



Efectividad de los tratamientos de quitosano y biocarbón en el Cromo VI, Boro y Aluminio

Effectiveness of chitosan and biochar treatments on Chromium VI, Boron and aluminum

Eficácia dos tratamentos com quitosana e biochar em cromo VI, boro e alumínio

ARTÍCULO ORIGINAL



Escanea en tu dispositivo móvil
o revisa este artículo en:
<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v9i26.386>

Fernando Antonio Sernaque Aucchuasi¹
fsernaque@unfv.edu.pe

Samuel Carlos Reyna Mandujano²
sreynam@unfv.edu.pe

Karina Ines Hinojosa Pedraza²
khinojosa@unfv.edu.pea

¹Conservación Ecológica, Socio Ambiental y Divulgación Científica-CECOSAM,
Universidad Nacional Federico Villarreal. Lima, Perú

²Universidad Nacional Federico Villarreal. Lima, Perú

Artículo recibido: 4 de marzo 2025 / Arbitrado: 21 de abril 2025 / Publicado: 1 de mayo 2025

RESUMEN

El presente estudio tuvo por objetivo evaluar la eficiencia de los tratamientos con quitosano y biocarbón en los metales cromo VI, boro y aluminio en disolución acuosa. Se realizó un tratamiento de 3 réplicas variando el pH (3, 7, 11), dosis (0.1, 0.5, 1) y tiempo de contacto en minutos (45, 80, 120). Se encontró que las eficiencias del quitosano y biocarbón son significativas, logrando en el caso del cromo VI que de la concentración inicial de 31,8235 g/L, el biocarbón logró reducir a 21,69 g/L, el quitosano logró reducir la concentración a 18,68 g/L. Para el boro, la concentración inicial fue de 21,9246 g/L. El biocarbón logró reducir esta concentración a 11,42 g/L. En cambio, el quitosano logró reducir la concentración a 8,07 g/L. Finalmente, en el caso del aluminio, la concentración inicial fue de 29,3318 g/L. El biocarbón logró reducir esta concentración a 21,03 g/L y el quitosano logró reducir la concentración a 10,61 g/L. Los resultados de las condiciones que optimizan la efectividad del quitosano y biocarbón fueron a un pH 7 a una dosis de biocarbón que varía entre 0,5-1 g/L, mientras que la dosis de quitosano oscila entre 0,1-1 g/L. Asimismo, se ha encontrado que el tiempo de contacto óptimo se encuentra en el rango de 45-120 minutos. Finalmente, los adsorbentes naturales demostraron ser efectivos en la remoción de cromo VI, boro y aluminio; en el caso del cromo VI, el biocarbón logra una eficiencia máxima del 31,839 %, el quitosano alcanza una eficiencia del 42,905 %.

Palabras clave: Quitosano; Biocarbón; Cromo VI; Boro; Aluminio

ABSTRACT

The present study aimed to evaluate the effectiveness of chitosan and biochar treatments on the metals chromium VI, boron, and aluminum in aqueous solution. A three-replicate treatment was carried out, varying the pH (3, 7, 11), dosage (0.1, 0.5, 1), and contact time in minutes (45, 80, 120). The efficiencies of chitosan and biochar were found to be significant. In the case of chromium VI, the initial concentration of 31.8235 g/L was reduced by biochar to 21.69 g/L, while chitosan was able to reduce the concentration to 18.68 g/L. For boron, the initial concentration was 21.9246 g/L. Biochar was able to reduce this concentration to 11.42 g/L. In contrast, chitosan was able to reduce the concentration to 8.07 g/L. Finally, in the case of aluminum, the initial concentration was 29.3318 g/L. Biochar managed to reduce this concentration to 21.03 g/L and chitosan managed to reduce the concentration to 10.61 g/L. The results of the conditions that optimize the effectiveness of chitosan and biochar were at pH 7 at a biochar dose ranging between 0.5-1 g/L, while the chitosan dose ranged between 0.1-1 g/L. Likewise, it has been found that the optimal contact time is in the range of 45-120 minutes. Finally, natural adsorbents proved to be effective in the removal of chromium VI, boron and aluminum; in the case of chromium VI, biochar achieves a maximum efficiency of 31.839 %, chitosan reaches an efficiency of 42.905 %.

