3) Estimar el grado de asociación entre la remoción de iones metálicos (cobre y hierro). Se realizó muestreo por conveniencia en 5 puntos, con 3 repeticiones y 3 tratamientos (control, 4 g/L y 8 g/L) respectivamente. Se aplicó la prueba estadística de ANOVA, prueba de Tukey y la correlación por Rho de Spearman. El tratamiento de dosis de 4 gramos de plumas/litro presentó una mayor remoción de cobre en 69,4%. Asimismo, el tratamiento de dosis de 4 gramos de plumas/litro también presentó una mayor remoción de hierro en un 93,1%. El grado de asociación entre la remoción de iones metálicos de cobre y hierro en base a plumas de pollo de engorde no es estadísticamente significativo. Las plumas de pollo son un adsorbente natural que demostró ser eficaz para remediar agua contaminada con metales pesados. Los biomateriales en base a la queratina tienen un enorme potencial en la biorremediación de agua contaminada con metales pesados.

Palabras clave: Adsorción; cobre; hierro; queratina; remoción; remediación.

ABSTRACT

The objectives of this study were: 1) to determine the effect of the treatment (broiler chicken feathers) at different proportions on copper removal, 2) to determine the effect of the treatment (broiler chicken feathers) at different proportions on iron removal, and 3) to estimate the degree of association between the removal of metal ions (copper and iron). Convenience sampling was performed at 5 points, with 3 replicates and 3 treatments (control, 4 g/L, and 8 g/L). Statistical analysis was performed using ANOVA, Tukey's test, and Spearman's rho correlation. The treatment with a dose of 4 grams of feathers/liter showed the greatest copper removal at 69.4%. Similarly, the same treatment also showed the greatest iron removal at 93.1%. The degree of association between the removal of copper and iron metal ions using broiler chicken feathers is not statistically significant. Chicken feathers are a natural adsorbent that has proven effective in remediating water contaminated with heavy metals. Keratin-based biomaterials have enormous potential in the bioremediation of water contaminated with heavy metals.

Keywords: Adsorption; copper; iron; keratin; removal; remediation.

1. Introducción

La contaminación de agua representa un problema serio que impacta tanto la salud humana como los ecosistemas naturales. Uno de los retos más importantes en la actualidad es limpiar las fuentes hídricas contaminadas con metales pesados, ya que muchos pobladores que se abastecen de estos ríos, pese a que la presencia de metales proviene principalmente de actividades humanas. Esta situación implica riesgos significativos para el ambiente, los ecosistemas y la salud pública (Pabón Guerrero et al., 2020). La crisis de la calidad de agua ha alcanzado niveles alarmantes, afectando a las comunidades que viven cerca de los cuerpos de agua contaminados con iones metálicos, lo cual también pone en peligro la biodiversidad local (Gómez-Duarte, 2018). Además, ciertos elementos químicos con alta densidad superior a 4 g/cm³, como el cobre y el hierro resultan muy tóxicos, incluso en concentraciones bajas aun en bajas concentraciones (Pabón Guerrero et al., 2020).

Las aves son especies de biomonitordeo de metales pesados y xenobióticos en función de su uso además se secuestran en el grupo sulfhidrilo de la queratina; los residuos de metal permanecieron resistentes al cambio en plumas más viejas, existe una alta incidencia de metales pesados en aves que habitan un bosque afectado en Ilara - Mokin en Nigeria (Bada & Taiwo, 2019). Además, en el lago de Chapala, se hallaron 3 especies locales de aves acuáticas (*Ardea alba*, *Egretta thula* y *Nycticorax nycticorax*), realizó análisis de metales en plumas con espectrometría con fuente de plasma de acoplamiento inductivo. Las plumas de aves acuáticas residentes mostraron ser un instrumento muy útil para el biomonitordeo de la contaminación por metales pesados (González et al., 2018). Aunque las plumas mostraron niveles bajos de correlación con tejidos internos y el cabello, ambos podrían ser útiles como herramientas de monitoreo biológico (Gil-jiménez et al., 2020). Así mismo, las aves marinas como el pelícano marrón oriental (*Pelecanus occidentalis*) también son susceptibles a la toxicidad de metaloides; el mercurio, el cadmio, el cobre, el arsénico y el selenio se midieron en las plumas de los pelícanos en varias colonias reproductoras donde resultó niveles elevados de contaminantes (Rossi et al., 2020).

