

Adsorción de metales pesados presentes en aguas residuales no domésticas usando residuos agroindustriales de banano

Santiago A. Bedoya-Betancur¹ ; Erasmo Arriola-Villaseñor¹ ; Juan D. Valencia-Gonzalez¹ ;
David A. Ortiz-Muñoz¹ ; Rolando Barrera-Zapata² ; José A. Hernández-Maldonado³ ; Alba N. Ardila-Arias^{1a} 

¹Facultad de Ciencias Básicas Sociales y Humanas, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. Apartado Aéreo 49-32, Medellín, Colombia, Grupo de Investigación en Catálisis Ambiental y Energías Renovables (CAMER).

²Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Grupo de Investigación CERES Agroindustria & Ingeniería.

³UPIIG, del Instituto Politécnico Nacional, Av. Mineral de Valenciana 200, Silao, Guanajuato, México.

^aanardila@elpoli.edu.co

Fecha recepción: septiembre 30 de 2022

Fecha aceptación: marzo 9 de 2023

Resumen

Se estudió la remoción de metales pesados (Zn, Ni, Fe, Cu y Cr) en aguas residuales no domésticas (ARnD) reales de la industria de galvanoplastia (Medellín, Colombia) en un sistema discontinuo usando biomasa de cáscara (BCB) y pseudotallo de banano (BPT) obtenidos mediante procesos físicos simples. Los resultados fueron comparados con un carbón activado comercial (CAC). Los adsorbentes fueron caracterizados a través de FTIR, BET, Punto isoeléctrico, Boehm y DRX, mostrando poca variación hacia los materiales BCB y BPT en términos de composición química, morfología y estructura. También se determinaron las propiedades fisicoquímicas del ARnD previamente al tratamiento de adsorción encontrando una concentración inicial de 18,73 mg/L, 10,1 mg/L, 11,2 mg/L, 36,7 mg/L y 0,44 mg/L por espectrofotometría de absorción atómica para el Zn, Ni, Fe, Cu y Cr, respectivamente. Estos valores se compararon con la normatividad Colombiana la Resolución 0631 de 2015, donde se evidenció que sobrepasan los límites máximos permisibles establecidos. Las pruebas de adsorción se llevaron a cabo a temperatura ambiente, pH de 3,65 y 200 rpm variando la cantidad de adsorbente (1 - 5 mg) para un tiempo de 2 h. Los porcentajes máximos de remoción fueron de 42,69 %, 83,10 %, 95,17 %, 81,90 % y 99,82 % para Fe, Ni, Fe, Cu, Zn y Cr, respectivamente. Se observa que los valores alcanzados con los bioadsorbentes son similares al carbón comercial, lo que sugiere que los residuos de banano podrían ser una alternativa de bajo costo para el tratamiento de este tipo de efluentes.

Palabras clave: Cáscara de banano; Pseudotallo de banano; Bioadsorbente; Agua residual; Galvanoplastia; Adsorción.

Cita: Bedoya-Betancur SA, Arriola-Villaseñor E, Valencia-Gonzalez JD, Ortiz-Muñoz DA, Barrera-Zapata R, Hernández-Camacho JA, Ardila-Arias AN. Adsorción de metales pesados presentes en aguas residuales no domésticas usando residuos agroindustriales de banano. rev. ion. 2023;36(2):15-32. doi:[10.18273/revion.v36n2-2023002](https://doi.org/10.18273/revion.v36n2-2023002)

Adsorption of heavy metals in non-domestic wastewater using banana agro-industrial waste

Abstract

The removal of heavy metals (Zn, Ni, Fe, Cu and Cr) in real non-domestic wastewater (NDWW) from the electroplating industry (Medellín, Colombia) was studied in a batch system using peel biomass (BCB) and banana pseudostem (BPT) obtained by simple physical processes. The results were compared with a commercial activated carbon (CAC). The adsorbents were characterized through FTIR, BET, Isoelectric point, Boehm and XRD, showing little variation towards BCB and BPT materials in terms of chemical composition, morphology and structure. The physicochemical properties of ARnD were also determined prior to adsorption treatment, finding an initial concentration of 18.73 mg/L, 10.1 mg/L, 11.2 mg/L, 36.7 mg/L and 0.44 mg/L by atomic absorption spectrophotometry for Zn, Ni, Fe, Cu and Cr, respectively. These values were compared with the Colombian regulations Resolution 0631 of 2015, where it was evidenced that they exceed the maximum permissible limits established. Adsorption tests were carried out at room temperature, pH of 3.65 and 200 rpm varying the amount of adsorbent (1 - 5 mg) for a time of 2 h. The maximum removal percentages were 42.69 %, 83.10 %, 95.17 %, 81.90 % and 99.82 % for Fe, Ni, Fe, Cu, Zn and Cr, respectively. It is observed that the values achieved with the bioadsorbents are similar to commercial charcoal, suggesting that banana residues could be a low-cost alternative for the treatment of this type of effluent.

Keywords: *Banana peel; Banana pseudostem; Bioadsorbent; Wastewater; Electroplating; Adsorption.*

Adsorção de metais pesados em águas residuais não domésticas utilizando resíduos agro-industriais de banana

Resumo

A remoção de metais pesados (Zn, Ni, Fe, Cu e Cr) em águas residuais não domésticas reais (NDWW) da indústria de electrodeposição (Medellín, Colômbia) foi estudada num sistema descontínuo utilizando biomassa de casca (BCB) e pseudostem de banana (BPT) obtidos por processos físicos simples. Os resultados foram comparados com um carvão ativado comercial (CAC). Os adsorventes foram caracterizados através de FTIR, BET, Isoelectric point, Boehm e XRD, mostrando pouca variação em relação aos materiais BCB e BPT em termos de composição química, morfologia e estrutura. As propriedades físico-químicas da ARnD antes do tratamento de adsorção foram também determinadas, encontrando-se uma concentração inicial de 18,73 mg/L, 10,1 mg/L, 11,2 mg/L, 36,7 mg/L e 0,44 mg/L por espectrofotometria de absorção atômica para Zn, Ni, Fe, Cu e Cr, respectivamente. Estes valores foram comparados com a Resolução 0631 de 2015 dos regulamentos colombianos, onde era evidente que excediam os limites máximos admissíveis estabelecidos. Foram efectuados testes de adsorção à temperatura ambiente, pH de 3,65 e 200 rpm variando a quantidade de adsorvente (1 - 5 mg) durante um tempo de 2 horas. As percentagens máximas de remoção foram de 42,69 %, 83,10 %, 95,17 %, 81,90 % e 99,82 % para Fe, Ni, Fe, Cu, Zn e Cr, respectivamente. Observa-se que os valores obtidos com os bioadsorventes são semelhantes aos do carvão vegetal comercial, sugerindo que os resíduos de banana poderiam ser uma alternativa de baixo custo para o tratamento deste tipo de efluente.

Palavras-chave: *Casca de banana; Pseudostem de banana; Bioadsorvente; Águas residuais; Galvanoplastia; Adsorção.*

Introducción

Dado el uso intensivo de sustancias inorgánicas de carácter ácido y básico en las etapas de desengrasado y decapado y la consecuente producción de grandes cantidades de aguas residuales contaminadas con metales pesados, la industria de galvanoplastia es catalogada como una de las más peligrosas en cuanto a la composición de sus efluentes y posibles impactos negativos tanto al ambiente como a los seres vivos en general [1]. Específicamente, metales pesados como Cr (III y VI), Ni (II), Zn (II) y Fe (II) son utilizados

en esta industria para producir recubrimientos superficiales en placas y protegerlas de la corrosión [2]. De acuerdo con datos reportados en la literatura (Tabla 1), cantidades significativas de estos contaminantes son vertidas directamente a fuentes hídricas, afectando el pH del agua y generando impactos negativos en la flora, la fauna y la salud humana [3]. Además, a diferencia de la mayoría de contaminantes orgánicos, los metales pesados no son biodegradables y se acumulan en los organismos vivos causando efectos carcinogénicos, mutagénicos y teratogénicos [4].

Tabla 1. Datos de metales pesados encontrados en efluentes y residuos de la industria de galvanoplastia.

Metal	Concentración de Metal (mg/L) Referencias							
	Actual	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]*	[11]
Zn	18,73	972,3	-	-	50,6	119,5	105 000	-
Ni	10,1	-	87,8 - 121	183	1,96	-	17 300	547,2
Fe	11,2	-	-	-	-	-	42 400	2,19
Cu	36,7	1499,4	-	46	9,63	8,35	7 700	12,7
Cr	0,44	3965,3	-	87	-	5,7	19 200	6,15

*Datos encontrados en un lodo.