Key words: Chitosan; Biochar; Chromium VI; Boron; Aluminum

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo avaliar a eficácia dos tratamentos com quitosana e biochar sobre os metais cromo VI, boro e alumínio em solução aquosa. Um tratamento de três repetições foi realizado, variando o pH (3, 7, 11), dosagem (0,1, 0,5, 1) e tempo de contato em minutos (45, 80, 120). As eficiências da quitosana e do biochar foram significativas. No caso do cromo VI, a concentração inicial de 31,8235 g/L foi reduzida pelo biochar para 21,69 g/L, enquanto a quitosana foi capaz de reduzir a concentração para 18,68 g/L. Para o boro, a concentração inicial foi de 21,9246 g/L. O biochar foi capaz de reduzir essa concentração para 11,42 g/L. Em contraste, a quitosana foi capaz de reduzir a concentração para 8,07 g/L. Finalmente, no caso do alumínio, a concentração inicial foi de 29,3318 g/L. O biochar conseguiu reduzir essa concentração para 21,03 g/L e a quitosana conseguiu reduzir a concentração para 10,61 g/L. Os resultados das condições que otimizam a eficácia da quitosana e do biochar foram em pH 7 em uma dose de biochar variando entre 0,5-1 g/L, enquanto a dose de quitosana variou entre 0,1-1 g/L. Da mesma forma, verificou-se que o tempo de contato ótimo está na faixa de 45-120 minutos. Finalmente, os adsorventes naturais provaram ser eficazes na remoção de cromo VI, boro e alumínio; no caso do cromo VI, o biochar atinge uma eficiência máxima de 31,839 %, a quitosana atinge uma eficiência de 42,905 %.

Palavras-chave: Quitosana; Biochar; Cromo VI; Boro; Alumínio

INTRODUCCIÓN

Una de las principales preocupaciones medioambientales es la contaminación de soluciones acuosas, como el agua potable, las aguas superficiales, las aguas subterráneas y las aguas residuales, por los diferentes contaminantes que tienen un impacto irreversible en la salud humana, el medioambiente y el ecosistema (1). En tal sentido, en los últimos tiempos, la contaminación del agua por la introducción directa o indirecta de compuestos nocivos y contaminantes ha sido un problema importante a nivel mundial (2).

Entre los muchos contaminantes tóxicos que se encuentran ampliamente en forma acuosa están los contaminantes inorgánicos; pero entre los más importantes se encuentran los iones de metales pesados, como el cromo (VI), aluminio (III), boro (B), entre otros (3). Un ejemplo de la presencia son las industrias mineras, metalúrgica, textil y de pintura, las cuales vierten grandes cantidades de metales pesados peligrosos en las fuentes de agua (4).

En el caso del boro (B), esto se evidencia en las altas cantidades presentes en países como Argentina, Chile, Rusia, China, Perú, Turquía y Estados Unidos (5). En el caso de Cerro de Pasco, Perú, se ha contaminado excesivamente con metales pesados debido a las extensas actividades mineras en la zona, donde los niños expuestos a la mina presentaron concentraciones de aluminio, cromo, hierro, plomo, estaño, entre otros metales,

estadísticamente superiores a las de los niños de control ($p < 0,05$) (6). Así, entre 2002 y 2016, se evidenció que las emisiones antropogénicas de boro en las aguas superficiales crecieron de 0,44 a 0,65 TgB año⁻¹. Este resultado representó un 80 % del flujo total de boro que los ríos suministraron al mar (7).

En el caso del cromo (Cr), cada año se vierten al ambiente en todo el mundo más de 170 000 toneladas de efluentes que contienen cromo; ocasionando altos niveles de toxicidad y enfermedades cancerígenas (8). Se estima que el 35 % del cromo utilizado se vierte a los efluentes en forma de Cr hexavalente (VI); siendo el Cr (VI) 100 veces más virulento que el Cr (III) (9).

Por otra parte, en Suiza, debido a la movilización de aluminio (Al) por las precipitaciones ácidas, que provocaron la acidificación de ríos y lagos, se han encontrado altas concentraciones de Al en el agua. En un estudio, entre las seis marcas de cápsulas de café examinadas, el contenido de aluminio ha sido en general superior al del agua del grifo, y en las cápsulas de té se descubrieron unas alarmantes 45 partes por millón de Al (10). Además, aproximadamente 67 millones de hectáreas de tierras colombianas sufren problemas de acidez y los suelos fuertemente ácidos pueden volverse peligrosos y extenderse hasta contaminar las fuentes de agua; esto se observó en uno de los lagos del país, donde se encontró un valor de 0,14

mg L⁻¹ Al³⁺ (11).

Los antecedentes anteriores generan gran preocupación debido a que estos metales presentan una alta toxicidad; como es el caso del cromo (VI); donde la exposición a aguas contaminadas con altas concentraciones de Cr (VI) puede tener consecuencias perjudiciales para la salud humana, incluido el desarrollo de trastornos cancerígenos crónicos, ya que es más móvil y, por tanto, dominante en las soluciones acuosas (12). En el caso del B, puede acumularse en el organismo de las personas y los animales que consumen alimentos o piensos enriquecidos con B, lo que puede provocar problemas de salud. Asimismo, la toxicidad aguda por su consumo excesivo puede provocar daños renales, diarrea y, en casos graves, la muerte por colapso circulatorio (13). Además, las fugas de boro contaminan el medioambiente y perjudican a las plantas; una concentración elevada de boro, por ejemplo, podría reducir la biomasa de fitoplancton y la biodiversidad; una cantidad excesiva de boro en el agua produciría graves daños en las hojas, una maduración temprana y un menor rendimiento de los frutos (14).

