

Adsorción de sulfuros presentes en solución acuosa sobre carbón activado obtenido a partir de zuro de maíz

Adsorption of sulfides present in aqueous solution on activated carbon obtained from corn cob

Cristian Camilo Pulido Gordillo¹, Carlos Alberto Díaz Rodríguez²,
Rafael Nikolay Agudelo Valencia³, Siby I. Garcés-Polo⁴

¹<https://orcid.org/0000-0002-6276-3252>. Universidad Libre, Bogotá, Colombia, cristianc-pulidog@unilibre.edu.co

²<https://orcid.org/0000-0003-3535-3036>. Universidad Libre, Bogotá, Colombia, carlosa-diazr@unilibre.edu.co

³<https://orcid.org/0000-0002-6646-7725>. Universidad Libre, Bogotá, Colombia, rafaeln.agudelov@unilibre.edu.co

⁴<https://orcid.org/0000-0001-5892-8205>. Universidad Libre, Barranquilla, Colombia, siby.garces@unilibre.edu.co

Fecha de recepción: 12/12/2021

Fecha de aceptación del artículo: 28/03/2022



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No comercial-SinObraDerivada 4.0 internacional.

DOI: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.8394>

Cómo citar: Garcés Polo, S. I., Pulido Gordillo, C. C., Díaz Rodríguez, C. A., & Agudelo Valencia, R. N. (2022). Adsorción de sulfuros presentes en solución acuosa sobre carbón activado obtenido a partir de zuro de maíz. *Avances Investigación En Ingeniería*, 19(1). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.8394>.

Resumen

En Bogotá, Colombia, existen más de 200 curtiembres que incluyen dentro del proceso de pelambre el uso de sulfuro de sodio, considerado como contaminante para el agua causada por las aguas residuales. En este trabajo se analizó la capacidad de adsorción de sulfuros sobre carbón activado obtenido del zuro de maíz, con el fin de determinar la posible aplicación de este material de desecho agrícola para el control de la contaminación del agua. El carbón activado se obtuvo térmicamente en un porcentaje del 5.5% en masa y para el estudio de adsorción se analizó el efecto del pH inicial de la solución acuosa, la concentración inicial del sulfuro y el tiempo de contacto sobre el porcentaje de reducción de sulfuro en el agua. Se presentó una máxima capacidad de retención de sulfuro de 22.2 mg/g y una máxima reducción de concentración de sulfuros de 98.96 % para una concentración inicial de 100 mg/L de sulfuro en solución. El equilibrio experimental del proceso fue representado por el modelo de isoterma de Langmuir y la tendencia cinética de la operación por el modelo de pseudo segundo orden. Se encontró que la retención de sulfuros en el carbón activado en efectiva a pH inferiores a 11.

Palabras clave: adsorción de sulfuro de sodio, carbón activado, zuro de maíz, curtiembres, aguas residuales.

Abstract

In Bogotá, Colombia, there are more than 200 tanneries that include the use of sodium sulfide, considered to be a water pollutant, caused by the wastewater. In this work, the adsorption capacity of sulfides on activated carbon obtained from corn cob was analyzed, in order to determine the possible application of this agricultural waste material for the control of water pollution. The activated carbon was obtained thermally in a percentage of 5.5% by mass and for the adsorption study the effect of the initial pH of the aqueous solution, the initial concentration of the sulfur and the contact time on the percentage of reduction of sulfur in water were analyzed. A maximum sulfide retention capacity of 22.2 mg / g, and a maximum sulfide concentration reduction of 98.96% were presented for an initial concentration of 100 mg / L of sulfide in solution. The experimental

equilibrium of the process was represented by the Langmuir isotherm model and the kinetic trend of the operation by the pseudo second order model. It was found that the retention of sulfides in activated carbon is effective at a pH lower than 11.

Keywords: adsorption of sodium sulfide, activated carbon, corn cob, tanneries, wastewater.