El anterior contexto ha conllevado a que se exploren diferentes tecnologías para remover dichos contaminantes, de las cuales la más utilizada consiste en la implementación de técnicas de adsorción con carbón activado comercial; debido a su estructura porosa, su elevada área superficial, estabilidad química y alta capacidad de adsorción [12]. Sin embargo, el uso de este material tiene algunos inconvenientes como su elevado costo de producción y su procedencia a partir de materias primas fósiles como el carbón, la brea de petróleo y la resina fenólica [13]. Con el fin de disminuir el uso de fuentes no renovables en la obtención de carbón activado comercial, amortiguar su alto costo, y buscar procesos que sean amigables con el ambiente, en las últimas décadas se han propuesto diversas metodologías de síntesis para el desarrollo de numerosos bioadsorbentes a partir de una gran variedad de residuos agroindustriales [14]. La eficiencia de los procesos de adsorción depende de varios factores, entre los cuales se resalta el tipo, cantidad, composición superficial y características fisicoquímicas del adsorbente; la naturaleza química y concentración del adsorbato; las condiciones del proceso de adsorción como el pH del medio, la temperatura y los tiempos de residencia; entre otros [15]. De esta manera, cada día son más numerosas las

investigaciones orientadas a obtener un “mejor adsorbente” que logre remociones significativas de diferentes metales pesados, para lo cual se han implementado varios métodos fisicoquímicos, basados en el montaje de sistemas complejos y tiempos prolongados de síntesis, el uso de reactivos químicos costosos, peligrosos y difíciles de encontrar en el mercado [16] o la aplicación de métodos emergentes como ultrasonido, microondas y plasma [17], complicados de implementar a gran escala. Estos procesos desvirtúan la argumentación inicial de buscar alternativas más económicas, simples y ambientalistas, convirtiéndose en una forma diferente de hacer las cosas, pero con otras desventajas que a la fecha continúan sin resolverse.

Por otra parte, en la mayoría de los estudios realizados se utilizan soluciones ideales o aguas residuales industriales sintéticas con un único contaminante, en las cuales las condiciones evaluadas se alejan completamente de la realidad por lo que la información sobre la aplicación práctica de estos adsorbentes en aguas residuales reales es todavía limitada [18,19]. Por lo tanto, el uso de aguas residuales reales en estudios de adsorción continúa siendo un reto, debido a su compleja composición y a la variación de este tipo de efluentes [20]. La obtención de bioadsorbentes

a partir de residuos agroindustriales, mediante procesos simples, económicos y ambientalmente amigables y comparables con los usados actualmente a nivel comercial para la remoción de diferentes contaminantes continúa siendo un desafío para los investigadores.

En Colombia existen grandes oportunidades de producción agroindustrial a razón de la fertilidad que caracteriza los suelos en las diversas regiones del país. Una de las industrias más reconocidas y fortalecidas a lo largo de los años es la industria bananera, la cual tiene cobertura de 22 departamentos en sus 204 municipios, de los cuales se destacan principalmente Valle del Cauca, Quindío, Antioquia, Cundinamarca, Huila, Chocó y Nariño por su cantidad de producción. El creciente aumento y desarrollo de este sector industrial ha traído consigo grandes problemáticas socioambientales como lo es la generación de altas cantidades de residuos sólidos orgánicos, esto principalmente debido a la morfología de la planta; la cual se divide en rizomas cortos, de los cuales crece un tallo de tamaño significativo y un racimo de fruto comestible. Así, luego de que el racimo de fruto comestible se desprende del tallo para ser comercializado, el resto de la planta se convierte en un residuo de volumen bastante pronunciado. Además, de la totalidad en masa del fruto comestible solo el 20 o 30 % es usado y el resto es desechado [21,22].

En la presente investigación se propone una solución simultánea para estas dos problemáticas abordadas, haciendo un aprovechamiento integral de los residuos de la industria bananera para usarlos en la preparación de adsorbentes mediante tratamientos físicos simples y económicos, a partir tanto de pseudotallo como de cáscaras de banano, y evaluar su desempeño en la remoción de metales pesados tóxicos presentes en ARnD de la industria de galvanoplastia. Para esto, se realizaron pruebas de adsorción usando un ARnD real, lo que permitió determinar porcentajes de remoción de metales pesados, bajo las condiciones reales y fenómenos de competencia e interacción con otros contaminantes presentes en la matriz, lo cual difiere de la mayoría de los estudios reportados en la literatura, realizados con soluciones ideales o simuladas. Adicionalmente, la eficiencia de los bioadsorbentes obtenidos se compararon con la capacidad de adsorción de un carbón activado comercial en condiciones de proceso similares.

Metodología

Obtención de los diferentes tipos de biomasa seca en polvo

Se recolectaron pseudotallos de plantas de banano de la especie Crash Michael cosechados en un cultivo en el municipio de Girardota, Antioquia, se cortaron en rodajas y se secaron al sol durante 24 h eliminando parcialmente la humedad del material. Posteriormente, se secaron en un horno por convección a 100 °C durante 72 h para eliminar el agua restante. El material seco, se cortó en trozos de alrededor de 1 cm de longitud, se molió en un molino de cuchillas y finalmente se codificó como BPT. Para la obtención de la biomasa en polvo a partir de las cáscaras de banano de misma especie Crash Michael, se despulpó la fruta de desecho suministrada por la Asociación Gremial Asohofrucol ubicada en Itagüí, Colombia. Las cáscaras se lavaron con agua desionizada para remover impurezas, se trozaron con tamaños de aproximadamente 2 cm y se llevaron a secado durante 24 h a 80 °C en un horno por convección para finalmente molerse en un molino de cuchillas y codificarse como BCB. Ambos materiales, se tamizaron a través de una malla ASTM 80 con el fin de obtener la biomasa seca en polvo con un tamaño de partícula homogéneo (Figura 1). Además, durante todo el proceso se realizaron los pesajes correspondientes para calcular los rendimientos hacia la biomasa en polvo obtenida. El carbón activado comercial (CAC) tipo Darco 20 x 40 y producido por Norit (Norit Americas Inc.) fue seleccionado para las comparaciones de adsorción de los metales con los bioadsorbentes preparados en este estudio.

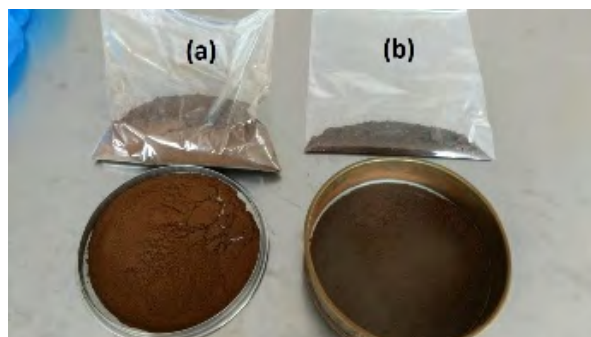


Figura 1. Biomasa en polvo seca proveniente de pseudotallos BPT (a) y de cáscaras de banano BCB (b).

Jornada de muestreo y aforo del ARnD

El efluente proveniente de la industria de galvanoplastia se obtuvo de una empresa ubicada en la ciudad de Medellín. Para recolectarlo se realizó una jornada de aforo y un plan de muestreo, esto con el fin de obtener una muestra compuesta representativa, además, todas las muestras fueron conservadas y vigiladas de manera adecuada para garantizar la integridad en la cadena de custodia de las mismas. La jornada de muestreo consistió en tomar un volumen de muestras de 2 L de ARnD cada media hora por 6 h, midiendo parámetros fisicoquímicos in situ como temperatura, pH, color, turbiedad y conductividad. Se analizaron parámetros ex situ como DQO, DBO_5 , COT y los metales pesados de interés. Todos los muestreos y la caracterización fisicoquímica se realizaron siguiendo los Métodos Estándar de Examen de Aguas Superficiales y Aguas Residuales (Tabla 2). Para determinar las concentraciones y llevar un seguimiento a los metales de estudio antes y después del proceso de adsorción en el ARnD real, se utilizó un espectrofotómetro de absorción atómica, con llama aire-acetileno-óxido nitroso, marca Agilent, 240 FS. Inicialmente se optimizaron los parámetros de desempeño del equipo para la determinación de cada metal. Una vez establecidas estas condiciones, se prepararon 6 estándares en donde cada uno contenía los 5 metales (Fe, Cu, Ni, Zn y Cr) para obtener las curvas de calibración. Durante estos análisis se tomaron las debidas precauciones para eliminar o disminuir la presencia de interferencias en la técnica instrumental de absorción atómica de llama, donde se detectaron algunos aspectos que podían generar una variabilidad en los datos experimentales. A modo de ejemplos, la presencia de sulfatos en este tipo de efluentes afecta la medición de hierro [23], las altas relaciones de Zn/Cu afectan los datos de Cu, la presencia de sólidos disueltos interfiere en la obtención de datos exactos de Zn, la existencia de elementos como Fe, Co y Cr en solución afectan la medición de Ni y algunos elementos como Co, Fe, Cu, Ba, Al, Ca y Ni pueden impactar de manera negativa la cuantificación de Cr [24].