El objetivo de la investigación es evaluar la eficiencia de los tratamientos con quitosano y biocarbón en la remoción de cromo VI, boro y aluminio en disolución acuosa. Para ello, con el fin de reducir la contaminación del agua, el uso de aditivos naturales, biodegradables y

biocompatibles ha aumentado recientemente y atraído mucha atención; siendo el quitosano y sus derivados atractivos como adsorbentes; por la disponibilidad de grupos amino e hidroxilo, su bajo coste y su capacidad para eliminar una amplia gama de contaminantes de las aguas contaminadas con metales pesados (15). Ante ello, el presente estudio genera nuevas aplicaciones de la utilización del quitosano y biocarbón como tratamiento de medios acuosos contaminados con los metales cromo VI, boro y aluminio.

La investigación es importante porque genera conocimiento científico que permite ayudar a mejorar las soluciones acuosas; agua potable, aguas superficiales, aguas subterráneas y aguas residuales, que se ven afectadas por la gestión ineficaz de metales pesados como el boro, el aluminio y el cromo VI en diversas actividades antropogénicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el laboratorio de una universidad de Lima, se adecuaron las condiciones de las aguas que se contaminaron con metales, con las cuales se realizaron los ensayos, en los meses abril a setiembre del año 2024.

Para la investigación se prepararon muestras de disolución acuosa de 27 litros que contuvieron metales cromo VI, boro y aluminio; donde el experimento se realizó con 9 tratamientos con biocarbón y de la misma manera con quitosano;

con sus 3 réplicas a diferentes pH (3, 7 y 11) y dosis de 0.1, 0.5 y 1 g/l además se incluyó un testigo (CC). Dentro de los criterios de inclusión se consideraron aguas limpias para elaborar las soluciones de cromo VI, boro y aluminio. Se excluyeron soluciones acuosas de cualquier ecosistema acuático, fábrica o empresa industrial.

Para llevar a cabo el análisis de los datos se emplearon el Análisis de Varianza (ANOVA) para determinar si existen diferencias significativas entre los tratamientos con biocarbón y quitosano. Esta prueba permitió evaluar si los tratamientos tienen un efecto significativo en la remoción de los metales. Además, se utilizó la prueba de Tukey para comparar la efectividad media de los tratamientos con biocarbón y Quitosano. Permitted determinar cuáles de los tratamientos son más efectivos para la remoción de los metales. Finalmente, se utilizó la prueba T de Student para comparar la efectividad media de biocarbón y quitosano en condiciones específicas. Esta prueba permitió evaluar si existen diferencias significativas entre los dos tratamientos en condiciones específicas.

Para la lectura de las concentraciones de los metales cromo VI, boro y aluminio, se utilizó el espectrómetro de absorción atómica, (Métodos Normalizados APHA-AWWA-WPCF.3111 A. 1989) / Determinación de Metales Pesados. Además, para la medición de pH en la elaboración del quitosano y en el procedimiento experimental (buscando

estabilizar los valores de pH a 3, 7, 11) se utilizó un medidor de pH Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 4500-H+ pH.

Obtención de la muestra de disoluciones y su caracterización

Se preparó soluciones de cromo VI, boro y aluminio comprendidas entre 1000 mg/l-1 para ser diluidas a 10, 30 y 50 mg/l respectivamente.

Elaboración de Quitosano

Aproximadamente 1000 g de escamas de pescado fueron colectados del terminal pesquero del puerto del Callao, provincia constitucional (Perú); las cuales se lavaron con abundante agua del grifo para eliminar los residuos propios de descamación, enjuagadas finalmente con agua destilada, las escamas fueron extendidas y llevadas a secar a 40 °C en una estufa de convención forzada; luego se molió la muestra seca en una licuadora hasta tener partículas más pequeñas. Luego, se pesó 200 g de escama agregando 200 ml de solución de ácido clorhídrico en un vaso de precipitado Isolab de 1000 ml, calentándolo a 60 °C en agitación de 300 rpm/por 24 horas. Como resultado se obtuvo un extracto acuoso, para posteriormente lavarlo con abundante agua desionizada hasta tener un pH cerca al neutro, en esta oportunidad se agregó una solución de hidróxido de sodio, repitiendo el paso de la

agitación por el mismo tiempo, lavando y buscando conseguir en esta ocasión un polvo blanquecino, el cual fue utilizado en el experimento.

Obtención del biocarbón

Para la obtención de biocarbón fue necesario realizarlo en un horno pirolítico, donde se colocaron los tallos de planta de uva de 450 a 500 °C, hasta la formación de trozos de carbones, los cuales fueron molidos hasta obtener un diámetro entre 2 mm modificado, seleccionados en un tamiz (16).

Procedimiento experimental

Se prepararon 27 muestras de 1 litro; cada muestra de agua preparada, contaminada con metales; el experimento consistió en 9 tratamientos (biocarbón y quitosano) con sus 3 réplicas a diferentes pH (3, 7 y 11) y dosis de 1.5, 2.5 y 3.5 g/l-1 y con tiempos de contacto de 45, 80 y 120 minutos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se obtuvieron las eficiencias según muestran las Tablas 1, 2 y 3; utilizando biocarbón y para quitosano para los tres metales.

Tabla 1. Eficiencia de remoción del biocarbón y quitosano para el tratamiento de cromo VI.

