

Artículo de investigación

<https://doi.org/10.47460/minerva.v5i15.170>

Remoción de cromo y cobre en muestras de aguas sintéticas utilizando cáscaras de maracuyá

Yandry Adrián Santamaría Zambrano
<https://orcid.org/0009-0008-5902-0029>
ysantamaria7286@utm.edu.ec
Universidad Técnica de Manabí
Portoviejo-Ecuador

Víctor Andrés Segovia Quiñonez
<https://orcid.org/0009-0003-9136-0166>
vsegovia6054@utm.edu.ec
Universidad Técnica de Manabí
Portoviejo-Ecuador

Segundo Alcides García Muentes
<https://orcid.org/0000-0002-8152-3406>
segundo.garcia@utm.edu.ec
Universidad Técnica de Manabí
Portoviejo-Ecuador

Virginia Annabelt Sánchez Mendoza
<https://orcid.org/0000-0001-6366-9084>
virginia.sanchez@utm.edu.ec
Universidad Técnica de Manabí
Portoviejo-Ecuador

Ariana Milena García Bowen
<https://orcid.org/0000-0001-6893-0843>
arianag331@gmail.com
Universidad Técnica de Manabí
Portoviejo-Ecuador

Autor de correspondencia: ysantamaria7286@utm.edu.ec

Recibido (05/05/2024), Aceptado (02/09/2024)

Resumen: En este trabajo se usó la cáscara de maracuyá modificada, como biomasa para la remoción de cromo y cobre presente en las aguas. Se consideraron como factores experimentales el pH, el tiempo de contacto y la granulometría. Como constantes se consideraron la velocidad de agitación, la dosificación y la temperatura. Los resultados mostraron la disminución del cromo en un 69 % usando una composición con pH 4, 90 min y 300 μm . Mientras que para el cobre se logró remover un 74,4 % a pH 4, con 120 min y 300 μm , partiendo de concentraciones iniciales para ambos metales de 30 ppm. Los resultados mostraron que la cáscara de maracuyá es un potencial como agente de remoción efectivo para el cromo y el cobre en aguas sintéticas. Esto respalda su posible aplicación en la purificación de aguas contaminadas por metales, lo que podría contribuir a la protección del medio ambiente.

Palabras clave: remoción, metales pesados, cáscara de maracuyá, cromo, cobre.

Removal of chromium and copper from synthetic water samples using passion fruit peels

Abstract.- In this work, modified passion fruit husk was used as biomass for the removal of chromium and copper present in the waters. PH, contact time, and particle size were considered experimental factors. Stirring speed, dosage, and temperature were considered constants. The results showed a 69% decrease in chromium using a pH 4, 90 min, and 300 μm composition. For copper, 74.4% was removed at pH 4, with 120 min and 300 μm , based on initial concentrations of 30 ppm for both metals. The results showed that passion fruit peel is a potential effective removal agent for chromium and copper in synthetic waters. This supports its possible application in the purification of metal-contaminated water, which could contribute to environmental protection.

Keywords: removal, heavy metals, passion fruit shell, chromium, copper.

I. INTRODUCCIÓN

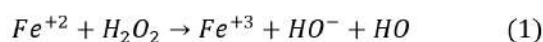
En la actualidad la contaminación del ambiente es considerada como uno de los problemas más preocupantes para los seres vivos, pues el acelerado ritmo en la pérdida de suelos aptos para el cultivo y contaminación de los cuerpos de aguas han sido provocados principalmente por el mal manejo de los residuos sólidos [1]. Otro factor contaminante frecuente en los efluentes y suelos, es la presencia de metales pesados como lo son el mercurio (Hg), el cadmio (Cd), el cromo (Cr), el arsénico (As), el plomo (Pb) y el níquel (Ni), que ocasionan altos grados de contaminación y dificultan su tratamiento [3]. Estos metales engloban uno de los grupos más peligrosos, ya que se caracterizan por su baja biodegradabilidad, alta toxicidad a bajas concentraciones y su capacidad de acumulación dentro de los organismos.

El cobre es un metal ampliamente utilizado; existiendo muchas fuentes potenciales de contaminación, las cuales van desde la minería y fundición hasta la industria de agroquímicos. Pese a que el cobre es un nutriente esencial en pequeñas cantidades, es tóxico en dosis altas (>5 mg/l) pudiendo provocar irritación estomacal e intestinal, daños hepáticos, renales y anemia[4]. Con respecto al cromo, este en estado trivalente es esencial para los seres humanos, promoviendo la acción de la insulina [5]. Mientras que sus derivados hexavalentes (cromatos y dicromatos), en altas concentraciones producen disminución en la incorporación de calcio, potasio, hierro, manganeso y fósforo [6]. Ante las problemáticas, algunas investigaciones proponen la remoción de metales pesados utilizando residuos de origen orgánico, como una alternativa prometedora para el tratamiento de aguas industriales, ya que logran remover grandes porcentajes de iones metálicos, usando las capacidades lignocelulósicas de la biomasa. Algunos autores [7], sugieren el uso de la cascara de maracuyá como una alternativa para la remoción de metales pesados, dado que el procesamiento agroindustrial de esta fruta genera gran cantidad de residuos, de la cual se destina una mínima cantidad para la elaboración de abonos y lo demás es enviado a rellenos sanitarios [8].

Generalmente las aguas provenientes de las industrias pueden ser tratadas eficazmente por métodos químicos convencionales, tratamientos biológicos y/o procesos de adsorción[9]. Sin embargo, en ocasiones dichos procedimientos resultan inadecuados, permitiendo que se excedan los valores límites de descargas a cuerpos de agua dulce establecidos en la Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes [10]. En estos casos, se recurre al uso de los llamados procesos de oxidación avanzada (POA), mismos que pueden aplicarse a la remediación y detoxificación de dichos cuerpos de aguas. Estos métodos pueden realizarse solos o combinados con procesos convencionales [9].