Caracterización fisicoquímica de las biomásas

Los diferentes tipos de biomasa seca en polvo obtenidas y el carbón activado comercial evaluado, se caracterizaron por difracción de rayos X (DRX) usando un difractómetro Bruker (D-8) con una fuente de radiación $\text{K}\alpha$ del Cu con filtro de Ni a 40 kV y 40 mA y una longitud de onda igual a 1,54 Å. Las propiedades texturales se determinaron en un equipo marca Micromeritics (Asap 2020) mediante isotermas de adsorción-desorción de N_2 , del bioadsorbente se hizo a 75,2 K. Los espectros Infrarrojo por transformada de Fourier con Reflectancia Total Atenuada (FTIR/ATR) se obtuvieron en un espectrofotómetro IR Shimadzu (IRAffinity-1S). El punto isoeléctrico o punto de carga cero (pzc) de las biomásas se determinó por titulación de masas, encontrando el valor asintótico del pH de una suspensión del bioadsorbente/agua a medida que aumenta el contenido de masa. Finalmente, se determinó la concentración de grupos superficiales fenólicos, carboxílicos y lactónicos por el método de Boehm mediante titulaciones potenciométricas con soluciones estandarizadas 0,05 M de NaOH, Na_2CO_2 y NaHCO_3 .

Procesos de adsorción

Los procesos de adsorción se llevaron a cabo con 200 mL del ARnD real cruda en matraces de 250 mL, con un agitador de baño isotérmico (Autoshaking LABWIT ZWY-100H) a 200 rpm durante 2 h a temperatura ambiente y pH igual a 3,65. Se realizaron pruebas preliminares para determinar el equilibrio de adsorción y se varió la cantidad de los adsorbentes entre 1–5 mg. Adicional a la cuantificación de la concentración de los metales pesados antes y después de la adsorción, también se llevó a cabo un seguimiento de decoloración del ARnD usando un equipo GENESYS 10S UV-vis a partir de las lecturas de absorbancia en el rango de longitud de onda entre 270 – 800 nm. La eliminación del color en el ARnD se calculó utilizando la ecuación (1). Donde Abs_i y Abs_f son la absorbancia inicial y la absorbancia final a las 2 h, respectivamente.

$$\text{Remoción de color (\%)} = \frac{\sum Abs_i - \sum Abs_f}{\sum Abs_i} \times 100 \quad (1)$$

Resultados

Caracterización fisicoquímica del ARnD real cruda

En la **Tabla 2** se describen los resultados de la caracterización fisicoquímica del ARnD real cruda. Los valores obtenidos para la DQO, el pH y los sólidos suspendidos totales son menores que los reportados en la literatura para aguas residuales de la misma naturaleza [20], no obstante, estos valores superan el Límite Máximo Permissible (LMP) establecido en la normatividad colombiana. Parámetros como la conductividad, turbiedad, color, sólidos totales y sólidos totales disueltos, no son contemplados en la normatividad colombiana para ser controlados en este tipo de efluentes, además sus valores son significativamente menores que los reportados en la literatura para otros efluentes similares [25]. El valor obtenido para la DQO supera el LMP establecido en la normatividad colombiana, mientras que la DBO_5 se encuentra por debajo del LMP. Sin embargo, los valores para ambos parámetros son muy inferiores a los reportados en la bibliografía para este tipo de aguas [30] polyhydroxybutyrate (PHB). En cuanto al COT, no se encontraron datos en la literatura consultada, además, este parámetro no se contempla en la normatividad colombiana citada.

El índice de biodegradabilidad calculado (tomado como la relación DBO_5/DQO) fue de 0,029, lo que indica la presencia de materia mayoritariamente inorgánica difícil de biodegradar, lo cual en este caso corresponderá principalmente a sales de metales pesados. Por el contrario, el valor alto obtenido para la relación DQO/COT (3,80) indica un bajo contenido de compuestos orgánicos y de naturaleza biodegradable [28]. Adicionalmente, la concentración analizada para los diferentes metales pesados identificados (Zn, Ni, Fe, Cu excepto el Cr) supera los límites máximos permisibles establecidos en la normatividad colombiana citada. De acuerdo con los datos encontrados en la bibliografía consultada en cuanto a la caracterización fisicoquímica de este tipo de efluentes (**Tabla 2**), se puede observar una gran variedad de metales pesados, algunos de ellos iguales a los identificados en el presente estudio, sin embargo el amplio rango de composición de los mismos dificulta hacer una comparación entre ellos. No obstante, como se puede observar claramente en la **Tabla 2**, en la mayoría de los casos las concentraciones encontradas en el presente estudio son sustancialmente menores a las reportadas en la literatura.

Tabla 2. Caracterización fisicoquímica del ARnD real cruda.

Parámetro	Método	Valor	LMP [29]
pH (U de pH)	AWWA-4500H+	3,65	6 - 9
Temperatura (°C)	AWWA-4500H+	22,5	-
Conductividad ($\mu S/cm$)	AWWA-2510B	20,1	-
Turbiedad (UNT)	AWWA-2130B	97,3	-
Color (UPC)	AWWA-2120	500	-
Sólidos Totales (mg/L)	AWWA-2540B	1 180	-
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	AWWA-2540E	122,22	50
Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	AWWA-2540C	955	-
DQO (mgO_2/L)	AWWA-4500 C	360	250
DBO_5 (mgO_2/L)	AWWA-5210B	10,6	100
COT (mg/L)	AWWA-5310B	94,6	-
Zn Total (mg Zn/L)	AWWA-3500 Zn B	18,73	3,00
Ni Total (mg Ni/L)	AWWA-3500 Ni B	10,1	0,50
Fe Total (mg Fe/L)	AWWA-3500 Fe B	11,2	3,00
Cu Total (mg Cu/L)	AWWA-3500 Cu B	36,7	1,00
Cr Total (mg Cr/L)	AWWA-3500-Cr B	0,44	0,5

Caracterización fisicoquímica de las biomasas

En la **Tabla 3** se indican los valores para los parámetros fisicoquímicos analizados en las biomasas secas en polvo obtenidas y el carbón activado comercial usado como material de comparación. Los rendimientos obtenidos para la biomasa seca en polvo del pseudotallo y de las cáscaras de banano están acordes a la literatura, ya que ellos reportan valores entre (8 – 30) % y (40 – 90) %, respectivamente [30,31]. Tanto para la biomasa BCB como para la BPT se observaron áreas BET bastante pequeñas (<3 m²/g) en comparación con la del carbón activado comercial seleccionado para realizar las confrontaciones, lo cual inicialmente sugeriría la necesidad de someter

estos materiales a tratamientos fisicoquímicos adicionales y más complejos para incrementar este valor. No obstante, las áreas superficiales de los adsorbentes obtenidos se encuentran dentro del rango publicado para las biomasas obtenidas a partir de este tipo de residuos agroindustriales [32]. Además, se observa que hay similitudes en las propiedades texturales de los biomateriales sintetizados (BCB y BPT), donde las diferencias incluso en los valores de la superficie específica están dentro del error experimental de la técnica (± 20 m²/g). Sin embargo, se destaca que el área de superficie de CAC fue ~ 259 veces mayor en comparación con BCB y BPT.

Tabla 3. Caracterización fisicoquímica de las biomasas secas en polvo.

Parámetro Fisicoquímico	Valores		
	BCB	BPT	CAC
Rendimiento (%)	78,24	29,5	-
Área superficial BET (m ² /g)	2,30	2,72	650
Volumen de poro (cm ³ /g)	0,002	0,004	0,940
Diámetro de poro (nm)	5,8	9,0	41,1
Punto isoeléctrico	7,70	6,90	7,20
Carboxílicos (mmol/g)	0	47,0	0
Lactónicos (mmol/g)	0	656,1	0
Fenólicos (mmol/g)	3 775,3	163,7	359,1

Los patrones de DRX de BCB y BPT mostrados en la **Figura (2a y 2b)** reflejan el aspecto amorfo de los materiales debido a la hemicelulosa y la lignina de la cáscara y pseudotallo de banano [36]. Además, se identificó la presencia de picos cristalinos a 17,4°, 22,1°, 27,8° y 40° indicando la naturaleza cristalina del material celulósico los

cuales concuerdan con los estudios realizados hacia este tipo de materiales [34,35]. Por su parte, en el difractograma del carbón activado comercial (**Figura 2c**) se detectaron dos picos en 2 θ igual a 26° y 54° los cuales son representativos para un carbón grafitico y comparables con lo reportado en la literatura [36].