La queratina constituye el 80% de la pluma, del grupo de las escleroproteínas, son insolubles en agua, aún en presencia de ácidos o bases diluidas (Pandey et al., 2019). La queratinasa es una

proteasa con el potencial de degradar sustratos queratinosos, según los hábitos de escisión, las proteasas se clasifican en dos grandes grupos. La primera son las denominadas endopeptidasas que escinden enlaces peptídicos no terminales dentro de las cadenas polipeptídicas, y la segunda son las exoproteasas que rompen enlaces peptídicos de los sustratos en el terminal carboxí o amino terminal (Florida Rofner, 2019). En este sentido, la bioadsorción puede considerarse como una tecnología de la interacción entre un sorbato (átomo, ion o molécula) y un biosorbente (superficie del agente biológico), lo que da como resultado la acumulación en la interfase sorbato-biosorbente, reduciendo así la concentración del sorbente en la solución (Ramírez et al., 2020).

En el contexto local, los humedales de Ite en la región de Tacna son el resultado de los relaves mineros, causando afectación del litoral marino en un espacio mayor de 1600 hectáreas aproximadamente (Churata Neira, 2019). Sin embargo, en 2002 aprovecharon el agua para cubrir completamente los relaves mineros y se dio la formación de los espejos de aguas cubiertas de grandes vegetaciones dando lugar a los humedales de Ite. Actualmente, la bahía de Ite es uno de los lugares donde se reúnen abundantes poblaciones de aves transitorias en el Perú. Así mismo crías de animales domésticos al pastoreo, especialmente bovinos, ovejas y cabras, los mismos que se pastorean ingiriendo agua y forrajes contaminados por iones metálicos pudiendo tener influencia sobre la salud pública. Por otro lado, es importante señalar que la carne de pollo es uno de los principales alimentos proteicos de consumo diario en el Perú, según datos estadísticos se consumió 1'626'265,00 toneladas de carne de pollo, es decir un habitante por año consume 43,73 kg de carne de pollo durante el año 2020 (Inoñán & Ballvé, 2020). Si relacionamos al beneficio de pollo las estadísticas indican que la pluma de pollo es un subproducto que representa el 5,5% de residuos producto del faenamiento de aves (Florida Rofner, 2019). El desenlace indica que estamos siendo conscientes de la magnitud de desechos que debieran reutilizarse por mes, luego por año en actividades adicionales, en nuestro caso la biorremediación ambiental es una alternativa coherente.

Finalmente, la contaminación de los humedales de Ite en Tacna, por la presencia de metales pesados debido a relaves mineros es una problemática que se quiere bioremediar, por lo cual buscamos alternativas de remoción de manera adecuada. El objetivo general es analizar

los efectos del uso de plumas de pollo de engorde a diferentes proporciones para remover cobre y hierro en aguas contaminadas de los humedales del distrito de Ite.

2. Metodología

Ubicación del estudio

Los humedales de Ite, Tacna - Perú, es el segundo más grande de Sudamérica, está ubicada a 95 km noreste de la ciudad de Tacna, camino al Puerto de Ilo, por la vía costanera, es el principal atractivo en fauna y flora que ofrece la naturaleza, en el distrito de Ite. Presenta una ubicación de Norte: 17°53'17"S, 70°59'17"O a 2 msnm.

Diseño de experimentación

En el estudio se tomó la referencia de un cuadrante de 1000 m² del humedal de Ite, Tomando las muestras por conveniencia, cada muestra constituye 1 litro de agua por cada vértice del cuadrante y un punto de muestreo central, haciendo un total de 5 puntos de muestreo con 3 repeticiones y 3 tratamientos (Figura 1). Los cuales se describen de la siguiente manera: T1 (4

gramos de pluma/litro de agua), T2 (8 gramos de pluma/litro de agua) y un tratamiento control.

Material biológico de experimentación

Las plumas de pollos de engorde se obtuvieron de un centro de faenamiento de aves, ubicado en el distrito Gregorio Albarracín Lanchipa (Figura 2). Estas plumas fueron seleccionadas y lavadas, para luego ser secadas al sol por 3 días.



Figura 2. Plumas de pollos de engorde (Cobb 500).
Figure 2. Broiler chicken feathers (Cobb 500).



Figura 1. Imágenes del muestreo de agua (5 puntos de muestreo).

Figure 1. Images of water sampling (5 sampling points).

Procedimiento de experimentación

Las plumas limpias se trasladaron al laboratorio de Salud Pública y Saneamiento Ambiental de la Carrera de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la UNJBG, donde se realizó la trituración de las plumas para lograr una formación algodonosa en vez de harina con el molino eléctrico modelo Dual 3HP. Esto debido a la sustancia plástica de la sustancia llamada queratina que recubre las plumas de las aves.

Se realizó viajes al Distrito de Ite, para la toma de muestras de agua de los humedales en los 5 puntos de muestreo (5 muestras de 1 L de agua). Luego, se realizó una segunda y una tercera toma de muestra haciendo un total de 3 repeticiones en los 5 puntos de muestreo en la zona de estudio.

Posteriormente, de manera experimental en el laboratorio de Salud Pública y Saneamiento Ambiental de la Carrera de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la UNJBG, se procedió a realizar el monitoreo de la biorremediación por 24 horas.