II. DESARROLLO

Existen numerosas investigaciones sobre el uso de POA para el tratamiento de aguas residuales. En donde, las relacionadas con el proceso de oxidación tipo Fenton llaman la atención; según [11], por su efectividad para la descontaminación de aguas residuales procedentes de varias industrias. El proceso Fenton consiste en la adición de sales de hierro () en presencia de peróxido de hidrógeno (), en medio ácido, dando como resultado la formación de radicales °OH como se muestra en la ecuación (1), siendo una de las técnicas más populares debido a su fuerte potencial de oxidación y su alta eficiencia en la degradación de una amplia gama de contaminantes a concentraciones elevadas [12], [13].



La reacción de Fenton según la literatura científica es utilizada, en la degradación de materia orgánica, remoción de contaminantes inorgánicos y mejora de procesos biológicos, como: el tratamiento de aguas residuales con polifenoles [14], degradación de oxitetraciclina [15], tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios [16], eliminación de trazas de metales [17], adsorción de 2-nitrofenol en biomasa de piña [18]; considerando sus propiedades oxidantes la reacción de Fenton también puede ser aplicada en la remoción de metales con material de origen orgánico, como lo son los desechos agroindustriales mediante el enriquecimiento del material lignocelulósico (cáscara); aumentando así la capacidad de remoción [19], [20]. Por lo tanto, combinando la capacidad adsorbente de los residuos orgánicos y el proceso Fenton se podría promover resultados mucho más favorables que las técnicas aisladas.

III. METODOLOGÍA

El estudio se desarrolló bajo un enfoque cualitativo y descriptivo, lo que permitió comprender los diversos feEl desarrollo experimental de este trabajo inició con la obtención y tratamiento de la cáscara de maracuyá (figura 1) y la preparación de las muestras de aguas sintéticas que contienen los iones metálicos de cromo y cobre.

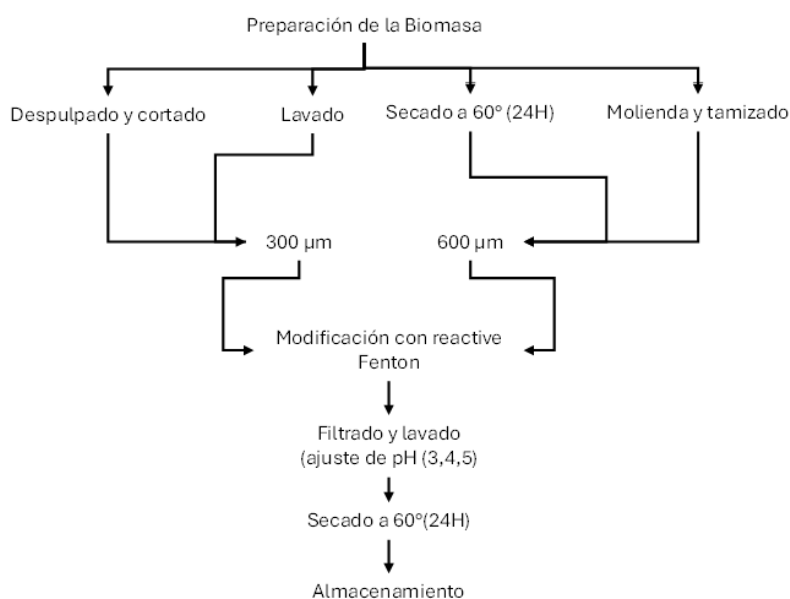


Fig 1. Proceso de preparación de la cáscara de maracuyá modificada con reactivo Fenton para la retención de Cr (VI) y Cu (II).
Fuente: Elaboración propia.

A. Preparación de biomasa

Como materia prima se utilizó el fruto de maracuyá, recolectada en el mejor estado posible para posteriormente ser sometida a los siguientes tratamientos fisicoquímicos:

- **Despulpado y cortado:** el pretratamiento de la cáscara comienza eliminando el endocarpio (pulpa) y semillas de la fruta, para luego comenzar el proceso de cortado del mesocarpio (cáscara), en trozos de alrededor de 1cm x 1cm.
- **Lavado:** el lavado se realizó en 3 ciclos con agua destilada para eliminar las trazas de pulpa, azúcares reductores y suciedad que puedan intervenir en el proceso de remoción de los metales.
- **Secado:** para este proceso se ingresó la cáscara de maracuyá a una estufa de secado (Thermo Scientific™) durante un periodo de 24 horas a una temperatura de 60°C.

- Molienda y Tamizado: a continuación, el tamaño de la cáscara de maracuyá es reducido, mediante un molino pulverizador (High-Speed Multi-function Comminutor 1000A), durante 2 min; la clasificación, se llevó a cabo con tamices, obteniendo granulometrías de 300 y 600 μm [4].
- Modificación con Fenton: se colocó sobre una plancha (Thermo Scientific™), un beaker con 1000 ml de agua destilada, hasta alcanzar los 60°C, se añadieron 0,5 g de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 5 ml H_2SO_4 , 2,6 ml de H_2O_2 y se llevó a una agitación de 260 rpm por 5 min. Concurrido este tiempo, se añadieron 50 g de cáscara de maracuyá y se mantuvo en la plancha de agitación por 1 h bajo las mismas condiciones.
- Ajuste de pH: finalizado el tiempo de modificación de la cáscara de maracuyá, se llevó a ciclos de filtrados y lavados constantes con agua destilada hasta obtener pH 3, 4 y 5.
- Secado: la biomasa es llevada nuevamente a la estufa durante 24 horas, a temperatura de 60 °C.
- Almacenamiento: transcurrido el tiempo de secado, la cáscara de maracuyá modificada con Fenton es finalmente colocada en envases herméticos rotulados respectivamente [21].