Tratamiento	Concentración inicial	Eficiencia (%)	
		Prom. biocarbón	Prom. quitosano
1	9.9202	1.567	4.874
2	9.9202	2.657	1.541
3	9.9202	2.210	3.120
4	31.8235	12.463	9.983
5	31.8235	31.839	7.993
6	31.8235	8.411	6.985
7	52.5088	5.514	1.350
8	52.5088	15.125	42.905
9	52.5088	1.470	1.521

Tabla 2. Eficiencia de remoción del biocarbón y quitosano para el tratamiento de boro.

Tratamiento	Concentración inicial	Eficiencia (%)	
		Prom. biocarbón	Prom. quitosano
1	10.2845	2.068	6.429
2	10.2845	4.604	3.577
3	10.2845	5.998	8.957
4	21.9246	14.784	4.704
5	21.9246	47.928	5.312
6	21.9246	14.829	9.174
7	50.2839	8.248	3.793
8	50.2839	16.179	61.843
9	50.2839	3.813	3.263

Tabla 3. Eficiencia de remoción del biocarbón y quitosano para el tratamiento de aluminio.

Tratamiento	Concentración inicial	Eficiencia (%)	
		Prom. biocarbón	Prom. quitosano
1	11.766	3.026	3.706
2	11.766	5.377	2.006
3	11.766	3.394	3.592
4	29.3318	14.689	6.631
5	29.3318	28.303	24.860
6	29.3318	22.348	21.087
7	52.6119	8.031	8.183
8	52.6119	12.181	63.443
9	52.6119	3.970	4.039

Se aplicó la prueba ANOVA; se encontró que para los tratamientos de cromo VI con biocarbón y quitosano; tratamiento de boro con biocarbón y quitosano y tratamiento de aluminio con biocarbón y quitosano; la prueba F resultó con 92,828; 326,875; 281,021; 562,544; 124,226 y 912,444 respectivamente y con un p valor de 0,000. Luego se aplicó la prueba de Tukey para comparar las eficiencias medias de los tratamientos de biocarbón y quitosano.

Tabla 4. Prueba de Tukey para comparar la eficiencia media de los tratamientos con biocarbón para cromo VI.

Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = 0.05				
		1	2	3	4	5
PH=11, dosis 0.5, 45 min	3	1.471				
PH=3, dosis 0.1, 45 min	3	1.567				
PH=11, dosis 1, 120 min	3	2.210				
PH=7, dosis 0.5, 80 min	3	2.657				
PH=3, dosis 1, 80 min	3	5.514	5.514			
PH=11, dosis 0.1, 80 min	3		8.412	8.412		
PH=3, dosis 0.5, 120 min	3			12.463	12.463	
PH=7, dosis 0.1, 120 min	3				15.125	
PH=7, dosis 1, 45 min	3					31.839

Sobre la base de la prueba de Tukey y al 95 % de confianza, se concluye que la eficiencia más alta con biocarbón se encontró con PH=7, dosis 1, 45 minutos.

Tabla 5. Prueba de Tukey para comparar la efectividad media de los tratamientos con quitosano para cromo VI.

Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = 0.05			
		1	2	3	4
PH=3, dosis 1, 80 min	3	1.350			
PH=11, dosis 0.5, 45 min	3	1.521			
PH=7, dosis 0.5, 80 min	3	1.541			
PH=11, dosis 1, 120 min	3	3.120			
PH=3, dosis 0.1, 45 min	3	4.874	4.874		
PH=11, dosis 0.1, 80 min	3		6.985	6.985	
PH=7, dosis 1, 45 min	3		7.993	7.993	
PH=3, dosis 0.5, 120 min	3			9.983	
PH=7, dosis 0.1, 120 min	3				42.905

Al 95 % de confianza, se determinó que la eficiencia más alta con Quitosano se encontró con PH=7, dosis 0,1, 120 minutos. A su vez, sobre la base de la prueba T de Student, la eficiencia media de quitosano (42.905 %) resultó significativamente

mayor que biocarbón (15.125 %) para una dosis de pH=7, dosis 0.1 y 120 minutos, la efectividad media de biocarbón (31.839 %) resultó significativamente mayor que quitosano (7.993 %) para una dosis de PH=7, dosis 1 y 45 minutos.

Tabla 6. Prueba de Tukey para comparar la efectividad media de los tratamientos con biocarbón para boro.

Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = 0.05			
		1	2	3	4
PH=3, dosis 0.1, 45 min	3	2.068			
PH=11, dosis 0.5, 45 min	3	3.813			
PH=7, dosis 0.5, 80 min	3	4.604	4.604		
PH=11, dosis 1, 120 min	3	5.998	5.998		
PH=3, dosis 1, 80 min	3		8.248		
PH=3, dosis 0.5, 120 min	3			14.784	
PH=11, dosis 0.1, 80 min	3			14.829	
PH=7, dosis 0.1, 120 min	3			16.180	
PH=7, dosis 1, 45 min	3				47.928

Al 95 % de confianza se concluye que la eficiencia más alta con biocarbón se encontró con PH=7, dosis 1, 45 minutos.

Tabla 7. Prueba de Tukey para comparar la efectividad media de los tratamientos con quitosano para boro.

Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
PH=11, dosis 0.5, 45 min	3	3.263		
PH=7, dosis 0.5, 80 min	3	3.576		
PH=3, dosis 1, 80 min	3	3.793		
PH=3, dosis 0.5, 120 min	3	4.704		
PH=7, dosis 1, 45 min	3	5.312	5.312	
PH=3, dosis 0.1, 45 min	3	6.429	6.429	
PH=11, dosis 1, 120 min	3		8.957	
PH=11, dosis 0.1, 80 min	3		9.173	
PH=7, dosis 0.1, 120 min	3			61.843

Al 95 % de confianza se concluye que la eficiencia más alta con Quitosano se encontró con pH=7, dosis 0.1, 120 minutos. Sobre la base de la prueba T de Student, la efectividad media de Quitosano (61.843 %) resultó significativamente mayor que biocarbón (16.180 %) para una

dosis de PH=7, dosis 0.1 y 120 minutos. Bajo la misma prueba, la eficiencia media de biocarbón (42.928 %) resultó significativamente mayor que Quitosano (5.312 %) para una dosis de pH=7, dosis 1 y 45 minutos.

Tabla 8. Prueba de Tukey para comparar la efectividad media de los tratamientos con Biocarbon para aluminio.

Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = 0.05				
		1	2	3	4	5
PH=3, dosis 0.1, 45 min	3	3.026				
PH=11, dosis 1, 120 min	3	3.394				
PH=11, dosis 0.5, 45 min	3	3.970				
PH=7, dosis 0.5, 80 min	3	5.377	5.377			
PH=3, dosis 1, 80 min	3		8.031			
PH=7, dosis 0.1, 120 min	3			12.181		

Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = 0.05				
		1	2	3	4	5
PH=3, dosis 0.5, 120 min	3			14.688		
PH=11, dosis 0.1, 80 min	3				22.348	
PH=7, dosis 1, 45 min	3					28.303

Al 95 % de confianza se concluye que la eficiencia más alta con biocarbón se encontró con pH=7, dosis 1, 45 minutos.

Tabla 9. Prueba de Tukey para comparar la efectividad media de los tratamientos con quitosano para aluminio.

Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = 0.05				
		1	2	3	4	5
PH=7, dosis 0.5, 80 min	3	2.006				
PH=11, dosis 1, 120 min	3	3.592	3.592			
PH=3, dosis 0.1, 45 min	3	3.706	3.706			
PH=11, dosis 0.5, 45 min	3	4.039	4.039			
PH=3, dosis 0.5, 120 min	3		6.632	6.632		
PH=3, dosis 1, 80 min	3			8.183		
PH=11, dosis 0.1, 80 min	3				21.087	
PH=7, dosis 1, 45 min	3					24.860
PH=7, dosis 0.1, 120 min	3					63.443

Al 95 % de confianza se concluye que la eficiencia más alta con Quitosano se encontró con pH=7, dosis 0.1, 120 minutos.

Aplicando la prueba T de Student, la eficiencia media de quitosano (63.443 %) resultó significativamente mayor que el biocarbón (12.181 %) para una dosis de pH=7, dosis 0.1 y 120 minutos. También la efectividad media de quitosano (24.860 %) resultó significativamente

menor que biocarbón (28.303 %) para una dosis de pH=7, dosis 1 y 45 minutos.

Discusión

Se observa que la eficiencia de los tratamientos de quitosano y biocarbón en la remoción de metales pesados en disolución acuosa es notablemente variable. Los resultados obtenidos demuestran que la dosis óptima y el tiempo de

contacto son fundamentales para lograr una remoción eficiente de los metales cromo VI, boro y aluminio.

Ello se encuentra en concordancia con la opinión de (15), quienes afirmaron que la dosis óptima y el tiempo de contacto son cruciales para lograr una remoción eficiente de los metales pesados, ya que pueden influir en la eficiencia de remoción de los metales pesados al afectar la cantidad de sitios de adsorción disponibles y la velocidad de reacción entre el metal y el adsorbente. Sin embargo, otros autores han demostrado que la eficiencia de remoción no solo depende de la dosis y el tiempo de contacto, sino también de otros parámetros como el pH, la temperatura, la concentración de iones y la presencia de otros contaminantes (16).

Se determinó que la efectividad de la dosis de quitosano y biocarbón en el tratamiento de los metales cromo VI, boro y aluminio, en disolución acuosa es notablemente variable. Los resultados muestran que la dosis óptima y el tiempo de contacto son fundamentales para lograr una remoción eficiente de estos metales. Para el cromo VI, la dosis óptima de biocarbón fue de 0,5 g/L, lo que dio como resultado una concentración final de 21,69 g/L. Por otro lado, la dosis óptima de quitosano fue de 1 g/L, lo que generó una concentración final de 18,68 g/L. La eficiencia del biocarbón en la remoción del cromo VI es similar a los resultados obtenidos por (17), quienes

reportaron una capacidad de adsorción de 180 mg/g para Cr (VI) utilizando un biocarbón dopado con MoS₂/Fe.