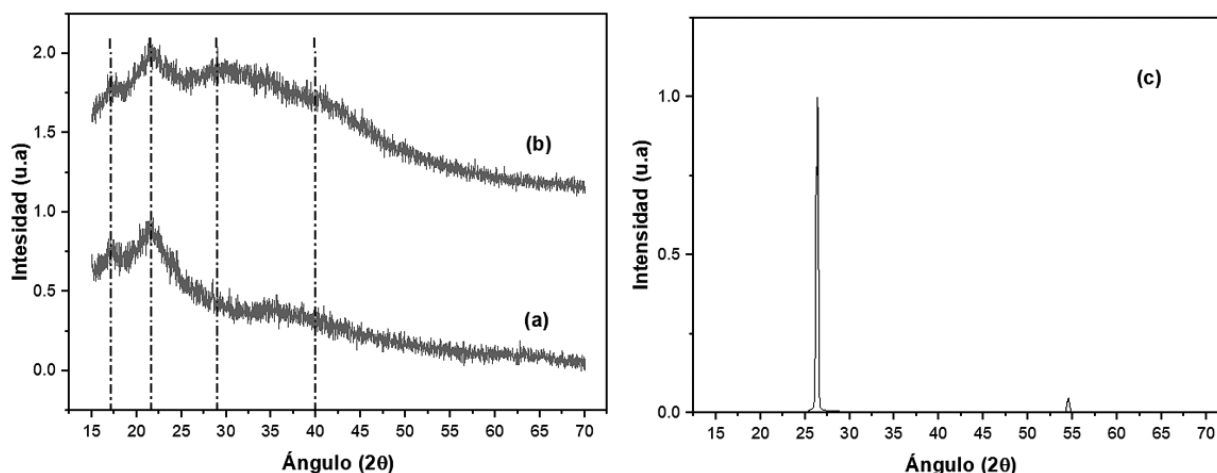


Figura 2. Patrones DRX de los adsorbentes (a) BCB, (b) BPT y (c) CAC.

Existen diferentes fenómenos o mecanismos que buscan explicar la forma en la cual se adhiere el adsorbato al adsorbente, entre los cuales se resalta la interacción electrostática (atracción o repulsión), el intercambio iónico, la precipitación y la adsorción física, entre otros. Esto dependerá tanto de la composición superficial del material como de la naturaleza química del adsorbato. El conocimiento del punto isoelectrico y del tipo y cantidad de grupos funcionales presentes en el material, permite dilucidar los fenómenos más predominantes en el proceso de adsorción. De esta manera, la composición superficial de los adsorbentes se estudió por titulación de masas, método de Boehm y espectrofotometría de infrarrojo. Así, el punto isoelectrico encontrado para los materiales fue 7,70, 6,90 y 7,20 para BCB, BPT y CAC, respectivamente, valores cercanos a la neutralidad. Estos valores se encuentran dentro de los intervalos reportados en la literatura [37,38]. A valores de pH de la solución inferiores al punto isoelectrico, se favorece la adsorción de especies aniónicas ya que la superficie del material está cargada positivamente, sin embargo, de acuerdo con los diagramas de especiación obtenidos para los metales analizados, se observa que los

mismos se encuentran predominantemente en su forma catiónica de menor valencia (Fe^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , Cr^{3+} y Zn^{2+}). De acuerdo con el valor del pH del agua residual (3,65), se esperaba que hubiese un proceso de repulsión electrostática, lo que sugiere que existen otros fenómenos que prevalecen en la remoción de los metales.

De acuerdo con los resultados obtenidos por el método de Boehm (Tabla 3) y DRIFT (Tabla 4 y Figura 3), los grupos funcionales predominantes en los materiales son O-H, C=O y C-O los cuales posiblemente están asociados a los grupos carboxílicos, lactónicos y fenólicos, y son los responsables de la adsorción de los metales principalmente por intercambio iónico y complejación. En cuanto a los grupos ácidos de la superficie de los materiales, no se identificaron grupos superficiales carboxílicos y lactónicos para los materiales CAC y BCB. Por su parte, BPT presenta valores de 47,0 mmol/g, 656,1 mmol/g y 163,7 mmol/g hacia carboxílicos, lactónicos y fenólicos, respectivamente. Como se puede verificar en la Tabla 3 la cantidad de grupos fenólicos es mayor para el material BCB (3 775,3 mmol/g), seguido del CAC (359,1 mmol/g) y por último BPT (163,7 mmol/g).

Tabla 4. Bandas y grupos funcionales característicos de cada material.

Tipo de adsorbente	Número de onda (cm ⁻¹)	Identificación	Referencia
BCB y BPT	3 500 – 3 100	Estiramiento O-H (Celulosa)	[39,40]
	3 000 – 2 700	Celulosa, pectina, agua, hemicelulosa y lignina	
	1 729	Estiramiento carbonilo C=O	
	1 589, 1 371 y 1 249	Esqueleto aromático y hemicelulosa	
	1 064	Estiramiento C-O	
CAC	750 - 500	Vibración enlace C-H	[41,42]
	1 700 - 1 400	Tensión C=C y C=O	
	3 750	Estiramiento O-H	

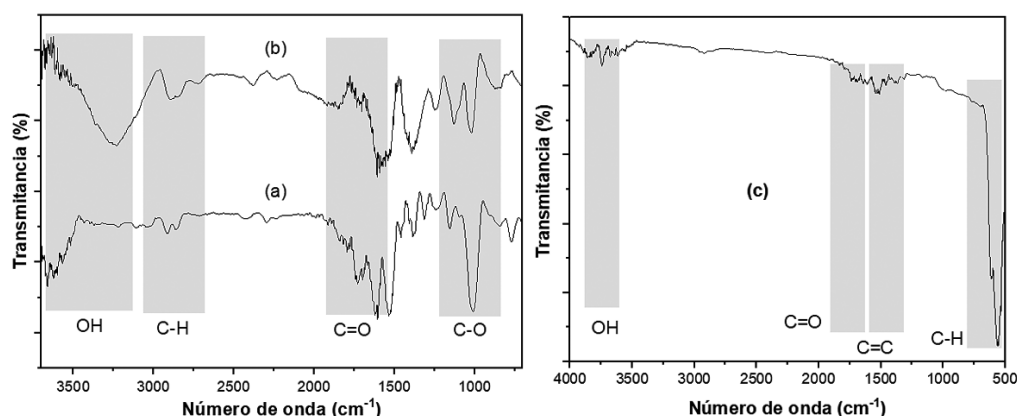


Figura 3. Espectro IR de los bioadsorbentes (a) BCB, (b) BPT y (c) CAC.

En la **Tabla 5** se detalla el máximo porcentaje de remoción de color alcanzado con los diferentes adsorbentes. Además, también se indican los máximos porcentajes de remoción y la capacidad de adsorción para cada metal de los diferentes adsorbentes. Estos valores se alcanzaron con la mayor cantidad de adsorbente (5 mg). Es importante destacar que estos datos son valores promedios obtenidos de diferentes réplicas, para lo cual se seleccionaron algunos experimentos puntuales al azar para confirmar los resultados obtenidos, los cuales fueron similares entre sí para los metales Cu, Zn, Cr y Ni con coeficientes

de varianza (CV) menores al 7 %, indicando una baja dispersión y una alta uniformidad en los datos analizados [43]. Por el contrario, los datos de porcentaje de remoción hacia el Fe muestran un CV del 51 %, dato que corrobora la variación o poca uniformidad en los porcentajes de remoción hacia cada material. En cuanto al porcentaje de remoción de color se observa que el adsorbente BCB tiene menor capacidad para la remoción del color verdadero. Por el contrario, con los adsorbentes BPT y CAC se logran porcentajes de remoción cercanos al 90 %.

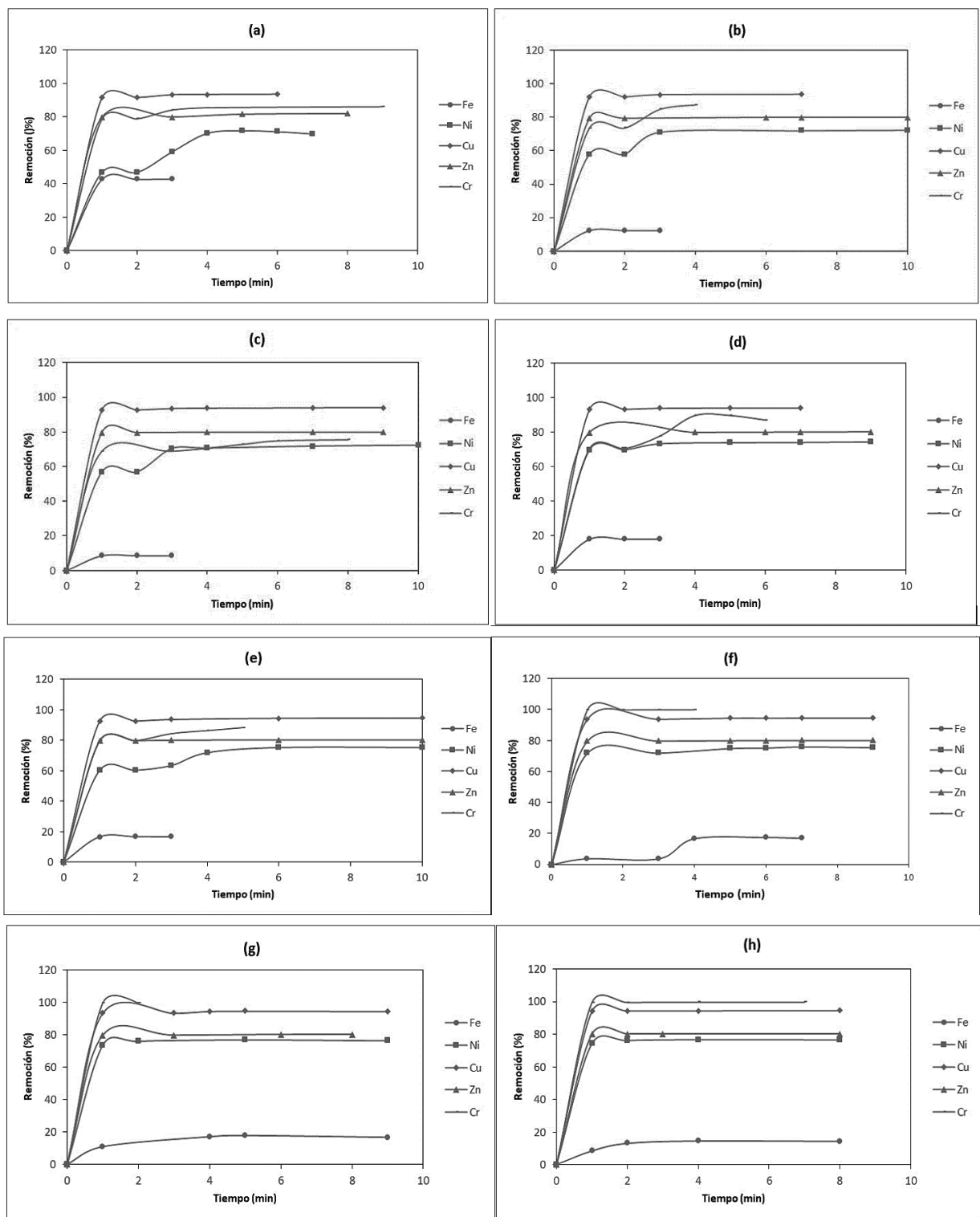
Tabla 5. Máximos porcentajes de remoción de los metales pesados.