B. Caracterización de la biomasa

Se procedió a caracterizar la biomasa, antes y después de la modificación con el reactivo Fenton, determinando los grupos funcionales presentes, encargados de la retención y/o remoción de los iones de Cr (VI) y Cu (II), mediante un análisis FTIR (Espectroscopía de Infrarrojo con transformada de Fourier). Además, se determinó el porcentaje de cenizas y humedad con ayuda de una mufla (Thermolyne - FB1410M - Thermo Scientific™) y termobalanza (BOECO Germany BMA I50).

C. Preparación de soluciones madres y curvas de calibración.

Se prepararon soluciones madres de Cr (VI) y Cu (II) a 1000 ppm cada una, usando como reactivos base el cromato de potasio (K_2CrO_4) y sulfato de cobre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$). Las curvas de calibración se realizaron por dilución de las soluciones madres a las concentraciones deseadas y específicas para cada metal descrito en la Tabla 1. En el caso del cromo la curva de calibración se elaboró en un rango de 0 – 3 mg/l-1, bajo el método colorimétrico de la difenilcarbazida descrito por APHA [22]. Mientras que, para el cobre, se trabajó en un rango de concentración de 0 – 5 mg/l-1 con el método del bicinconinato aprobado por United States Environmental Protection Agency [23].

Tabla 1. Condiciones analíticas y coeficientes de correlación de las curvas de calibración (UV/VIS).

Metal	Longitud de onda (nm)	Coefficiente de correlación (R2)	Rango de concentración
Cr	540	0,990	0 – 3 mg/l ⁻¹
Cu	560	0,999	0 – 5 mg/l ⁻¹

Fuente: Elaboración propia.

Adicional a esto se utilizaron checkers de la marca HANNA: HI749 Checker®HC (Chromium VI HR-HANNA) para el cromo, y en el caso del cobre HI702 Checker®HC (Copper HR-HANNA), como pruebas rápidas, para verificar que las concentraciones de las diluciones realizadas para los estándares de las curvas de calibración sean las correctas.

D. Ensayos de remoción

Las muestras se prepararon por dilución a una concentración de 30 ppm para cada metal, partiendo de las soluciones madres de K_2CrO_4 y $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (1000 ppm). Los experimentos de remoción se realizaron bajo las condiciones de operación que se muestran en la Tabla 2. Para ello se pesaron 10g de CMF, a 300 y 600 μm , de los pH 3, 4 y 5 y se colocaron en contacto con 1000 ml de la solución (muestras de agua sintética), este procedimiento se realizó a tiempos de 30, 60, 90 y 120 min para cada metal, cada experimentación se realizó por triplicado.

Tabla 2. Condiciones experimentales para pruebas de remoción.

Especie	C ₀ (ppm)	pH	Dosificación de CM (g/L)	Agitación (rpm)	Granulometría (μ m)	Tiempo de contacto (min)
Cr	30	3	10	260	300 600	30
		4				60
		5				90
						120
Cu	30	3	10	260	300 600	30
		4				60
		5				90
						120

Fuente: Elaboración propia.

Para los análisis de la concentración final de los metales en el espectrofotómetro, se realizaron diluciones, tomando 2,5 ml de las muestras tras el proceso de remoción, enrasando con agua destilada hasta 25 ml; con el propósito de obtener lecturas que se encuentren en rango de concentración de las curvas realizadas y añadiendo el reactivo color para cada metal, según los métodos colorimétricos de la difenilcarbazida y del bicinconinato citados anteriormente; realizando las lecturas en el espectrofotómetro UV-Visible a longitudes de onda de 540 y 560 nm para el Cromo (VI) y Cobre (II) respectivamente.

IV. RESULTADOS

A. Caracterización del bioadsorbente.

En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos para el porcentaje de humedad y cenizas realizados a la biomasa, se obtuvo un porcentaje de cenizas bajo (8,71%), el cual resulta efectivo en la remoción debido a que altas cantidades de impurezas interfieren en el proceso de remoción, mientras que el porcentaje de humedad es de 9,83%.

Tabla 3. Caracterización del bioadsorbente.

Parámetros	Autores	Otros estudios	Fuente
% Humedad	9,83	12,5	[24]
		12,22	[25]
% Cenizas	8,71	10,46	[26]
		8,57	[27]

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Tabla 3, los resultados obtenidos en la determinación de humedad y cenizas son favorables y similares a los resultados presentados por otros autores, garantizando una correcta calidad y vida útil del bioadsorbente evitando la proliferación de bacterias y/o rápida degradación. Para la determinación de los grupos funcionales involucrados en la remoción, se utilizó la técnica de espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR). En la Figura 2 se muestran los resultados.

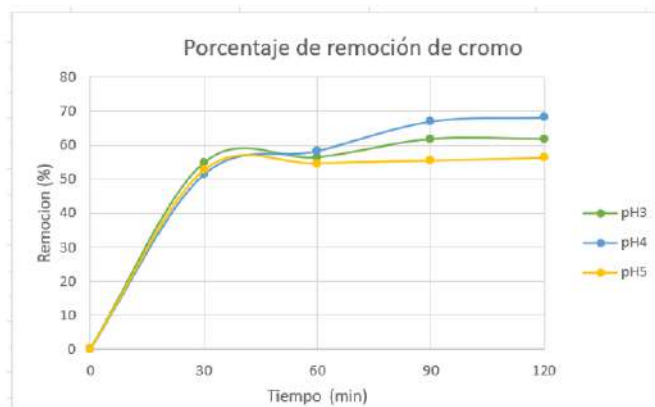


Fig 2. Porcentaje de remoción de cromo para diferentes valores de pH y 600 μm .

Fuente: Elaboración propia.