1. Introducción

Los retos que afronta la población mundial, en términos de reducción, mitigación y control de la contaminación ambiental representan un desafío apremiante para la humanidad y preservación de los recursos naturales. El agua es un compuesto vital para la supervivencia de los seres vivos y para el desarrollo de los procesos productivos, pero también es el principal receptor de las descargas de desechos líquidos y sólidos y en algunos casos, los desechos líquidos son vertidos sin ningún tipo de tratamiento y aumentando los impactos sobre los recursos hídricos. En la ciudad de Bogotá, el sector de San Benito es conocido por la presencia de más de 100 empresas dedicadas al curtido de pieles [1], que incluyen dentro de su proceso el depilado de la piel (pelambre), para lo cual se hace uso de sulfuro de sodio, cal y agua [2], de esta manera el sulfuro de sodio se diluye en el agua y este y los distintos productos derivados de los equilibrios en el agua, hacen parte de los contaminantes presentes en el agua del depilado. Los compuestos de sulfuros son considerados contaminantes de agua, debido al olor desagradable del lecho del río y la toxicidad de las aguas residuales que provocan la muerte de animales y plantas, y reduce la concentración de oxígeno disuelto en el agua de las fuentes receptoras [3].

En este sentido, el ácido sulfhídrico en solución acuosa puede existir en tres formas distintas, iones sulfuro (S^{2-}), iones hidrosulfuro (HS^-) y sulfuro de hidrógeno (H_2S) que es un contaminante tóxico que puede ocasionar daños ambientales y económicos [4] [5]. Este contaminante en solución puede ser detectado a concentraciones tan bajas como 0.05 mg/L [6] y existen diversas tecnologías para reducir su concentración en agua, entre ellas se pueden mencionar el stripping [7], biofiltración [8], oxidación catalítica [9], absorción [10] y adsorción [11] entre otras. En el caso de la adsorción donde materiales porosos como los carbones activados son usados, la eficiencia del adsorbente es evaluada en términos de la capacidad de remoción de sulfuros en el agua. Los carbones activados son materiales reconocidos por su alta aplicación como adsorbentes en sistemas líquidos o gaseosos que pueden ser obtenidos de manera sintética o derivados de productos agrícolas como el coco [12], huesco de palma [13], cascara de cacao [14] y de naranja [15]. El carbón activado suele seleccionarse debido a sus buenas propiedades texturales, tales como, su alta superficie específica y volumen de los poros, y además a la oportunidad en la modificación química de su superficie. Posee redes interconectadas al azar que proporcionan estructuras de poros internos accesibles altamente desarrollados para la adsorción de contaminantes y productos de interés como la aloína. El carbón activado exhibe afinidad por sustancias polares como H_2O , H_2S , NH_3 , SO_2 , algunos alcoholes, aminas y surfactantes entre otros, debido a la presencia de grupos Carbono-Oxígeno en su superficie, en el caso del H_2S el carbón activado lo adsorbe y puede regenerarse llevándolo a temperaturas cercanas a los $400^\circ C$ [16].

El uso de materiales de desecho agrícola en la elaboración de carbón activado para uso como adsorbente representa una alternativa interesante para la descontaminación de corrientes

líquidas o gaseosos, así como la valorización de residuos sólidos. La Tabla 1 presenta algunos ejemplos de aplicación de carbón activado como adsorbente de contaminantes presentes en el agua.

Material de desecho agrícola	Técnica y contaminante analizado	Referencia
Zuro de maíz	Adsorción de Cromo trivalente (69 % de remoción a pH 6)	[17]
Zuro de maíz	Adsorción de Molibdeno (92 % de remoción pH 9)	[18]
Aserrín de pino y cascarilla de arroz	Adsorción de Arsénico (15.9% de remoción a pH 4)	[19]
Cascara de nuez	Adsorción de Colorantes azóicos (A5 y R40) (95% remoción a pH 8.2-9.8)	[20]
Paja de maíz	Adsorción de BDE-47 (37,65% -46,38% remoción)	[21]
Zuro de maíz	Adsorción de H ₂ S, NH ₃ y TMA en gases contaminados (60% remoción)	[22]
Semillas de macadamia	Adsorción de colorante aniónico (negro reactivo 5) (83.9% de remoción a pH 1 a 6)	[23]

Tabla 1. Ejemplos de aplicación de carbón activado obtenido a partir de materiales de desecho agrícola para adsorción de contaminantes.

En algunos casos el material de desecho agrícola se emplea de manera directa, se somete a modificación química o se emplea para elaborar carbón activado. El objetivo de este trabajo fue llevar a cabo un estudio de adsorción de sulfuros presente en un sistema acuoso, empleado como adsorbente carbón activado obtenido a partir de zuro de maíz. La activación del carbón fue de tipo físico en atmosfera de CO₂. El estudio fue realizado con el fin de proporcionar información valiosa que puede ser útil al seleccionar el adsorbente adecuado para la remoción de este tipo de contaminantes, así como presentar datos experimentales de equilibrio de adsorción no disponibles actualmente en la bibliografía abierta para este tipo de materiales y la aplicación presentada en este estudio.