Posteriormente, las muestras fueron colocadas en frascos de polietileno de 60 ml de capacidad, así mismo, se adicionó 0,3 ml de solución preservante (HNO₃ 1:1) a cada frasco, se cerraron herméticamente los frascos, se hizo el llenado del rotulo con plumón de tinta indeleble y se envió al laboratorio acreditado SGS Perú para su análisis mediante el método EW_EPA200_8_AQ, referencia técnica utilizada en análisis de calidad de agua, es un procedimiento estandarizado por la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. para la determinación de elementos traza en muestras de agua y residuos, utilizando espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) cuyo uso fue agua de consumo humano y agua de laguna artificial.

3. Resultados y discusión

Efecto de las plumas de pollo en la remoción de cobre (Cu)

En la Tabla 1 se evidencia un mayor porcentaje de remediación en el tratamiento 1 (de 4 gramos de pluma de pollo de engorde/litro de agua) en un 69,46% lo que indica una remediación moderada.

Tabla 1
Porcentaje de biorremediación de Cu

Table 1
Percentage of Cu bioremediation

Plumas de pollo de engorde	T1 (4 gramos/litro)	T2 (8 gramos/litro)
Total	69,46%	56,94%

Se encontró influencia significativa de los tratamientos y de los bloques sobre la concentración de cobre ($p < 0,05$), sin embargo, no existió una interacción significativa entre los tratamientos y los bloques ($p > 0,05$) sobre la concentración de cobre (Figura 3).

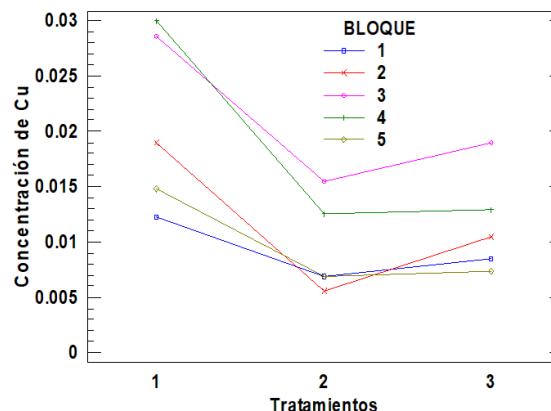


Figura 3. Interacciones de la remoción del cobre a diferentes concentraciones de pluma de pollos de engorde.

Figure 3. Interactions of copper removal at different concentrations of broiler chicken feathers.

Se evidencia que las concentraciones de cobre en el grupo (control) disminuyen más con el tratamiento 1 (4 g /L), que al emplear el tratamiento 2 (8 g/L) (Figura 3).

Respecto a los límites máximos permisibles de cobre no supera los límites establecidos por la OMS (2,5 mg/L), además de la legislación peruana del Decreto Supremo N°004-2017-MINAM (2017) y el Decreto Supremo N°031-2010-SA (2010). Siendo la dosis máxima de 0,036 mg/L y la dosis mínima de 0,005 mg/L en el presente estudio (MINAM-PERÚ, 2017; MINAN-PERÚ, 2010).

Estos resultados presentan similitud con los hallazgos de Machuca-Loja et al. (2016), quienes obtuvieron las queratinas de las plumas de ave con hidrolisis enzimática utilizando *Bacillus subtilis* con un ($p < 0,05$) al cabo de 24 h. de retención hidráulica. También se encuentra similitud con los resultados encontrados por Polo et al. (2023). En donde indica que las plumas retienen metales, llegando hasta 20 filtraciones, con una remoción final de cobre de 93,3% (Polo Salazar et al., 2023). Luego Chakraborty y sus colaboradores (2020) modificaron las plumas de pollo utilizando etilendiamina para la eliminación de iones de cobre en agua contaminada con metales hasta una concentración de 20 mg/L, con una remoción de 98,9%. (Chakraborty et al., 2020). Asimismo, Kai & Misra (2020) y Zubair