Mientras que en la Figura 3 se observan los porcentajes para 300 μm . Se presenta una relación entre el tiempo en minutos y el porcentaje de remoción de cromo, comparando tres diferentes niveles de pH: 3, 4 y 5. En el eje horizontal se muestra el tiempo transcurrido desde el inicio del proceso hasta los 120 minutos, mientras que en el eje vertical se representa el porcentaje de cromo removido, que va de 0% a 80%. Durante los primeros 30 minutos, todas las curvas –representando pH 3, pH 4 y pH 5– exhiben un aumento rápido en el porcentaje de remoción de cromo. Alrededor del minuto 30, todas las curvas alcanzan aproximadamente un 50% de remoción de cromo, indicando que la fase inicial del proceso es muy efectiva en la eliminación del contaminante. A partir de los 30 minutos, las curvas empiezan a estabilizarse, aunque no de manera idéntica. Para el pH 3 y pH 5, la remoción de cromo parece estabilizarse justo por debajo del 60%. En contraste, para el pH 4, la curva sigue incrementándose lentamente hasta estabilizarse cerca del 70%. Este comportamiento sugiere que, aunque el aumento rápido inicial es común a todos los niveles de pH, la eficacia sostenida del proceso varía según el pH.

Comparando los tres niveles de pH, es evidente que el pH 4 es el más efectivo para la remoción de cromo a lo largo del período estudiado, alcanzando un porcentaje de remoción de aproximadamente el 70% al final de los 120 minutos. En cambio, tanto el pH 3 como el pH 5 muestran un comportamiento similar, con una remoción que se estabiliza en torno al 60%.

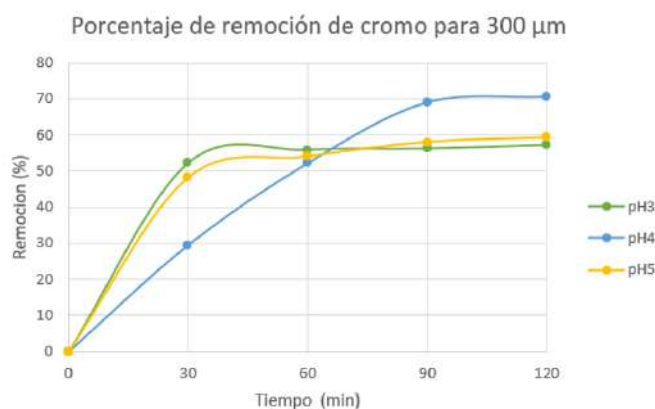


Fig 3. Porcentaje de remoción de cromo para diferentes valores de pH y 300 μm .

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 2 se aprecia el espectro de la cáscara de maracuyá obtenido mediante FTIR, donde se evidencian varios picos que están comprendidos entre 4000 y 1500 cm^{-1} , rango que corresponde al de los grupos funcionales [28], identificando un pico pronunciado a 3323 cm^{-1} , que indica la presencia de grupos hidroxilos libres (-OH), los cuales están presentes en la superficie de la hemicelulosa, celulosa, lignina y pectina [29]. Entre los 3000 y 2800 cm^{-1} , aparecen bandas ligadas al enlace de estiramiento (C-H), por lo cual se interpreta que el pico de 2925 cm^{-1} , está asociado a la presencia de grupos metilo presentes en la mayoría de los compuestos orgánicos [30]. Los picos de 1597 y 1733 cm^{-1} , pueden estar asociados a uniones dobles como (C=C, C=N, C=O) que están presentes en los grupos carboxilo (COOH) y acetilo (COOCH₃) de la lignina, hemicelulosa y pectina [31]. Y los picos de entre 500 y 1500, son resultado de varios tipos de vibraciones de enlace, a este rango se le conoce como "huella digital" de carbohidratos, como se puede evidenciar en la figura 4.

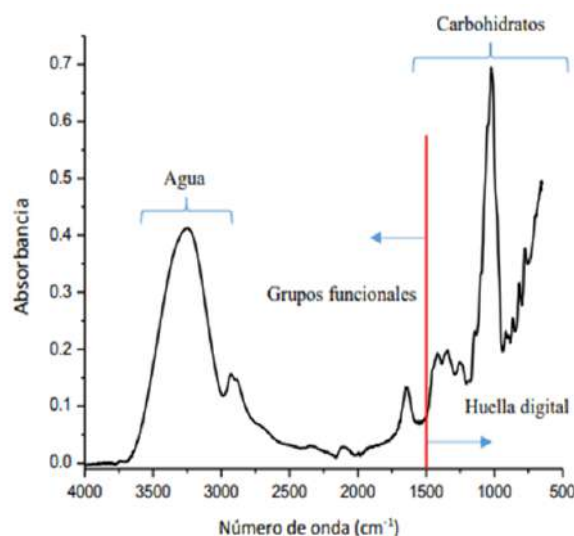
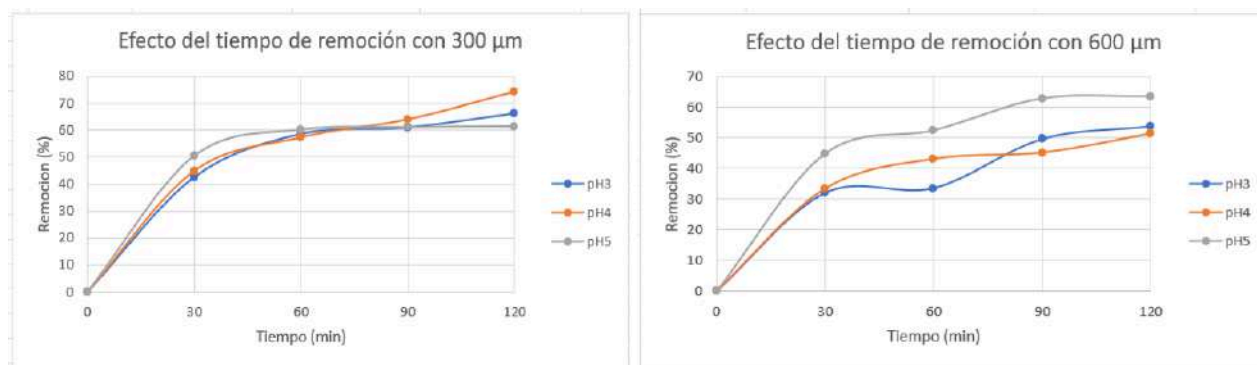


Fig 4. Espectro de infrarrojo con la identificación según el número de onda.
Fuente: [28].