Pero, presentando oposición a lo anteriormente confirmado, la eficiencia del quitosano en la remoción del cromo VI es mayor que la reportada por (16), quienes encontraron que un material de quitosano y biocarbón FeS modificado tenía una capacidad de adsorción de 110,0 mg/g para Cr (VI); ello se debe a factores como el pH, temperatura, tiempo de contacto y concentración inicial de Cr (VI) que generan que la eficiencia de adsorción puede variar.

En el caso del boro, la dosis óptima de biocarbón fue de 1 g/L, lo que dio como resultado una concentración final de 11,42 g/L. Por otro lado, la dosis óptima de quitosano fue de 0,1 g/L, lo que generó en una concentración final de 8,07 g/L.

Por ende, para el aluminio, la dosis óptima de biocarbón fue de 1 g/L, lo que dio como resultado una concentración final de 21,03 g/L. Por otro lado, la dosis óptima de quitosano fue de 0,1 g/L, lo que generó en una concentración final de 10,61 g/L.

La efectividad del quitosano en la remoción de boro y aluminio es comparable con los resultados obtenidos por (18), quienes reportaron una capacidad de adsorción de 59,66 mg/g para Cd (II) utilizando un compuesto de óxido de magnesio, biocarbón y quitosano.

Pero, la efectividad del biocarbón en la remoción del boro y aluminio es menor que la reportada por (18), quienes encontraron que un biofiltro a base de biocarbón de cáscara de coco impregnado de quitosano podía eliminar hasta el 61,70 % de fosfato y un 54,37 % de nitrógeno. Dicha diferencia entre boro y aluminio se debe a los distintos materiales adsorbentes, ya que, (18) utilizaron un compuesto de óxido de magnesio, biocarbón y quitosano, mientras que (19) utilizaron un biofiltro a base de biocarbón de cáscara de coco impregnado de quitosano.

Para lograr una remoción óptima, es fundamental ajustar las condiciones de pH, dosis de adsorbente y tiempo de contacto. En este sentido, se ha determinado que un pH de 7 es el óptimo para todos los metales y ambos adsorbentes. Ello viene a ser consistente con los hallazgos de (14) y (20), quienes también encontraron que el pH óptimo para la adsorción de Cr (VI) era cercano a 7.

Sin embargo (21), en su estudio demostraron que las mejores eficiencias de remoción ocurrieron a un pH=7 para Pb (II), un pH=5 para Cr(VI) y un pH=9 para el antibiótico (TCH) y ello se debe a que el pH puede influir en la carga del material adsorbente, lo que puede afectar la interacción con los iones o moléculas que se desean adsorber.

Además, en el presente estudio, la dosis de biocarbón varía entre 0,5-1 g/L, mientras que

la dosis de quitosano oscila entre 0,1-1 g/L. Es importante mencionar que el tiempo de contacto óptimo se encuentra en el rango de 45-120 minutos.

El quitosano muestra una mayor eficiencia en la remoción del boro y aluminio, con efectividades del 61,843 % y un 63,443 %, respectivamente. Por otro lado, el biocarbón es más efectivo en la remoción del cromo VI, con una efectividad del 31,839 %.

Sin embargo, la dosis óptima de quitosano y biocarbón encontrada en este estudio es diferente a la reportada por (22), quienes utilizaron una dosis de 2 g/L de quitosano para la remoción de Cr (VI).

Así también, en el estudio de (23), se observó que la modificación de las partículas de FeS y quitosano con biocarbón mejora la capacidad de adsorción de Cr (VI). Sin embargo, hay diferencias significativas en las condiciones óptimas y los resultados. En el estudio previo, FSBC (1:1:1) mostró una capacidad de adsorción de 103,93 mg g⁻¹, mientras que, en el presente estudio, el biocarbón es más efectivo en la remoción del cromo VI, con una efectividad del 31,839 %. Esto sugiere que la eficiencia de adsorción puede variar dependiendo de las condiciones experimentales.

La investigación ha demostrado que los resultados obtenidos demuestran que el quitosano y el biocarbón son adsorbentes efectivos para eliminar los metales cromo VI,

boro y aluminio. En el caso del cromo VI, el biocarbón logra una eficiencia máxima del 31,839 %, mientras que el quitosano alcanza una eficiencia del 42,905 %. Esto sugiere que el quitosano es más eficiente en la remoción de este metal. Sin embargo, dicho resultado refuta con lo expuesto por (24), quien consiguió una remoción del 100 % de Cr(VI) aplicando quitosano lo que resulta ser mucho mayor a lo encontrado en el presente estudio en un 42,905 %; ello debido a las condiciones experimentales y los métodos de remoción utilizados en ambos estudios.

Por otro lado, en la remoción del boro, el biocarbón alcanza una eficiencia máxima del 47,928 %, mientras que el quitosano logra una eficiencia del 61,843 %. Esto indica que el quitosano es significativamente más eficiente en la remoción de este metal.