Remoción de color (%)			Metal	Máxima Remoción de Metal (%)			Máxima Capacidad de Adsorción (mg metal/g ads.)		
BCB	BPT	CAC		BCB	BPT	CAC	BCB	BPT	CAC
			Fe	42,69	17,79	20,05	191,25	76,47	67,24
			Ni	75,13	78,08	83,10	302,62	312,53	334,73
46,60	92,42	88,28	Cu	94,40	94,57	95,17	1385,79	1386,53	1397,1
			Zn	81,90	80,20	80,81	599,88	600,63	605,43
			Cr	89,43	99,75	99,82	15,51	17,56	17,57

En las **Figuras 4a–4e, 4f–4j y 4k–4o** se muestran los porcentajes de remoción para los metales con las diferentes cantidades de adsorbente en función del tiempo para los materiales BCB, BPT y CAC, respectivamente. En todas las figuras se observa que el equilibrio de adsorción se alcanzó en aproximadamente 3 min, permaneciendo constante a partir de este tiempo debido a la saturación superficial de los materiales. Los cortos tiempos de adsorción para alcanzar el equilibrio encontrados en el presente trabajo, concuerdan con los hallazgos reportados por Thokkanen y colaboradores, quienes encontraron tiempos de equilibrio a 15 min o menores en matrices con más de 2 analitos [44]. Esto se debe principalmente a los fenómenos de competencia que se pueden presentar entre los diferentes metales por sitios de adsorción de naturaleza similar.

En cuanto a los porcentajes de remoción para los diferentes metales, se observó un comportamiento similar para los materiales BCB y BPT. Esto posiblemente se deba a que las características fisicoquímicas de ambos adsorbentes son semejantes entre sí. Los tres adsorbentes mostraron una menor afinidad para la remoción del Fe, mientras que la remoción para el Cu, Ni,

Cr y Zn son muy similares entre sí y cercanos al 100 %. En este caso es claro que la cantidad de Fe adsorbido no depende específicamente del área superficial disponible en los materiales, lo que indica la posibilidad de una relación entre la naturaleza de los sitios “funcionalizados” y la interacción entre dichos sitios y el Fe. Así se puede observar que la concentración total de grupos carboxílicos, fenólicos y lactónicos para cada material es proporcional al porcentaje de remoción alcanzado para el Fe con cada material. Lo anterior permite inferir que al contener el material BCB mayor cantidad de grupos superficiales ácidos en comparación con los demás adsorbentes estudiados, los adsorbatos como el hierro presentan una mayor afinidad con este material lo cual podría ser una explicación del porcentaje de remoción hacia este elemento. También, se puede confirmar a través de los espectros IR de BCB y BPT los grupos hidroxilos presentes en los grupos fenólicos de la lignina [45]. No obstante, algunos estudios reportan valores menores a los obtenidos en esta investigación hacia los grupos fenólicos [46,47]. Igualmente, el CAC presenta valores muy por encima para los grupos fenólicos los cuales son reportados en la literatura [48,49].



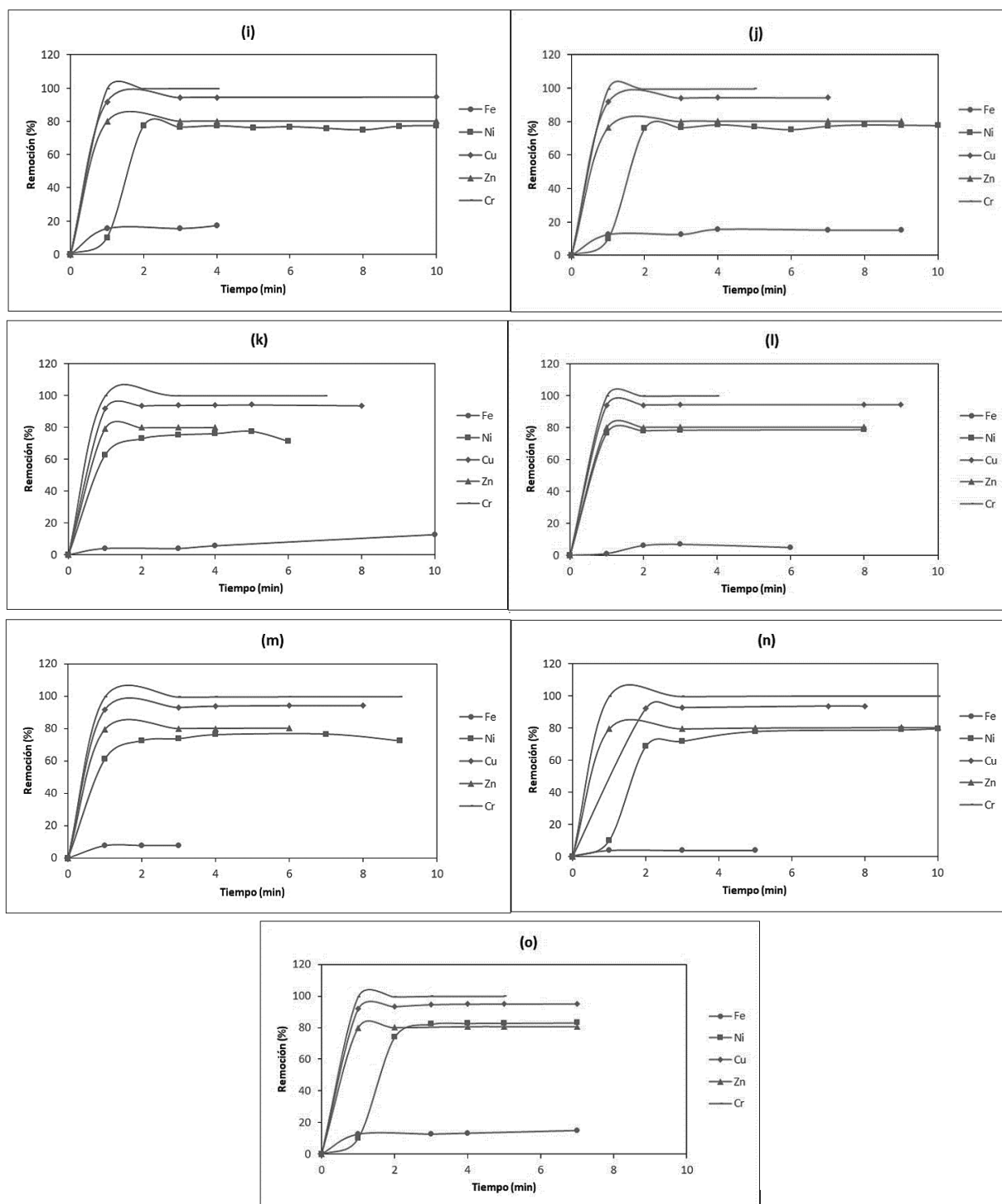


Figura 4. Adsorción de metales pesados usando BCB (a – e) (1 – 5 mg), BPT (f – j) (1 – 5 mg) y CAC (k – o) (1 – 5 mg).