En la figura 4 se observa que los diferentes espectros tienen la aparición de picos en los mismos números de onda, pero con diferente intensidad relativa. Interpretando que el espectro de la cáscara de maracuyá es semejante a los de la cáscara de maracuyá modificada. La variación de la intensidad de algunos picos de la cáscara de maracuyá modificada se debe a la modificación de la estructura de la cáscara de maracuyá original mediante la reacción de fenton y su posterior remoción de iones metálicos.

B. Efecto del tiempo de contacto

El efecto del tiempo de contacto sobre el porcentaje de remoción de los iones metálicos a partir de la cáscara de maracuyá modificada se evaluó en un periodo de 30 a 120 minutos y los resultados son mostrados en la figura 5.



(a) (b)
Fig 5. Efecto del tiempo de contacto en la remoción de cromo (a) con 300 µm; (b) con 600 µm.
Fuente: Elaboración propia.

En la fig. 5a se observa que, al inicio del proceso, en el minuto 0, el porcentaje de remoción de cromo es del 0% para todos los niveles de pH, lo cual es esperado ya que el proceso no ha comenzado. Durante los primeros 30 minutos, las curvas para los tres niveles de pH muestran un incremento rápido en el porcentaje de remoción, alcanzando entre un 50% y 60% de remoción. Esto indica que la mayor parte de la remoción de cromo ocurre en la fase inicial del proceso. A partir de los 30 minutos, las curvas comienzan a diferenciarse. Para el pH 3 (línea azul), la remoción de cromo se estabiliza alrededor del 60%. La curva correspondiente al pH 4 (línea naranja) continúa aumentando de manera más sostenida, alcanzando un porcentaje de remoción cercano al 75% al final del período de 120 minutos, lo que la posiciona como la condición más efectiva en este estudio. Por otro lado, la curva del pH 5 (línea gris) se comporta de manera intermedia, estabilizándose cerca del 70%.

En la fig. 5b se observa que, a partir de los 30 minutos, las curvas comienzan a estabilizarse, pero muestran diferencias notables. La curva correspondiente al pH 5 (línea gris) alcanza el mayor porcentaje de remoción, estabilizándose alrededor del 60% a los 60 minutos y continuando con un leve incremento hasta llegar cerca del 65% a los 120 minutos. Esta curva muestra la mayor eficacia de remoción de cromo entre los tres niveles de pH analizados. La curva del pH 4 (línea naranja) también muestra un aumento inicial rápido, alcanzando cerca del 40% a los 30 minutos, pero luego su incremento es más gradual, estabilizándose alrededor del 50% al final del período de 120 minutos.

C. Efecto del pH

El efecto del pH se evaluó a valores de 3, 4 y 5, bajo las siguientes condiciones: concentración inicial de las muestras 30 ppm para cada metal, dosificación de 10 g/L de CMF, temperatura ambiente, 260 rpm y tiempos controlados de 90 min en el caso del Cr(VI) y 120 min para Cu(II). Se observó que el porcentaje de remoción de Cr VI y Cu II a las diferentes concentraciones de pH, se logra evidenciar que el mayor porcentaje de remoción para ambos metales ocurre a un pH de 4. Se observó además que, el pH 5 proporciona las mejores condiciones para la remoción de cromo con partículas de 300 µm, logrando el mayor porcentaje de remoción al final del período de 120 minutos. Los pH 3 y 4, aunque efectivos, muestran una eficiencia ligeramente menor y estabilizándose en niveles similares al final del experimento. Este hallazgo subraya la importancia de ajustar y optimizar el pH en procesos de tratamiento de agua para maximizar la eficiencia de remoción de contaminantes. Además, se observa que la mayor parte de la remoción ocurre en la fase inicial del proceso, destacando la rápida interacción entre el cromo y el medio de remoción en los primeros minutos.

D. Efecto de la granulometría

Del mismo modo en la Figura 3, los resultados experimentales indican que el tamaño de la biomasa casi no influye en la capacidad de remoción en el caso del Cr VI, ya que presentan valores muy cercanos; por el contrario, para el Cu II se encuentra que el tamaño de 300 μm , es el que presenta mayor porcentaje de remoción en comparación a la granulometría de 600 μm . De este modo se establece que, a un menor tamaño, se puede dar un aumento en el área superficial; sin embargo, es recomendable realizar estudios de caracterización de poros para cada biomasa en específico. De acuerdo con la literatura, el aumento de microporos aumenta el número de sitios accesibles, pero no puede ser relacionado con el tamaño de partícula [40], [41]. Entonces la influencia del tamaño de la biomasa en el proceso de remoción parece ser función tanto del tipo de biomasa, como del ion metálico que se desea remover.

Tabla 4. Análisis de Varianza para porcentaje de remoción de Cr VI - Suma de Cuadrados Tipo III.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
A: Granulometria	7,5E-7	1	7,5E-7	0,12	0,7621
B: Ph	0,0304222	2	0,0152111	2433,77	0,0004
C: Tiempo	0,000352083	1	0,000352083	56,33	0,0173
Interacciones					
AB	0,0040065	2	0,00200325	320,52	0,0031
AC	0,00001875	1	0,00001875	3,00	0,2254
BC	0,0000521667	2	0,0000260833	4,17	0,1933
Residuos	0,0000125	2	0,00000625		
Total (corregido)	0,0348649	11			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Fuente: Elaboración propia