(2023) sostienen que la pluma de pollo alcalina tratada ultrasónicamente logró una remediación de Cu de 3,25 mg (Rahmani-Sani et al., 2020). Luego, Al-Asheh (2020), obtuvo partículas de pluma de pollo tratadas con NaOH y dodecil sulfato con una remoción de Cu del 100%. Así también, la eliminación de Cu en aguas residuales utilizando polímeros derivados de queratina alcanzó un 73% de remoción (Zahara et al., 2021). A su vez, los nanoquitosano pueden producir interacciones electrostáticas con redes poliméricas que realizan una eficiente remoción de Cu en aguas contaminadas, hasta en un 80% a 85% de eficiencia en la remoción (Zahara et al., 2021). Luego, en la región central de China, los resultados indicaron que la garza real, que se alimenta de peces pequeños y camarones en el río Shan Pui y Gei Wai estaban expuesto a un riesgo potencial para la salud por Cu y Pb para el andarríos bastardo se debió a la alta concentración de Cu en sus presas, que contribuyeron con el 84,9% de remediación (Man et al., 2021). Por otro lado, en Corea se describe concentraciones altas de Cu en las plumas puede ir variando según su posición, se encontró una concentración de 0,21 ppm en plumas primarias, 0,15 ppm en plumas secundarias, de 0,13 ppm en plumas terciarias, de 0,22 ppm en plumas de la cola y 0,20 ppm en plumas de contorno respectivamente. Lo cual indica que la remoción de Cu por plumas de aves es eficiente (Sheikh et al., 2023). Finalmente, la queratina que envuelve las plumas de las aves a un PH bajo de 3 a 6 resulta eficiente para la eliminación de aniones metálicos en solución (Saha et al., 2019).

Sin embargo, los resultados muestran discordancia con los hallazgos de Rahmani-Sani (2020), quien indica en una malla a base de pluma de pato la remoción del Cu solo alcanzó un 41%. Asimismo, los patrones de acumulación y dispersión de metales en especies aviares constituyen información útil obtenida del análisis de las concentraciones de metales en diversos tipos de plumas (Sheikh et al., 2023).

Por otro lado, si la remoción de cobre con relación a otros métodos de remediación, Liu et al. (2023) indican que los residuos agroindustriales lograron una remoción de cobre en agua del 89%. Asimismo, otro tratamiento efectivo en aguas residuales con metales pesados es mediante el uso de nanoadsorbentes como una técnica de adsorción novedosa, no tóxica y rentable, con una remoción de cobre mayor al 90% (Emenike et al., 2022). Luego, Ab Hamid et al. (2022) indican que otros métodos de remediación son la ultrafiltración

puede remover iones de cobre en un 95% a 98% a diferencia de la nanofiltración que alcanza una remoción de 98% a 99% respectivamente. Por otro lado, la optimización de la electrocoagulación en la remoción de cobre puede alcanzar un 80,22% de eficiencia (Ano et al., 2023). Todos estos resultados son superiores a los hallados en el presente estudio.

Efecto de las plumas de pollo en la remoción de hierro (Fe)

En la Tabla 2 se evidencia un mayor porcentaje de remediación en el tratamiento 1 (de 4 gramos de pluma de pollo de engorde/litro de agua) en un 93,19% lo que indica una remediación alta.

Tabla 2

Porcentaje de biorremediación de Fe

Table 2

Percentage of Fe bioremediation

Plumas de pollo de engorde	T1 (4 gramos/litro)	T2 (8 gramos/litro)
Total	93,19%	86,02%

Se evidenció que existen diferencias significativas entre las concentraciones de hierro del tratamiento 1 y el tratamiento 2 respecto al grupo control. Sin embargo, no existieron diferencias entre ellos. Por otro lado, se evidencia la existencia de diferencias entre las concentraciones de hierro en los bloques 1 y 5 respecto al bloque 4 en cuanto a la concentración de hierro estimada. Además, no existieron diferencias en las concentraciones de hierro entre los bloques 1, 4 y 5 respecto al bloque 2 y 3 (Figura 4).

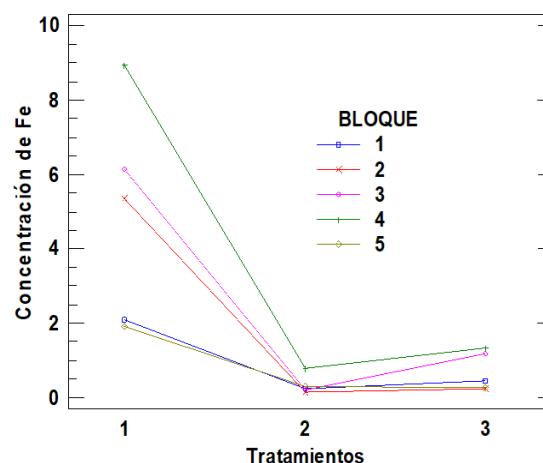


Figura 4. Interacciones de la remoción del hierro a diferentes concentraciones de pluma de pollos de engorde.

Figure 4. Interactions of iron removal at different concentrations of broiler chicken feathers.

Las concentraciones de hierro en el grupo (control) disminuyen más con el tratamiento 1 (4 g/L), que al emplear el tratamiento 2 (8 g/L).