Aunque existe una diferencia significativa entre el área superficial del carbón activado comercial evaluado y los dos bioadsorbentes obtenidos, se observa que los máximos porcentajes de remoción alcanzados con los diferentes adsorbentes son muy similares entre sí para la mayoría de metales, indicando que en este caso, el área superficial posiblemente no es un factor determinante en la remoción de los contaminantes evaluados [50–52]. De forma análoga, tampoco se encontró una correlación específica entre la cantidad de grupos fenólicos presentes en cada material y el porcentaje de remoción para los diferentes metales, ya que dichos valores son muy cercanos a pesar de la diferencia en la cantidad de grupos. Además, se observa una variación en los porcentajes de remoción, lo que indica que hay una competencia en la adsorción de los metales estudiados hacia los sitios activos de cada material y que generan procesos de adsorción y desorción. Igualmente, como se puede verificar en la **Figura 4** el efecto del tiempo de contacto de los distintos materiales hacia cada uno de los metales pesados muestra ser una variable relevante en el proceso de adsorción en matrices complejas de aguas residuales no domésticas de la industria de galvanoplastia. Durante los tiempos de contacto cortos, la adsorción fue muy rápida para todos los metales (< 5 min se adsorbieron más del 17 % para Fe, 75 % para Ni, 94 % para Cu, 80 % para Zn y 89 % para Cr) (**Tabla 5**) debido a la presencia de sitios activos en la superficie de los materiales adsorbentes. Basándose en estos resultados se observa que para algunos metales, BCB presenta buenos % de remoción y para otros no, lo que posiblemente depende de la naturaleza física y química tanto del adsorbente como el adsorbato y las interacciones entre ellos.

Adicionalmente, esto sugiere que para la remoción de estos metales no es necesario incurrir en etapas extras para la síntesis de materiales con superficies modificadas o funcionalizadas, dado que se obtienen buenos resultados en matrices complejas de aguas residuales de la industria

de galvanoplastia y, que comparados con otras investigaciones donde se reportan el uso de sustancias químicas como TEMPO (2,2,6,6 tetrametilpiperidina-1-il, oxi) en soluciones ideales suelen ser más costosos [16,53]. De acuerdo a estos resultados, se sugiere que a través de procesos más simples (físicos) y no químicos (sustancias reactivas ácidas o básicas fuertes) se pueden obtener adsorbentes de bajo costo como BCB y BPT con rendimientos similares y que harían atractivo el estudio hacia futuras investigaciones de este tipo de efluentes complejos y reales.

La **Tabla 6** resume las investigaciones que comúnmente se reportan en la literatura en relación con el porcentaje de remoción para varios metales pesados, utilizando bioadsorbentes derivados de residuos de banano. Se evidencia que ninguno de ellos utiliza aguas residuales reales. Además, la mayoría de los estudios utilizan soluciones ideales y una baja proporción en aguas residuales industriales sintéticas con máximo dos contaminantes; por lo que se demuestra que no hay información sobre la aplicación a nivel experimental de estos adsorbentes en aguas residuales reales, lo que hace difícil la comparación entre esta investigación y lo que se reporta en la bibliografía. Es de resaltar también, que el rendimiento de los adsorbentes sintetizados en esta investigación es bueno, ya que los porcentajes de remoción son superiores o similares a los establecidos en la **Tabla 4**. Aunque, como se ve también en la misma tabla, el porcentaje de remoción de los adsorbentes obtenidos en esta investigación es inferior a la de otros estudios realizados con soluciones ideales que contienen sólo el metal, lo que podría ser debido a la presencia de un gran número de otros compuestos como HCl, NaOH, SO_4^{2-} , PO_4^{3-} que compiten con el metal por los sitios de adsorción y, por tanto, esto llevaría a obtener menores capacidades de adsorción. En consecuencia, el % de remoción depende en gran medida del tipo de matriz analizada, las propiedades fisicoquímicas del adsorbente y de las condiciones experimentales.

Tabla 6. Porcentajes de remoción de varios contaminantes utilizando bioadsorbentes derivados de residuos de banano.

Adsorbente	Adsorbato	Tipo de matriz	Remoción (%)	Condiciones de adsorción	Referencias
Cáscara de banano	Cr (VI)	Solución acuosa	18,87	300 mg/L de Cr (VI), 0,25 g de adsorbente, pH 10, temperatura ambiente.	[54]
AgNPs – polvo de hojas de banano	Zn (II) Fe (III)	Solución acuosa	70	100 mg/L de Zn (II) y Fe (III), 0,1 g de adsorbente, pH 6, temperatura 30 °C.	[55]
			75		
Metacrilato de glicidilo – tronco de banano	Cu (II) Zn (II)	Agua sintética	100	73,2 y 42,72 mg/L de Cu (II) y Zn (III), respectivamente, 0,05 g de adsorbente, pH 3,25, temperatura ambiente.	[56]
			100		
Carbón activado de hojas de banano	Cu (II)	Agua sintética	83	250 mg/L de Cu (II), 0,2 g de adsorbente, pH 5, temperatura 30 °C.	[57]
Espuma de carbono de cáscara de banano	Cu (II) Cr (VI)	Solución acuosa	99,84	5 mg/L de Cu (II), 0,2 g de adsorbente, pH 4, temperatura 30 °C.	[58]
			88,02		
Tronco de banano	Cu (II) Zn (II)	Solución acuosa	95,80	5 mg/L de Cu (II), 8 g de adsorbente, pH 6, temperatura ambiente.	[59]
			97,24		
Cáscara de banano modificada con acrilonitrilo	Cr (VI)	Solución acuosa	96	400 mg/L de Cr (VI), 10 g de adsorbente, pH 3, temperatura 30 °C.	[60]
Carbón activado derivado de cáscara de banano	Cu (II) Ni (II)	Solución acuosa	40,4	85 y 90 mg/L de Cu (II) y Ni (II), respectivamente, 1,2 g de adsorbente, pH 6,5, temperatura ambiente.	[61]
			54,6		
Cáscara de banano	Cr (III)	Solución acuosa	99	5 mg/L de Cr (III), pH 6	[62]
Cáscara de banano	Cu (II)	Solución acuosa	88	10 mg/L de Cu (II), 0,9 g de adsorbente, pH 9, temperatura 30 °C.	[50]
Corteza de banano	Cr (III) Zn (II)	Solución acuosa	55	10 mg/L de ambos metales, 2 g de adsorbente, pH 6, temperatura 28 °C.	[63]
			32		
Cáscara de banano	Cr (VI)	Solución acuosa	89,62	1 000 mg/L de Cr (VI), 2 g de adsorbente, pH 4, temperatura ambiente.	[64]
Ceniza de cáscara de banano	Cr (VI) Fe (II)	Agua sintética	37,09 57,78	0,5 mg/L para ambos metales, 0,5 g de adsorbente, pH 5.	[65]
Biocarbón de pseudotallo de banano	Cr (VI)	Solución acuosa	62,7	200 mg/L de Cr (VI), 50 mg de adsorbente, pH 2, temperatura 25 °C.	[66]

Conclusiones

Los resultados de esta investigación evidencian que los adsorbentes obtenidos a partir de biomasa residual de pseudotallo y cáscara de banano son efectivos para la eliminación simultánea de uno o varios contaminantes en aguas reales, y que si bien se observa un porcentaje de remoción que haría atractiva la sustitución del carbón activado comercial por materiales de residuos agroindustriales, sería importante continuar realizando este tipo de investigaciones no solamente hacia las aguas residuales del sector de galvanoplastia sino en general, lo cual contribuiría en aspectos técnicos y económicos para la aplicación de estos adsorbentes en la descontaminación de efluentes y la contribución simultánea en la minimización de impactos ambientales del sector manufacturero. Adicionalmente, es imposible confrontar los resultados de este estudio con otras investigaciones puesto que no hay suficientes exploraciones frente a los procesos de adsorción para este tipo de efluentes reales. Además, no es posible afirmar radicalmente que los adsorbentes obtenidos son ideales para remover con las mismas eficiencias metales pesados presentes en cualquier agua residual del sector de la galvanoplastia, ya que los procesos manufactureros son cambiantes en el tiempo, por lo que las características fisicoquímicas del ARnD llegan a ser aleatorias, sin embargo, estos resultados demuestran que es posible utilizar adsorbentes económicos para la remoción eficiente y simultánea de metales pesados, sin necesidad de utilizar procesos químicos costosos, contaminantes y complejos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid por la financiación del proyecto de investigación titulado “Extracción de nanocelulosa a partir de cáscaras de banano y su evaluación potencial en la remoción de metales pesados presentes en aguas residuales no domésticas”, adscrito al Grupo de Investigación en Catálisis Ambiental y Energías Renovables (CAMER).