La tabla 4. ANOVA descompone la variabilidad de porcentaje de remoción del Cr VI en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que 3 valores-P son menores que 0,05, estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre el porcentaje de remoción de CR VI con un 95,0% de nivel de confianza. Por otra parte, la hipótesis nula (H_0) afirma que no hay diferencias significativas en la remoción de Cr VI entre las diferentes condiciones de granulometría, pH y Tiempo. Los resultados del análisis de ANOVA indican que el factor de pH (B: Ph) y el factor de Tiempo (C: Tiempo) tienen valores-P menores que 0,05, lo que sugiere que tienen un efecto estadísticamente significativo en la remoción de CR VI. Por lo tanto, rechazamos la hipótesis nula para estos factores. Además, el análisis ANOVA para el Cr III, analiza la varianza en la remoción de cromo bajo diferentes condiciones experimentales, incluyendo granulometría, pH y tiempo. En esta tabla, se pueden observar los efectos principales y las interacciones entre estos factores, reflejados en la suma de cuadrados, los grados de libertad, el cuadrado medio, la razón-F y el valor-P para cada caso. Empezando por la granulometría, se observa que tiene un impacto significativo en la remoción de cromo. Esto se evidencia por un valor-P de 0,0041, que es mucho menor que el umbral común de significancia de 0,05, y una alta razón-F de 242,49. Estos resultados sugieren que la granulometría influye fuertemente en la eficiencia de remoción de cromo, siendo un factor crítico para considerar en el proceso. Por otro lado, el pH muestra un valor-P de 0,0548, que es ligeramente superior al umbral de significancia. Aunque no es concluyentemente significativo, la razón-F de 17,26 indica que el pH podría tener un impacto considerable en la remoción de cromo, aunque este análisis específico no proporciona una prueba definitiva. El tiempo también demuestra ser un factor significativo, con un valor-P de 0,0209 y una razón-F de 46,29. Estos resultados resaltan la importancia del tiempo en el proceso de remoción de cromo, indicando que la duración del tratamiento es un aspecto clave para lograr una alta eficiencia.

Al analizar las interacciones, la interacción entre granulometría y pH muestra un valor-P de 0,0098 y una alta razón-F de 100,82, lo que sugiere una interacción significativa. Esto implica que la combinación de estos dos factores tiene un efecto notable en la remoción de cromo, posiblemente indicando que ciertos tamaños de partícula funcionan mejor con niveles específicos de pH. La interacción entre granulometría y tiempo no resulta significativa, con un valor-P de 0,3500 y una baja razón-F de 1,46, lo que sugiere que estos dos factores no interactúan de manera significativa para influir en la remoción de cromo.

E. Rendimiento de adsorción. Efecto de la dosis de adsorbente

Se calculó la cantidad de adsorbato removido por gramo de adsorbente (mg/g), $q(\text{mg/g}) = \frac{V(C_0 - C)}{m}$ (2) donde V corresponde al volumen de la solución (L), C_0 y C son las concentraciones finales e iniciales de los iones metálicos presentes en el agua (mg/L) y m es la dosis del material adsorbente (g). Se realizó la comparación para las mejores condiciones obtenidas para cada metal y los resultados se muestran en la Figura 6.

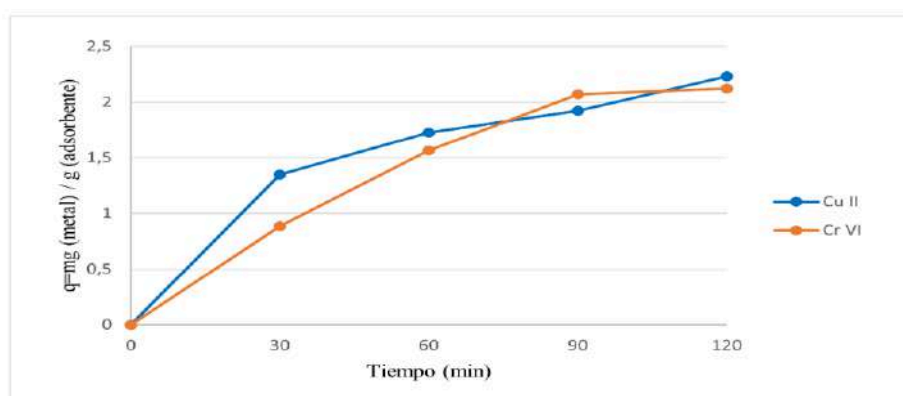


Fig 6. Cantidad de Cromo VI y Cu II (mg) removido por gramo de biomasa (cáscara de maracuyá fortificada).
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 6 se observa la cantidad de iones metálicos en mg que es removida por cada gramo de cáscara de maracuyá fortificada a los diferentes tiempos de contacto, donde se evidencia que a 90 min se logró remover un máximo de 2,07 mg de Cr VI, y a 120 min se removió 2,23 mg de Cu II, por gramo de cáscara de maracuyá fortificada respectivamente. Estos resultados indican la existencia de una buena afinidad entre los iones metálicos y la biomasa (cáscara de maracuyá fortificada) que contiene diversos polímeros, principalmente la pectina y lignina, donde se encuentran grupos carboxilo (COOH), carbonilo (CO) e hidroxilo (OH).

F. Influencia del tratamiento tipo Fenton

Algunos autores mencionan que el proceso tipo fenton puede aumentar de manera significativa la capacidad de remoción de iones metálicos, debido a que se da un incremento de los sitios disponibles aptos para la adsorción de los iones metálicos [17], [19]. Por ello se realizó una comparación de las capacidades de remoción entre la cáscara de maracuyá fortificada y la original sin modificaciones. También se varió la concentración inicial de la solución contaminada con los iones metálicos, debido a que el incremento o disminución de la concentración de la solución puede incrementar o disminuir el porcentaje de remoción.