En cuanto al aluminio, el biocarbón logra una eficiencia máxima del 28,303 %, mientras que el quitosano alcanza una eficiencia del 63,443 %. Nuevamente, el quitosano demuestra ser más eficiente en la remoción de este metal. Sin embargo, las capacidades de adsorción obtenidas en nuestro estudio son significativamente menores que las reportadas en el estudio de (17), donde, la capacidad de adsorción máxima para Cr(VI) en nuestro estudio fue de un 42,905 %, mientras que en el estudio mencionado se reportó una capacidad de adsorción de 442,08 mg/g, lo que equivale a un porcentaje mayor al 90 %,

incluso después de diez ciclos consecutivos; esto debido a las condiciones experimentales, como el pH, la temperatura, la concentración de iones o moléculas, y el tiempo de contacto.

CONCLUSIONES

La eficiencia de los tratamientos de quitosano y biocarbón en la remoción de metales pesados en disolución acuosa es compleja y variable. Los resultados demostraron que dos factores clave, la dosis óptima y el tiempo de contacto, juegan un papel fundamental en la eficiencia de la remoción de los metales cromo VI, boro y aluminio.

Sobre la base de la prueba ANOVA se concluye que la efectividad del biocarbón y quitosano sobre la contaminación del cobre VI, boro y aluminio; presentaron diferencias significativas ($p = 0.00$ menor que 0.05). Además, la efectividad de la dosis de quitosano y biocarbón en el tratamiento de los metales cromo VI, boro y aluminio en disolución acuosa fue notable; para el cromo VI, la dosis óptima de biocarbón fue de 0,5 g/L, lo que dio como resultado una concentración final de 21,69 g/L; mientras que la dosis óptima de quitosano fue de 1 g/L, lo que resultó en una concentración final de 18,68 g/L. En el caso del boro, la dosis óptima de biocarbón fue de 1 g/L, lo que resultó en una concentración final de 11,42 g/L; mientras que la dosis óptima de quitosano fue de 0,1 g/L, lo que resultó en una concentración final de 8,07 g/L. Finalmente, para el aluminio, la dosis óptima

de biocarbón fue de 1 g/L, lo que resultó en una concentración final de 21,03 g/L, mientras que la dosis óptima de quitosano fue de 0,1 g/L, lo que resultó en una concentración final de 10,61 g/L. Ante ello se puede recomendar realizar pruebas en condiciones reales y considerar la escalabilidad y viabilidad económica de tus propuestas, y analiza la reutilización y regeneración de los materiales.

Para lograr una remoción óptima de metales pesados, es fundamental ajustar las condiciones de pH, dosis de adsorbente y tiempo de contacto. Un pH de 7 es el óptimo para todos los metales y ambos adsorbentes. La dosis de biocarbón varía entre 0,5-1 g/L, mientras que la dosis de quitosano oscila entre 0,1-1 g/L. Asimismo, se ha encontrado que el tiempo de contacto óptimo se encuentra en el rango de 45-120 minutos. Ante ello, se puede recomendar trabajar en el desarrollo de tecnologías que permitan la implementación de estos adsorbentes a gran escala.

Los adsorbentes naturales demostraron ser eficientes en la remoción de cromo VI, boro y aluminio, El quitosano se destaca como una opción particularmente prometedora, con eficiencias superiores en la remoción de boro y aluminio. Su capacidad para capturar estos metales tóxicos es notable, lo que lo convierte en una herramienta valiosa para la descontaminación de aguas. Por otro lado, el biocarbón muestra una eficiencia significativa en la remoción del Cromo VI. Ante

ello, se recomienda evaluar la eficiencia de los adsorbentes en diferentes tipos de aguas, como aguas residuales, industriales o naturales.

CONFLICTO DE INTERESES. Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en la realización y publicación del presente artículo científico. La investigación fue llevada a cabo de manera independiente, sin influencias externas que pudieran afectar la objetividad de los resultados obtenidos. Asimismo, los datos presentados reflejan con fidelidad los hallazgos experimentales, y no existen compromisos financieros, comerciales o personales que puedan generar un sesgo en la interpretación de los resultados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Noormohammadi M, Zabihi M, Faghihi M. Novel chitosan–clay–iron nanocomposites supported on anodic aluminum as an efficient plate-shaped adsorbent for the removal of arsenic and dye from aqueous solutions. *J Phys Chem Solids*. 2024; 187:111874. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2024.111874>
2. Bogireddy K, Rios E, Agarwal V. Simple one step synthesis of dual-emissive heteroatom doped carbon dots for acetone sensing in commercial products and Cr (VI) reduction. *Chem Eng J*. 2021;414:128830. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128830>
3. Landa D, Bogireddy K, Kaur I, Batra V, Agarwal V. Heavy metal ion detection using green precursor derived carbon dots. *iScience*. 2022;25(2):103816. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.103816>
4. Ahmaruzzaman M. MXenes based advanced next generation materials for sequestration of metals and radionuclides from aqueous stream. *J Environ Chem Eng*. 2022:108371. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108371>
5. Helvacı C, Borates. In: Alderton D, Elias S, editors. *Encyclopedia of Geology*. 2nd ed. Academic Press; 2021: 489–504. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12049-4>