Referencias

- [1] Gorokhovskiy A, Vikulova M, Escalante-García JI, Tretyachenko E, Burmistrov I, Kuznetsov D, *et al.* Utilization of nickel-electroplating wastewaters in manufacturing of photocatalysts for water purification. *Process Saf. Environ. Prot.* 2020;134:208–216. doi.org/10.1016/j.psep.2019.11.040
- [2] Pereira FV, Gurgel LVA, Gil LF. Removal of Zn²⁺ from aqueous single metal solutions and electroplating wastewater with wood sawdust and sugarcane bagasse modified with EDTA dianhydride (EDTAD). *J. Hazard. Mater.* 2010;176(1–3):856–863. doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.11.115
- [3] Liu H, Ning S, Zhang S, Wang X, Chen L, Fujita T, *et al.* Preparation of a mesoporous ion-exchange resin for efficient separation of palladium from simulated electroplating wastewater. *J. Environ. Chem. Eng.* 2022;10(1):106966.
- [4] Ali I, Wan P, Raza S, Peng C, Tan X, Sun H, *et al.* Development of novel MOF-mixed matrix three-dimensional membrane capsules for eradicating potentially toxic metals from water and real electroplating wastewater. *Environ. Res.* 2022;215(2):113945. doi.org/10.1016/j.envres.2022.113945
- [5] Ghorpade A, Ahammed MM. Water treatment sludge for removal of heavy metals from electroplating wastewater. *Environ. Eng. Res.* 2018;23(1):92–98. doi.org/10.4491/eer.2017.065
- [6] Moersidik SS, Nugroho R, Handayani M, Kamilawati, Pratama MA. Optimization and reaction kinetics on the removal of Nickel and COD from wastewater from electroplating industry using Electrocoagulation and Advanced Oxidation Processes. *Heliyon.* 2020;6(2):e03319. doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03319
- [7] Pooja G, Kumar PS, G. Prasannamedha G, Varjani S, Vo DVN. Sustainable approach on removal of toxic metals from electroplating industrial wastewater using dissolved air flotation. *J. Environ. Manage.* 2021;295:113147. doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113147

- [8] Qu J, Tian X, Jiang Z, Cao B, Akindolie MS, Hu Q, *et al.* Multi-component adsorption of Pb(II), Cd(II) and Ni(II) onto microwave-functionalized cellulose: Kinetics, isotherms, thermodynamics, mechanisms and application for electroplating wastewater purification. *J. Hazard. Mater.* 2020;387:121718. doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121718
- [9] Huo Y, Khan A, Liu Y, Wang Z, Yu Y, Sun T, *et al.* Conversion of Fe-bearing minerals in sludge to nanorod erdite for real electroplating wastewater treatment: Comparative study between ferrihydrite, hematite, magnetite, and troilite. *J. Clean. Prod.* 2021;298:126826. doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126826
- [10] Li M, Hu Y, Zhou N, Wang S, Sun F. Hydrothermal treatment coupled with pyrolysis and calcination for stabilization of electroplating sludge: Speciation transformation and environmental risk of heavy metals. *J. Hazard. Mater.* 2022;438:129539. doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129539
- [11] Peng G, Deng S, Liu F, Li T, Yu G. Superhigh adsorption of nickel from electroplating wastewater by raw and calcined electroplating sludge waste. *J. Clean. Prod.* 2020;246:118948. doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118948
- [12] Mubarak MF, Zayed AM, Ahmed HA. Activated Carbon/Carborundum@Microcrystalline Cellulose core shell nano-composite: Synthesis, characterization and application for heavy metals adsorption from aqueous solutions. *Ind. Crops Prod.* 2022;182:114896. doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114896
- [13] Bedoya Betancur S, Amar Gil S, Ardila A. AN, Arriola V. E, Barrera Z. R, Hernández JA, *et al.* Developing bioadsorbents from orange peel waste for treatment of raw textile industry wastewater. *Desalin. Water Treat.* 2022;250:80–99. doi.org/10.5004/dwt.2022.28185
- [14] Nilamsari, Sofyana, Lubis MR, Prilyanti D, Maimun T. Combination of adsorption process using bioadsorbent from coffee ground and ultrafiltration membrane in removing iron and lead content from water. *Mater. Today Proc.* 2022;63(1):S115–S121. doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.051
- [15] Wang Q, Zhou C, Jie Kuang Y, Hui Jiang Z, Yang M. Removal of hexavalent chromium in aquatic solutions by pomelo peel. *Water Sci. Eng.* 2020;13(1):65–73. doi.org/10.1016/j.wse.2019.12.011
- [16] Yu H, Zheng L, Zhang T, Ren J, Chen W, Zhang L, *et al.* Adsorption Behavior of Cd (II) on TEMPO-oxidized Cellulose in Inorganic/Organic Complex Systems. *Environ. Res.* 2021;195:110848. doi.org/10.1016/j.envres.2021.110848
- [17] Gula A, Ma'amor A, Khaligh NG, Muhd Julkapli N. Recent advancements in the applications of activated carbon for the heavy metals and dyes removal. *Chem. Eng. Res. Des.* 2022;186:276–299. doi.org/10.1016/j.cherd.2022.07.051
- [18] Gupta B, Mishra A, Singh R, Thakur IS. Fabrication of calcite based biocomposites for catalytic removal of heavy metals from electroplating industrial effluent. *Environ. Technol. Innov.* 2021;21:101278. doi.org/10.1016/j.eti.2020.101278
- [19] Zhou Y, Liu Z, Bo A, Tana T, Liu X, Zhao F, *et al.* Simultaneous removal of cationic and anionic heavy metal contaminants from electroplating effluent by hydrotalcite adsorbent with disulfide (S²⁻) intercalation. *J. Hazard. Mater.* 2020;382:121111. doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121111
- [20] Karupppiah T, Uthirakrishnan U, Sivakumar SV, Authilingam S, Arun J, Sivaramakrishnan R, *et al.* Processing of electroplating industry wastewater through dual chambered microbial fuel cells (MFC) for simultaneous treatment of wastewater and green fuel production. *Int. J. Hydrogen Energy.* 2022;47(88): 37569-37576. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.034
- [21] Kokate S, Parasuraman K, Prakash H. Adsorptive removal of lead ion from water using banana stem scutcher generated in fiber extraction process. *Results Eng.* 2022;14:100439. doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100439
- [22] Ayala-Ruiz N, Malagón-Romero DH, Milquez-Sanabria HA. Exergoeconomic evaluation of a banana waste pyrolysis plant for biofuel production. *J. Clean. Prod.* 2022;359:132108. doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132108
- [23] Li T, Bian H, Wang W, Fan X, Tao L, Yu G, *et al.* Removal of low-concentration nickel in electroplating wastewater via incomplete decomplexation by ozonation and subsequent resin adsorption. *Chem. Eng. J.* 2022;435(1):134923. doi.org/10.1016/j.cej.2022.134923
- [24] Skoog DA, Holler FJ, Crouch SR. Principios de análisis instrumental. 6ta ed. México, D.F.: Cengage Learning; 2008.

- [25] Rajoria S, Vashishtha M, Sangal VK. Review on the treatment of electroplating industry wastewater by electrochemical methods. *Mater. Today Proc.* 2021;47(7):1472–1479. doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.165
- [26] Bankole MT, Abdulkareem AS, Tijani JO, Ochigbo SS, Afolabi AS, Roos WD. Chemical oxygen demand removal from electroplating wastewater by purified and polymer functionalized carbon nanotubes adsorbents. *Water Resour. Ind.* 2017;18:33–50. doi.org/10.1016/j.wri.2017.07.001
- [27] Cui J, Wang X, Yuan Y, Guo X, Gu X, Jian L. Combined ozone oxidation and biological aerated filter processes for treatment of cyanide containing electroplating wastewater. *Chem. Eng. J.* 2014;241:184–189. doi.org/10.1016/j.cej.2013.09.003
- [28] Bautitz IR Nogueira RFP. Degradation of tetracycline by photo-Fenton process-Solar irradiation and matrix effects. *J. Photochem. Photobiol. A Chem.* 2007;187(1):33–39. doi.org/10.1016/j.jphotochem.2006.09.009
- [29] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución 631 del 17 de marzo de 2015: Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Colombia, Minambiente; 2015.
- [30] Patel BY, Patel HK. Retting of banana pseudostem fibre using *Bacillus* strains to get excellent mechanical properties as biomaterial in textile & fiber industry. *Heliyon.* 2022;8(9):e10652. doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10652
- [31] Pathak PD, Mandavgane SA. Preparation and characterization of raw and carbon from banana peel by microwave activation: Application in citric acid adsorption. *J. Environ. Chem. Eng.* 2015;3(4A):2435–2447. doi.org/10.1016/j.jece.2015.08.023
- [32] Nemaleu JGD, Kaze RC, Tome S, Alomayri T, Assaedi H, Kamseu E, *et al.* Powdered banana peel in calcined halloysite replacement on the setting times and engineering properties on the geopolymer binders. *Constr. Build. Mater.* 2021;279:122480. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122480
- [33] Anniwaer A, Chaihad N, Zhang M, Wang C, Yu T, Kasai Y, *et al.* Hydrogen-rich gas production from steam co-gasification of banana peel with agricultural residues and woody biomass. *Waste Manag.* 2021;125:204–214. doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.042
- [34] Chavez-Guerrero L, Vazquez-Rodriguez S, Salinas-Montelongo JA, Roman-Quirino LE, García-Gómez NA. Preparation of all-cellulose composites with optical transparency using the banana pseudostem as a raw material. *Cellulose.* 2019;26: 3777–3786. doi.org/10.1007/s10570-019-02369-1
- [35] Baruah J, Bardhan P, Mukherjee AK, Chandra R, Mandal M, Kalita E. Integrated pretreatment of banana agrowastes : Structural characterization and enhancement of enzymatic hydrolysis of cellulose obtained from banana peduncle. *Int. J. Biol. Macromol.* 2022;201:298–307. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.12.179
- [36] Khoshk Rish S, Tahmasebi A, Wang R, Dou J, Yu J. Formation mechanism of nano graphitic structures during microwave catalytic graphitization of activated carbon. *Diam. Relat. Mater.* 2021;120:108699. doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108699
- [37] Xie L, Wu Y, Duan X, Li T, Jiang Y. Proteomic and physiological analysis provides an elucidation of *Fusarium proliferatum* infection causing crown rot on banana fruit. *Microbiol. Res.* 2022;256:126952. doi.org/10.1016/j.micres.2021.126952
- [38] Menéndez JA, Illán-Gómez MJ, León y León CA, Radovic LR. On the difference between the isoelectric point and the point of zero charge of carbons. *Carbon.* 1995;33(11):1655–1657.
- [39] Wu Q, Ren M, Zhan X, Li C, Li T, Yang Z, *et al.* Comparison of Cd(II) adsorption properties onto cellulose, hemicellulose and lignin extracted from rice bran. *LWT.* 2021;144:111230. doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111230
- [40] Hafemann E, Battisti R, Marangoni C, Machado RAF. Valorization of royal palm tree agroindustrial waste by isolating cellulose nanocrystals. *Carbohydr. Polym.* 2019;218:188–198. doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.04.086
- [41] Martimiano do Prado T, da Silva Catunda LG, Calegari ML, Correa DS, Machado SAS. Synthesis and characterization of 2D-carbonylated graphitic carbon nitride: A promising organic semiconductor for miniaturized sensing devices *Electrochim. Acta.* 2022;431:141094. doi.org/10.1016/j.electacta.2022.141094