Los resultados del porcentaje de remoción de cromo y cobre a partir de soluciones iniciales de diferentes concentraciones (30, 20, 10 y 5 ppm) utilizando cáscara de maracuyá fortificada y cáscara de maracuyá original. Para el cromo, la remoción es significativamente mayor cuando se utiliza cáscara de maracuyá fortificada en comparación con la original, con diferencias que varían de 16,9% a 11,0% dependiendo de la concentración inicial. Por ejemplo, para una concentración inicial de 30 ppm de cromo, la remoción con la cáscara fortificada es del 69,0%, mientras que con la cáscara original es del 52,1%, mostrando una diferencia de 16,9%. A medida que disminuye la concentración inicial de cromo, la diferencia en la remoción entre las dos condiciones se reduce, aunque la cáscara fortificada sigue siendo más efectiva. En el caso del cobre, también se observa una mayor eficiencia de remoción con la cáscara de maracuyá fortificada en comparación con la original. La remoción con la cáscara fortificada varía entre 74,4% y 91,2%, mientras que con la cáscara original varía entre 62,9% y 79,2%. Las diferencias en la remoción entre las dos condiciones oscilan entre 11,5% y 14,2%, siendo más pronunciadas en concentraciones iniciales más bajas. Por ejemplo, para una concentración inicial de 5 ppm de cobre, la remoción con la cáscara fortificada es del 91,2%, frente al 79,2% con la cáscara original, resultando en una diferencia de 12,0%. En resumen, la cáscara de maracuyá fortificada demuestra una mayor eficacia en la remoción de ambos metales, cromo y cobre, en comparación con la cáscara de maracuyá original, destacando su potencial como un material mejorado para la descontaminación de soluciones acuosas. Se observó, además, en el estudio de ANOVA, que se descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 7,76478, es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 2 variables con un nivel del 5% de significación. Dado que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05 (0,0146 en este caso), se rechaza la hipótesis nula. Esto indica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las dos variables con un nivel de significancia del 5%. Utilizando una dosificación de 10 g/L y las mejores condiciones establecidas previamente, se obtuvieron diferencias significativas en los porcentajes de remoción de cáscara de maracuyá fortificada con los obtenidos utilizando la cáscara original, se puede observar un incremento en la capacidad de remoción de la versión modificada. Además, los intervalos de confianza nos indican que podemos estar razonablemente seguros de que las verdaderas medias de los porcentajes de remoción se encuentran dentro de los intervalos especificados. Estos valores son similares a los obtenidos por Kupeta et al [18], donde también se evidencian diferencias significativas en sus resultados al momento de comparar las capacidades de adsorción de la biomasa cruda con la modificada, demostrando la efectividad del proceso fenton. Un análisis comparativo del porcentaje de remoción de cromo en dos condiciones experimentales diferentes permitió el siguiente análisis: Para ambas condiciones (CM (Condición de Muestra) y CMF (Condición de Muestra Final)), se reportan la media del porcentaje de remoción, el error estándar agrupado, y los límites inferior y superior del intervalo de confianza al 95%. En el caso de la condición CM, la media del porcentaje de remoción es del 69,6% con un error estándar de 3,47015%. Los límites inferior y superior del intervalo de confianza son 64,3372% y 74,8628%, respectivamente. Para la condición CMF, la media del porcentaje de remoción es mayor, con un 83,275% y el mismo error estándar de 3,47015%, mientras que los límites del intervalo de confianza son 78,0122% y 88,5378%. Comparando ambas condiciones, se observa que la condición CMF presenta un porcentaje de remoción significativamente más alto que la condición CM, con una diferencia de aproximadamente 13,675 puntos porcentuales en la media. Esto indica que las modificaciones o tratamientos aplicados en la condición CMF son más efectivos para la remoción de cromo. Los intervalos de confianza no se solapan, lo que refuerza la significancia de la diferencia entre ambas condiciones. En general, la condición CMF demuestra una mayor eficacia en la remoción de cromo, sugiriendo que las estrategias implementadas en esta condición podrían ser más adecuadas para optimizar los procesos de tratamiento de agua contaminada con cromo.

CONCLUSIONES

Los resultados de remoción obtenidos utilizando la cáscara de maracuyá fortificada demostraron una reducción significativa de la concentración inicial de cromo y cobre disueltos en las muestras de aguas sintéticas, obteniendo mejores resultados en comparación a cuando se utiliza la cáscara de maracuyá, obteniendo valores óptimos con pH 4, 260 rpm de agitación, 300 μm de tamaño de partícula y una dosificación de 10 g/L para ambos metales, con variaciones en el tiempo de contacto entre la cáscara de maracuyá fortificada y los iones metálicos en solución, 90 minutos para el cromo y 120 minutos para el cobre, logrando remover un 69%; 80,8%; 90,4% y 94,4% de los iones de cromo, mientras que para el cobre se logró remover 74,4%; 79,5%; 86,5%; 91,2 % a concentraciones de 30, 20, 10 y 5 ppm respectivamente.

Se pudo observar que la mayor parte de la remoción de cromo ocurre en los primeros 30 minutos, lo que sugiere que el proceso es inicialmente muy rápido, probablemente debido a una alta disponibilidad de sitios activos para la adsorción o reacción del cromo. Segundo, el pH tiene una influencia significativa en la eficiencia del proceso de remoción. Mientras que el pH 4 demuestra ser el más efectivo, proporcionando las mejores condiciones para la remoción de cromo en esta configuración experimental, los pH 3 y 5 resultan menos efectivos, alcanzando porcentajes de remoción finales menores. Este análisis subraya la importancia de optimizar el pH para maximizar la eficiencia en procesos de remoción de contaminantes como el cromo. Ajustar el pH a niveles óptimos puede mejorar significativamente la efectividad del proceso, contribuyendo a soluciones más eficientes y sostenibles en el tratamiento de aguas contaminadas.