Respecto a los límites máximos permisibles de hierro si supera los límites establecidos por la OMS (0,30 mg/L), además de la legislación peruana del Decreto Supremo N°004-2017-MINAM (2017) y el Decreto Supremo N°031-2010-SA (2010). Siendo la dosis máxima de 11,8 mg/L y la dosis mínima de 0,87 mg/L en el presente estudio (MINAM-PERÚ, 2017; MINAN-PERÚ, 2010). Asimismo, los resultados luego de la aplicación de los tratamientos a base de plumas muestran una eficiente remoción del hierro, por debajo de los LMP en ambos tratamientos de la experimentación. Por lo cual, se puede indicar que la pluma es un excelente remediador de iones de hierro. Estos resultados tienen similitud con los hallados por Chakraborty et al. (2020) quienes indican una capacidad máxima de adsorción de 43,5 mg/g. con una remoción de 98,7% de hierro. También con los hallazgos de Polo Salazar et al. (2023), en donde indican que las plumas retienen metales, llegando hasta 14 filtraciones, con una remoción final de hierro de 97,8%. Además, Masoumi et al. (2022) indican que las plumas de pollo se componen de un 80% a un 90% de β -queratina, una proteína fibrosa, por lo cual la remediación del hierro es eficiente. Asimismo, Guillen Rivas et al. (2021) indican que las nuevas tecnologías presentan resultados atrayentes y pueden ser de gran beneficio según el medio donde se pretende desarrollar el proceso de remoción. Los resultados de este estudio muestran discordancia con los hallazgos de Sayen et al. (2005) y Zubair (2023) quienes indican que la filtración con una partícula de aminoácido de queratina sílice inmovilizada alcanzo una remoción de 72% a 94% de hierro. También, Cárdenas & Flores (2022) indican a la cáscara de plátano transformada en carbón activado reduce 0,79 mg/L. de hierro, con una remoción de 72% respectivamente. Por otro lado, Olano-Arévalo et al. (2023) reportaron hallazgos de remoción de 0,16 mg/L, utilizando sulfato de aluminio al 1% como dosis optima, indicando que la Montmorillonite proveniente de la arcilla procesado termina siendo un buen removedor de hierro en un 80% de las soluciones acuosas.

Además, Carrasco et al. (2022) indican hallazgos de remoción de iones de hierro usando granos de trigo en desecho de cervecería alcanzando una doble eficiencia en la adsorción de 0,2 mg/L, en comparación con otros como son los iones de manganeso, cadmio y níquel respectivamente.

Luego, Wang et al. (2022) reportaron hallazgos de remoción de iones de hierro en una tasa máxima de 54,13% luego del uso de microalgas de la especie *Microcystis aeruginosa* al cuarto día de tratamiento. Todos estos porcentajes de remediación de hierro se encuentran por debajo de los porcentajes reportados en el presente estudio.

Grado de asociación entre la remoción de iones metálicos (cobre y hierro) con plumas de pollo de engorde.

Se encontró que las remociones de hierro y cobre empleando 4 y 8 gramos de plumas de pollo de engorde no siguen una distribución normal con un 95% de confianza ($p < 0,05$), por lo que corresponde el uso de una estadística no paramétrica de correlación, es decir Rho de Spearman.

Se encontró una baja correlación (Rho: 0,45) y no significativa ($p = 0,092 > 0,05$) entre los niveles de remoción de hierro y cobre, utilizando el tratamiento de 4 gramos de plumas de ave/litro de agua. Asimismo, se encontró una baja correlación (Rho: 0,225) y no significativa ($p = 0,420 > 0,05$) entre los niveles de remoción de hierro y cobre, utilizando el tratamiento de 8 gramos de plumas de ave/litro de agua.

En lo que se refiere a otros estudios, Sheikh et al. (2023) indican que existe correlación entre los distintos atributos de las plumas: Primarias, Secundarias, Terciarias, Rectrices y Contorno. El atributo Primarias muestra una fuerte correlación positiva (aprox. 0,999) con las Secundarias, lo que indica un alto grado de similitud entre estas dos características. Las Terciarias presentan correlaciones positivas sustanciales con las Primarias (aprox. 0,976) y las Secundarias (aprox. 0,967), lo que indica asociaciones significativas entre las Terciarias y estos atributos próximos. Las Rectrices presentan correlaciones positivas pronunciadas con las Primarias (aprox. 0,998), las Secundarias (aprox. 0,994) y las Terciarias (aprox. 0,989), lo que subraya la robusta interrelación entre estas características. Contorno muestra correlaciones positivas apreciables con Primarias (aprox. 0,973), Secundarias (aprox. 0,981) y Rectrices (aprox. 0,954), lo que sugiere conexiones potenciales entre Contorno y estos atributos respectivos.