- [42] Wang W, Li D, Zuo S, Guan Z, Xu H, Ding S, *et al.* Discarded-leaves derived biochar for highly efficient solar water evaporation and clean water production: The crucial roles of graphitized carbon. *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 2022;639:128337. doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.128337
- [43] Miller J. *Estadística para Química Analítica*. Segunda ed. Inglaterra, 1993.
- [44] S. Hokkanen, A. Bhatnagar A, Srivastava V, Suorsa V, Sillanpää M. Removal of Cd²⁺, Ni²⁺ and PO₄³⁻ from aqueous solution by hydroxyapatite-bentonite clay-nanocellulose composite. *Int. J. Biol. Macromol.* 2018;118(A):903–912. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.06.095
- [45] Santos PF, Neris JB, Luzardo FHM, Velasco FG, Tokumoto MS, Da Cruz RS. Chemical modification of four lignocellulosic materials to improve the Pb²⁺ and Ni²⁺ ions adsorption in aqueous solutions. *J. Environ. Chem. Eng.* 2019;7(5):103363. doi.org/10.1016/j.jece.2019.103363
- [46] Ekpete OA, Marcus AC, Osi V. Preparation and Characterization of Activated Carbon Obtained from Plantain (*Musa paradisiaca*) Fruit Stem. *J. Chem.* 2017;2017:8635615. doi.org/10.1155/2017/8635615
- [47] Zhou N, Chen H, Feng Q, Yao D, Chen H, Wang H, *et al.* Effect of phosphoric acid on the surface properties and Pb(II) adsorption mechanisms of hydrochars prepared from fresh banana peels. *J. Clean. Prod.* 2017;165:221–230. doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.111
- [48] Allwar A. Characteristics of Pore Structures and Surface Chemistry of Activated Carbons by Physisorption, Ftir And Boehm Methods. *IOSR J. Appl. Chem.* 2012;2(1):09–15. doi.org/10.9790/5736-0210915
- [49] Budinova T, Ekincci E, Yardim F, Grimm A, Björnbom E, Minkova V, *et al.* Characterization and application of activated carbon produced by H₃PO₄ and water vapor activation. *Fuel Process. Technol.* 2006;87(10):899–905. doi.org/10.1016/j.fuproc.2006.06.005
- [50] Mohd Salim R, Khan Chowdhury AJ, Rayathulhan R, Yunus K, Sarkar MZI. Biosorption of Pb and Cu from aqueous solution using banana peel powder. *Desalin. Water Treat.* 2016;57(1):303–314. doi.org/10.1080/19443994.2015.1091613
- [51] Rani K, Gomathi T, Vijayalakshmi K, Saranya M, Sudha PN. Banana fiber Cellulose Nano Crystals grafted with butyl acrylate for heavy metal lead (II) removal. *Int. J. Biol. Macromol.* 2019;131:461–472. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.064
- [52] Lavanya KM, Florence JAK, Vivekanandan B, Lakshmipathy R. Comparative investigations of raw and alkali metal free banana peel as adsorbent for the removal of Hg²⁺ ions. *Mater. Today. Proc.* 2021;55(2):321–326. doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.410
- [53] Mautner A, Kwaw Y, Weiland K, Mvubu M, Botha A, John MJ, *et al.* Natural fibre-nanocellulose composite filters for the removal of heavy metal ions from water. *Ind. Crops Prod.* 2019;133:325–332. doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.03.032
- [54] Selimin MA, Latif AFA, Er YC., Muhamad MS, Basri H. Lee TC. Adsorption efficiency of banana blossom peels (*musa acuminata* colla) adsorbent for chromium (VI) removal. *Mater. Today Proc.* 2022;57:1262–1268. doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.502
- [55] Darweesh MA, Elgendy MY, Ayad MI, Ahmed AMM, Kamel Elsayed NM, Hammad WA. A unique, inexpensive, and abundantly available adsorbent: composite of synthesized silver nanoparticles (AgNPs) and banana leaves powder (BLP). *Heliyon.* 2022;8(4):e09279. doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09279
- [56] Selambakkannu S, Othman NAF, Bakar KA, Shukor SA, Karim ZA. A kinetic and mechanistic study of adsorptive removal of metal ions by imidazole-functionalized polymer graft banana fiber. *Radiat. Phys. Chem.* 2018;153:58–69. doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.09.012
- [57] Darweesh MA, Elgendy MY, Ayad MI, Ahmed AMM, Elsayed NMK, Hammad WA. Adsorption isotherm, kinetic, and optimization studies for copper (II) removal from aqueous solutions by banana leaves and derived activated carbon. *South African J. Chem. Eng.* 2022;40:10–20. doi.org/10.1016/j.sajce.2022.01.002
- [58] Li Y, Liu J, Yuan Q, Tang H, Yu F, Lv X. A green adsorbent derived from banana peel for highly effective removal of heavy metal ions from water. *RSC Adv.* 2016;6(51):45041–45048. doi.org/10.1039/C6RA07460J
- [59] Yasim NSEM, Ismail ZS, Zaki SM, Azis MFA. Adsorption of Cu, As, Pb and Zn by banana trunk. *Malaysian J. Anal. Sci.* 2016;20(1):187–196.
- [60] Ali A, Saeed K, Mabood F. Removal of chromium (VI) from aqueous medium using chemically modified banana peels as efficient

- low-cost adsorbent. Alexandria Eng. J. 2016;55(3):2933–2942. doi.org/10.1016/j.aej.2016.05.011
- [61] Van Thuan T, Quynh BTP, Nguyen TD, Ho VTT, Bach LG. Response surface methodology approach for optimization of Cu²⁺, Ni²⁺ and Pb²⁺ adsorption using KOH-activated carbon from banana peel. Surfaces and Interfaces. 2017;6:209–217. doi.org/10.1016/j.surfin.2016.10.007
- [62] Ajmi RN, Sultan M, Hanno SH. Bioadsorbent of chromium, cadmium and lead from industrial waste water by waste plant. J. Pharm. Sci. Res. 2018;10(3):672–674.
- [63] Al-Qahtani KM. Water purification using different waste fruit cortexes for the removal of heavy metals. J. Taibah Univ. Sci. 2016;10(5):700–708. doi.org/10.1016/j.jtusci.2015.09.001
- [64] Badessa TS, Wakuma E, Yimer AM. Biosorption for effective removal of chromium(VI) from wastewater using Moringa stenopetala seed powder (MSSP) and banana peel powder (BPP). BMC Chem. 2020;14(1):71. doi.org/10.1186/s13065-020-00724-z
- [65] Negroiu M, Turcanu AA, Matei E, Răpă M, Covaliu CI, Predescu AM, *et al.* Novel adsorbent based on banana peel waste for removal of heavy metal ions from synthetic solutions. Materials (Basel). 2021;14(14):3946. doi.org/10.3390/ma14143946
- [66] Xu S, Yu W, Liu S, Xu C, Li J, Zhang Y. Adsorption of hexavalent chromium using banana pseudostem biochar and its mechanism. Sustain. 2018;10(11):4250. doi.org/10.3390/su10114250