También se observó que en el análisis del cromo el pH tiene un impacto significativo en la eficiencia de remoción de cromo. El pH 4 se destaca como el más efectivo, logrando la mayor remoción de cromo después de 120 minutos. El pH 5 también muestra una alta eficiencia, pero ligeramente inferior a la del pH 4. El pH 3, aunque eficiente en los primeros 30 minutos, se estabiliza en un nivel de remoción menor comparado con los otros dos pH. Comparando estos resultados con los obtenidos utilizando la cáscara de maracuyá, se demuestra que la cáscara de maracuyá fortificada tiene mejor capacidad de remoción superando a la cáscara original hasta en un 18,4% para cromo y en un 14,2% para cobre, esto debido a que la reacción de fenton genera radicales hidroxilos muy reactivos que logran modificar la superficie del bioadsorbente otorgando una mayor capacidad de remoción de los iones metálicos presentes y aumentando así su eficiencia.

REFERENCIAS

- [1] Y. Reyes, I. Vergara, O. Torres, M. D. Lagos, y E. E. G. Jimenez, «Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria», Ing. Investig. Desarro. I2 D, vol. 16, n.o 2, pp. 66-77, 2016.
- [2] INEC, «Estadística Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales. Gestión de Residuos Sólidos.», 2019, p. 14. [En línea]. Disponible en: https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Municipios_2019/Residuos_solidos_2019/Boletin_Tecnico_Residuos_2019%20v05_2.pdf
- [3] L. F. Londoño-Franco, P. T. Londoño-Muñoz, y F. G. Muñoz-García, «Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal», Biotecnol. En El Sect. Agropecu. Agroindustrial, vol. 14, n.o 2, pp. 145-153, 2016.
- [4] G. Campos-Flores, J. Gurreonero-Fernández, y R. Vejarano, «Passion-fruit shell biomass as adsorbent material to remove chromium III from contaminated aqueous mediums», en IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 2019, p. 012110. Accedido: 28 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/620/1/012110/meta>.

- [5] C. A. S. Sierra y H. G. García, «Verificación analítica para las determinaciones de cromo hexavalente en aguas por espectrofotometría», Ing. USBMed, vol. 4, n.o 1, pp. 22-26, 2013.
- [6] R. Lora Silva y H. Bonilla Gutiérrez, «Remediación de un suelo de la cuenca alta del Río Bogotá contaminado con los metales pesados cadmio y cromo», Rev. UDCA Actual. Divulg. Científica, vol. 13, n.o 2, pp. 61-70, 2010.
- [7] M. G. Valladares-Cisneros, C. Valerio-Cárdenas, P. de la Cruz-Burelo, y R. M. Melgoza-Alemán, «Adsorventes não convencionais, alternativas sustentáveis para o tratamento de águas residuais», Rev. Ing. Univ. Medellín, vol. 16, n.o 31, pp. 55-73, 2017.
- [8] A. L. Pantoja-Chamorro, A. M. Hurtado-Benavides, y H. A. Martínez-Correa, «Characterization of passion fruit (*Passiflora edulis* Sims.) seed oil from agroindustrial waste obtained with supercritical CO₂», Acta Agronómica, vol. 66, n.o 2, pp. 178-185, 2017.
- [9] M. Á. López Ramírez et al., «Advanced Oxidation as an Alternative Treatment for Wastewater. A Review», Enfoque UTE, vol. 12, n.o 4, pp. 76-87, 2021.
- [10] Ministerio del Ambiente, «Texto Unificado de la Legislación ambiental (TULAS). Libro VI de la Calidad Ambiental. Anexo 1. Norma de calidad Ambiental y Descargas de Efluentes: Recurso Agua.», 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.cip.org.ec/attachments/article/1579/PROPUESTA%20ANEXO%201.pdf>
- [11] A. Rubio-Clemente, E. L. Chica, y G. A. Peñuela, «Application of Fenton process for treating petrochemical wastewater», Ing. Compet., vol. 16, n.o 2, pp. 211-223, 2014.
- [12] M. Usman et al., «Magnetite and Green Rust: Synthesis, Properties, and Environmental Applications of Mixed-Valent Iron Minerals», Chem. Rev., vol. 118, n.o 7, pp. 3251-3304, abr. 2018, doi: 10.1021/acs.chemrev.7b00224.
- [13] L. Yang y G. Yao, «A modified spectrophotometric method for the determination of ferrous ion during the Fenton process», Int. J. Environ. Anal. Chem., vol. 102, n.o 14, pp. 3194-3206, nov. 2022, doi: 10.1080/03067319.2020.1766034.
- [14] Y. Pan et al., «Properties of polyphenols and polyphenol-containing wastewaters and their treatment by Fenton/Fenton-like reactions», Sep. Purif. Technol., p. 123905, 2023.
- [15] W. Jia et al., «Fenton oxidation treatment of oxytetracycline fermentation residues: Harmless performance and bioresource properties», Chemosphere, p. 139201, 2023.
- [16] M. Valderrama, E. Montero del Águila, y L. E. Cruz Pio, «Optimización del proceso Fenton en el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios», Rev. Soc. Quím. Perú, vol. 82, n.o 4, pp. 454-466, 2016.
- [17] X. Zeng et al., «Removal of trace metals and improvement of dredged sediment dewaterability by bioleaching combined with Fenton-like reaction», J. Hazard. Mater., vol. 288, pp. 51-59, 2015.
- [18] A. J. K. Kupeta, E. B. Naidoo, y A. E. Ofomaja, «Kinetics and equilibrium study of 2-nitrophenol adsorption onto polyurethane cross-linked pine cone biomass», J. Clean. Prod., vol. 179, pp. 191-209, 2018.
- [19] A. Mishra, B. D. Tripathi, y A. K. Rai, «Enhanced biosorption of metal ions from wastewater by Fenton modified *Hydrilla verticillata* dried biomass», Int. J. Environ. Sci. Technol., vol. 12, n.o 11, pp. 3443-3456, nov. 2015, doi: 10.1007/s13762-014-0708-7.
- [20] S. R. Shukla y R. S. Pai, «Adsorption of Cu (II), Ni (II) and Zn (II) on modified jute fibres», Bioresour. Technol., vol. 96, n.o 13, pp. 1430-1438, 2005.