Por otro lado, los desechos de plumas de aves de corral también se pueden aplicar al sector de la remediación ambiental y la eliminación de la contaminación (Zhang et al., 2023). Las observaciones realizadas con el carbón activado

producido a partir de plumas de aves de corral actuaron como un adsorbente altamente eficaz, con una eficiencia de eliminación que aumentó con el aumento de la concentración del adsorbente llegando al 97% de remoción de metales pesados en aguas residuales del lago Chivero (Chiramba et al., 2019). Además, Masoumi et al. (2022) indican que el tiempo de contacto de equilibrio para el cobre y el hierro se determina en 60 y 40 minutos respectivamente. Por lo tanto, la separación de partículas metálicas por la pluma de pollo es rápida. En tal sentido, el área superficial genera los posibles sitios activos para atrapar las partículas, y los grupos funcionales más efectivos pueden formar complejos con más iones metálicos del agua contaminada. El mecanismo de adsorción se divide en cuatro categorías: 1) interacción electrostática; 2) llenado de poros; 3) precipitación en la superficie del adsorbente; y 4) conexión de cationes con los grupos funcionales de la pluma de pollo.

4. Conclusiones

Las plumas de pollo son un adsorbente natural que demostró su eficiencia en la adsorción de materiales inorgánicos. El tratamiento con una dosis de 4 gramos de plumas/litro de agua, presentó una mayor remoción de cobre en 69,4%, lo cual constituye, un efecto considerado biorremediación moderada. Así mismo, el tratamiento con una dosis de 4 gramos de plumas/litro de agua, presentó una mayor remoción de hierro en un 93,1%, lo cual constituye un efecto de biorremediación alto.

El grado de asociación entre la remoción de iones metálicos de cobre y hierro en base a plumas de pollo de engorde no es estadísticamente significativo; esto debido a que la eficiencia de la remediación se presentó de manera independiente entre ambos metales pesados. Asimismo, este estudio proporciona una base tecnocientífica sobre el potencial de la queratina en la biorremediación usando un producto de desecho, como es la pluma de pollo de engorde. Finalmente, se recomienda la elaboración de un prototipo en base a queratina extraída de plumas de pollos con la finalidad de realizar estudios adicionales al porcentaje de remediación de otros metales pesados peligrosos a la salud pública y al medio ambiente.

Agradecimientos

Expresamos nuestro agradecimiento al personal del laboratorio SGS por brindar las facilidades para el desarrollo de la investigación.

Referencias bibliográficas

Ab Hamid, N. H., bin Mohd Tahir, M. I. H., Chowdhury, A., Nordin, A. H., Alshaikh, A. A., Suid, M. A., Nazaruddin, N. 'Izzah, Nozaizeli, N. D., Sharma, S., & Rushdan, A. I. (2022). The Current State-Of-Art of Copper Removal from Wastewater: A Review. *Water*, 14(19), 3086. <https://doi.org/10.3390/w14193086>

Ano, J., Koné, H., Yapo, N. S., Drogui, P., Yao, K. B., & Adouby, K. (2023). Removal of copper and lead by electrocoagulation process: effects of experimental parameters and optimization with full factorial designs. *J. Mater. Environ. Sci.*, 14(2), 173-183.

Bada, A. A., & Taiwo, C. O. (2019). Incidence of heavy metals in feathers of birds in a human - impacted forest , south - west Nigeria. *African Journal of Ecology*, 57(4), 599-603. <https://doi.org/10.1111/aje.12635>

Cárdenes, E M. L., & Flores T. G. M. L. (2022). Efecto del carbón activado de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca* variedad hartón) en la remoción de hierro total del agua del subsuelo de la Universidad Nacional de Ucayali. Ucayali, Perú.

Carrasco, K. H., Höfgen, E. G., Brunner, D., Borchert, K. B. L., Reis, B., Steinbach, C., Mayer, M., Schwarz, S., Glas, K., & Schwarz, D. (2022). Removal of Iron, Manganese, Cadmium, and Nickel Ions Using Brewers' Spent Grain. *Polysaccharides*, 3(2), 356-379. <https://doi.org/10.3390/polysaccharides3020021>

Chakraborty, R., Asthana, A., Singh, A. K., Yadav, S., Susan, M. A. B. H., & Carabineiro, S. A. C. (2020). Intensified elimination of aqueous heavy metal ions using chicken feathers chemically modified by a batch method. *Journal of Molecular Liquids*, 312, 113475. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113475>

Chiramba, R., Charis, G., Fungura, N., Danha, G., & Mamvura, T. (2019). Production of activated carbon from poultry feathers for waste water treatment. *Water Science and Technology*, 80(8), 1407-1412. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.388>

Churata Neira, A. (2019). Historia de la contaminación de la bahía de Ite por la empresa minera Southern Perú. *La Vida & La Historia*, 10, 70-79. <https://doi.org/10.3326/26176041.2019.10.874>

Contreras, L. (2019). La Contaminación por Hierro - Plomo y su afectación en parámetros de Calidad del Agua en el río Chillón, estación San Diego. Universidad Ricardo Palma.