6. Piñeiro X, Ave M, Mallah N, Caamaño-Isorna F, Jiménez N, Vieira D, Muñoz-Barús J. Heavy metal contamination in Peru: Implications on children's health. *Sci Rep.* 2021;11(1):22729. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02163-0>
7. Goren A, Recepoglu Y, Karagunduz A, Khataee A, Yoon Y. A review of boron removal from aqueous solution using carbon-based materials: an assessment of health risks. *Chemosphere.* 2022; 293:133587. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133587>
8. Hussain F, Memon N. Materials and technologies for the removal of chromium from aqueous systems. In: Lichtfouse E, editor. *Sustainable Agriculture Reviews.* 40. Cham: Springer; 2020:113–177. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33281-5_4
9. Kerur S, Bandekar S, Hanagadakar M, Nandi, Ratnamala G, Hegde P. Removal of hexavalent Chromium-Industry treated water and Wastewater: A review. *Mater Today Proc.* 2021; 42:1112–1121. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.492>
10. Peydayesh M, Pauchard M, Bolisetty S, Stellacci F, Mezzenga R. Ubiquitous aluminium contamination in water and amyloid hybrid membranes as a sustainable possible solution. *Chem Commun.* 2019;55(74):11143–11146. <https://doi.org/10.1039/C9CC05337A>
11. Casierra-Posada F, Arias-Salinas J, Rodríguez-Quiroz J. Excess aluminum tolerance of the common water-hyacinth (*Eichhornia crassipes*) under greenhouse conditions. *Chil J Agric Res.* 2021;81(4):597–606. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392021000400597>
12. Maamoun I, Bensaida K, Eljamal R, Falyouna O, Tanaka K, Tosco T, Eljamal O. Rapid and efficient chromium (VI) removal from aqueous solutions using nickel hydroxide nanoplates (nNiHs). *J Mol Liq.* 2022; 358:119216. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.119216>
13. Bolan S, Wijesekara H, Amarasiri D, Zhang T, Ragályi P, Brdar-Jokanović M, et al. Boron contamination and its risk management in terrestrial and aquatic environmental settings. *Sci Total Environ.* 2023; 894:164744. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164744>
14. Bai C, Zhang H, Luo Q, Ye X, Liu H, Li Q, Wu Z. Boron separation by adsorption and flotation with Mg–Al-LDHs and SDBS from aqueous solution. *Chin J Chem Eng.* 2023; 61:192–200. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2023.02.009>
15. Zhang F, Xi L, Zhao M, Du Y, Ma L, Chen S, Zhang TC. Efficient removal of Cr (VI) from aqueous solutions by polypyrrole/natural pyrite composites. *J Mol Liq.* 2022; 365:120041. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120041>
16. Wan Y, Luo H, Cai Y, Dang Z, Yin H. Selective removal of total Cr from a complex water matrix by chitosan and biochar modified-FeS: Kinetics and underlying mechanisms. *J Hazard Mater.* 2023; 454:131475. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131475>
17. Ma J, Jia N, Jin H, Yao S, Zhang K, Kai Y, Wen Y. Chitosan induced synthesis of few-layer MoS₂/Fe-doped biochar and its dual applications in Cr (VI) removal. *Sep Purif Technol.* 2023; 317:123880. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123880>
18. Xiang J, Lin Q, Yao X, Yin G. Removal of Cd from aqueous solution by chitosan coated MgO-biochar and its in-situ remediation of Cd-contaminated soil. *Environ Res.* 2021; 195:110650. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110650>
19. Thongsamer T, Vinitnantharat S, Pinisakul A, Werner D. Fixed-bed biofilter for polluted surface water treatment using chitosan impregnated-coconut husk biochar. *Environ Pollut.* 2023; 334:122137. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122137>
20. Mahmoud M, Ibrahim G. Cr (VI) and doxorubicin adsorptive capture by a novel bionanocomposite of Ti-MOF@ TiO₂ incorporated with watermelon biochar and chitosan hydrogel. *Int J Biol Macromol.* 2023; 253:126489. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126489>
21. Qu W, Wang H, Li G, Song Z, Liu X, Zhang F, Ji D. Efficient removal of Pb (II), Cr (VI), and tetracycline hydrochloride from aqueous solutions using UiO-66-AMP@PAN: thermodynamics, kinetics, and isothermal adsorption. *J Environ Chem Eng.* 2023;11(5):110598. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110598>

- 22.** Taha A, Kandil S, Mohamed L, Sallam M, Heiba H. Surface investigations of selective biosorption and reduction of hexavalent chromium ions Cr (VI) over chitosan@MoO₃ and chitosan-cellulose@MoO₃ biocomposite. J Mol Struct. 2023; 1288:135716. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2023.135716>
- 23.** Yang Y, Zhang Y, Wang G, Yang Z, Xian J, Yang Y, Xu X. Adsorption and reduction of Cr (VI) by a novel nanoscale FeS/chitosan/biochar composite from aqueous solution. J Environ Chem Eng. 2021;9(4):105407. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105407>
- 24.** Köker B, Cebeci M. Removal of Cr (VI) from tanning wastewater using chitosan-SDS complexes in PEUF: Optimization and analysis via response surface methodology. J Water Process Eng. 2023; 54:103966. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103966>