Covre, W. P., Ramos, S. J., Pereira, W. V. da S., Souza, E. S. de, Martins, G. C., Teixeira, O. M. M., Amarante, C. B. do, Dias, Y. N., & Fernandes, A. R. (2022). Impact of copper mining wastes in the Amazon: Properties and risks to environment and human health. *Journal of Hazardous Materials*, 421, 126688. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126688>

Emenike, E. C., Adeniyi, A. G., Omukuru, P. E., Okwu, K. C., & Iwuozor, K. O. (2022). Recent advances in nano-adsorbents for the sequestration of copper from water. *Journal of Water Process Engineering*, 47, 102715. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2022.102715>

Gil-jiménez, E., Mateo, R., Lucas, M. De, & Ferrer, M. (2020). Feathers and hair as tools for non-destructive pollution exposure assessment in a mining site of the Iberian Pyrite Belt. *Environmental Pollution*, 263, 114523. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114523>

Gómez-Duarte, O. G. (2018). Contaminación del agua en países de bajos y medianos recursos, un problema de salud pública. *Revista Facultad de Medicina*, 66(1), 7-8. <https://doi.org/10.15446/revfacmed.v66n1.70775>

González, D., Álvarez Bernal, D., Mora, M., Buelna-Osben, H. R., & Ruelas-Insunza, J. R. (2018). Biomonitorio de metales pesados en plumas de aves acuáticas residentes del Lago de Chapala, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34(2), 215-224. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.02.03>

Guillen Rivas, J. R., Jaramillo-Cedeño, A. Z., & Córdova-Mosquera, R. A. (2021). Estudio de los Procesos de Remoción de Hierro y Manganese en aguas subterráneas: una revisión. *Polo del Conocimiento*, 6(9), 1384-1407.

Haziri, I., Latifi, F., Rama, A., & Zogaj, M. (2019). assessment of environmental pollution with metals in some industrial regions of Kosovo using chicken (*Gallus gallus* Domesticus) breast feathers. *Slovenian Veterinary Research*, 56(3), 93-103. <https://doi.org/10.26873/SVR-553-2019>

Hermogenes, B. A., & Josec, C. (2019). Efectos tóxicos de los metales pesados sobre la flora, fauna y la salud humana en el

Perú. Trabajo De Suficiencia Profesional. Universidad Nacional del Altiplano Facultad de Ingeniería de Minas.

Inoñán, H., & Ballvé, E. C. (2020). Boletín estadístico mensual de la producción y comercializados de productos avícolas 2020. MIDAGRI. Perú.

Kelly-vargas, K., Cerro-lopez, M., Reyna-tellez, S., Bandala, E. R., & Sanchez-salas, J. L. (2012). Biosorption of heavy metals in polluted water , using different waste fruit cortex. *Physics and Chemistry of the Earth*, 37-39, 26-29. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.03.006>

Li, C., Zhou, K., Qin, W., Tian, C., Qi, M., Yan, X., & Han, W. (2019). A Review on Heavy Metals Contamination in Soil: Effects, Sources, and Remediation Techniques. *Soil and Sediment Contamination*, 28(4), 380-394. <https://doi.org/10.1080/15320383.2019.1592108>

Liu, Y., Wang, H., Cui, Y., & Chen, N. (2023). Removal of Copper Ions from Wastewater: A Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(5), 3885. <https://doi.org/10.3390/ijerph20053885>

Machuca-Loja, G., Madrid Celi, B. A., SanMartin Galvan, D., & Perez Rodriguez, J. (2016). Queratina a partir de la hidrólisis enzimática de harina de plumas de pollo, utilizando queratinas producidas por *Bacillus subtilis* / Getting keratin from feather meal using keratinases produced by *Bacillus subtilis*. *Ciencia Unemi*, 9(20), 50-58. <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol9iss20.2016pp50-58p>

Man, Y. B., Chow, K. L., Zhang, F., Lei, K. M., Leung, A. O. W., Mo, W. Y., & Wong, M. H. (2021). Protecting water birds of wetlands: Using toxicological tests and ecological risk assessment, based on metal/loid (s) of water, sediment and biota samples. *Science of the Total Environment*, 778, 146317. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146317>

Masoumi, H., Ghaemi, A., & Ghanadzadeh Gilani, H. (2022). Surveying the elimination of hazardous heavy metal from the multi-component systems using various sorbents: a review. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 20(2), 1047-1087. <https://doi.org/10.1007/s40201-022-00832-z>

MINAM-PERÚ. (2017a). DS N°004-2017-MINAM: Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen disposiciones complementarias. El Peruano, 6-9.

MINAM-PERÚ. (2017b). DS N°004-2017-MINAM. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen disposiciones complementarias. El Peruano, 6-9.

MINAN-PERÚ. (2010). Decreto Supremo N°010-2010-MINAM. Aprueban Límites Máximos Permisibles para descarga de efluentes líquidos de actividades Minero - Metalúrgicas. In El Peruano (p. 4).

Florida Rofner, N. (2019). Plumas: Implicancia ambiental y uso en la industria agropecuaria. *Revista De Investigaciones*, 21(3), 225-237.

Olano-Arévalo, Roydchan, Tuesta-Casique, Angel, & Belén, A.-A. (2023). Efecto de coagulación-flocculación en remoción del hierro y manganeso en acuífero. *Rev. Amaz. Cienc. Ambient. Ecol.*, 2(1), e464. <https://doi.org/10.51252/reacae.v2i1.e464>

Ramírez, O., Abdeldayem, O. M., Pugazhendhi, A., & Rene, E. R. (2020). Current Updates and Perspectives of Biosorption Technology: an Alternative for the Removal of Heavy Metals from Wastewater. *Curr. Pollution Rep.*, 6, 8-27. <https://doi.org/10.1007/s40726-020-00135-7>

Pabón Guerrero, S. E., Benítez Benítez, R., Sarria Villa, R. A., & Gallo Corredor, J. A. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9-18. <https://doi.org/10.31908/19098367.1734>

Pandey, S. C., Pande, V., Sati, D., & Gangola, S. (2019). Microbial keratinase : a tool for bioremediation of feather waste (Issue September). Chapter 13. *Smart Bioremediation Technologies: Microbial Enzymes*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818307-6.00013-5>

Pastor, F., Alzamora, A., Mendoza, G., Monteza, D., & Rosales, R. (2018). Diseño Del Proceso Productivo De Harina a Base De Plumas De Pollo En La Empresa Distribuidora Avícola El Galpón E.I.R.L. Universidad de Piura.

Rahmani-Sani, A., Singh, P., Raizada, P., Claudio Lima, E., Anastopoulos, I., Giannakoudakis, D. A., Sivamani, S., Dontsova, T. A., & Hosseini-Bandegharaei, A. (2020). Use of chicken feather and eggshell to synthesize a novel magnetized activated carbon for sorption of heavy metal ions. *Bioresource Technology*, 297, 122452. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122452>

Polo Salazar, R., Figueiroa Cruz, M., Leyva Collas, M., & Tuya Cerna, B. (2023). Uso de plumas de pollo como medio filtrante para la remoción de metales pesados en aguas ácidas. *Hatun Yachay Wasi*, 3(1), 77-85. <https://doi.org/10.57107/hyw.v3i1.59>

Rossi, R., Lamb, J., Janssen, S., Satgé, Y., & Jodice, P. (2020). Mercury, cadmium, copper, arsenic, and selenium measurements in the feathers of adult eastern brown pelicans (*Pelecanus occidentalis carolinensis*) and chicks in multiple breeding grounds in the northern Gulf of Mexico. *Environ Monit Assess*, 192, 286. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8237-y>

Saha, S., Zubair, M., Khosa, M. A., Song, S., & Ullah, A. (2019). Keratin and Chitosan Biosorbents for Wastewater Treatment: A Review. *Journal of Polymers and the Environment*, 27(7), 1389-1403. <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01439-6>

Sheikh, M. A., Abbasi, N. A., Mustafa, G., Zaman, M. H., Majid, M., & Ahmad, S. R. (2023). Non-Invasive bio-monitoring investigation of toxic trace elements in remiges (flight), contours (body), and rectrices (tail) feathers in *bubulcus ibis* (Cattle egrets). *Pakistan Journal of Science*, 75(3), 672-683.

Wang, M., Gui, H., Chen, J., Li, C., Wang, C., Chen, C., Zhao, C., & Li, Y. (2022). Experimental Study on Removal of Iron, Manganese and Copper from Water by Microalgae. *Polish Journal of Environmental Studies*, 31(2), 1847-1855. <https://doi.org/10.15244/pjoes/142483>

Zahara, I., Arshad, M., Naeth, M. A., Siddique, T., & Ullah, A. (2021). Feather keratin derived sorbents for the treatment of wastewater produced during energy generation processes. *Chemosphere*, 273, 128545. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128545>

Zhang, L., Ren, J., & Bai, W. (2023). A Review of Poultry Waste-to-Wealth: Technological Progress, Modeling and Simulation Studies, and Economic- Environmental and Social Sustainability. *Sustainability*, 15(7), 5620. <https://doi.org/10.3390/su15075620>

Zubair, M. (2023). Feather Keratin Derived Sustainable Biosorbents for Adsorption of Heavy Metal Ions from Water. Thesis Doctor of Philosophy in Bioresource Technology. Department of Agricultural, Food and Nutritional Science. University of Alberta. <https://doi.org/10.7939/r3-r3vf-z508>