2. Materiales y Métodos

El zuro de maíz para la preparación del carbón activado fue suministrado por comerciantes de una plaza de mercado local. El zuro de maíz se lavó 2 veces con agua destilada bajo agitación continua a 200 rpm, para retirar impurezas, una vez lavado, se secó al sol y molió a tamaños de partícula entre 0.5 mm y 1 mm. Posteriormente se secó a 103 °C por 24 horas. Una vez seco el material se dejó en un desecador durante 24 horas y luego se introdujo en un reactor en el cual se aseguró que existiese una atmosfera formada solamente por CO₂, el flujo de CO₂ empleado para el proceso de inertización fue de 2.5 x10⁻⁴ m³/s, posteriormente la temperatura del reactor se aumentó desde la temperatura ambiente hasta 750 °C a lo largo de 4 horas. Una vez enfriado el contenido del reactor a la temperatura ambiente, el carbón obtenido se pesó, se lavó una vez más con agua destilada y después se secó a 103 °C por un periodo de 24 horas. El carbón seco se tamizó

a malla 200 (0.074 mm de abertura), finalmente el material recolectado se almacenó para su uso en los ensayos de adsorción.

Para analizar el proceso de adsorción con el carbón obtenido se realizó un diseño experimental de tipo box-behnken, el cual tiene tres factores en dos niveles y 5 réplicas del punto central. Los factores o variables de proceso fueron el pH inicial de la solución (9, 11, 13), la concentración inicial de sulfuro en la solución (50 mg/L, 75 mg/L, 100 mg/L) y el tiempo de contacto con el carbón activado (60 min, 75 min, 90 min). De acuerdo con el tipo de diseño experimental, se realizaron un total de 17 experimentos. La variable de respuesta fue el porcentaje de reducción de concentración de sulfuros en la solución y también se determinó la capacidad de adsorción del material adsorbente.

Las soluciones acuosas se prepararon con sulfuro sodio (Merck) grado analítico el cual fue diluido en agua ultrapura hasta alcanzar una concentración de 100 mg/L de ión S²⁻. El material tamizado se pesó de acuerdo con el tamaño de tamiz y almacenó en bolsas plásticas para ser empleado en los ensayos. La masa de carbón activado para cada ensayo fue constante e igual a 0.5 g. Antes de iniciar cada ensayo se ajustó la concentración y pH inicial de cada solución para lo cual se empleó NaOH 1N o HCL 1N según fuese el caso. Cada uno de los experimentos fue realizado con 50 mL de solución acuosa los cuales fueron depositados en vasos de precipitado de 100 mL, en cada vaso de precipitado se introdujo un agitador magnético y los 0.5 g de adsorbente, luego se ubicó cada uno de los vasos en los puntos de agitación de una plancha con agitación magnética de 10 puestos. La velocidad de agitación se ajustó a 200 rpm.

Terminado el tiempo de contacto entre el carbón y la solución acuosa se retiró cada uno de los vasos de precipitado y se filtró el contenido para realizar el análisis de sulfuro a la solución filtrada (la concentración de sulfuros fue realizada por volumetría, titulación con yodo), además, a cada muestra filtrada se le realizó el análisis de pH y conductividad. Las determinaciones se realizaron a partir de los procedimientos descritos en los métodos estándar para análisis de agua potable y residual [24]. Cada uno de los ensayos de adsorción fue realizado en modo batch o por lotes. Los resultados experimentales fueron procesados por medio del análisis de varianza para determinar el efecto de cada uno de los factores sobre la variable de respuesta y por medio del método de superficie de respuesta se determinaron los valores de los factores que permitieron alcanzar la mayor reducción de la concentración de sulfuros. El porcentaje de concentración de reducción de sulfuros %R, se calculó a partir de la ecuación 1.

$$\%R = \frac{([\text{CONCENTRACION INICIAL} - \text{CONCENTRACION FINAL}])}{(\text{CONCENTRACION INICIAL})} * 100 \quad (1)$$

En las operaciones de adsorción es importante determinar la capacidad de adsorción del material, o, en otros términos, la concentración de contaminante en la superficie del adsorbente y a partir de este valor se puede determinar el equilibrio de la operación. La capacidad de adsorción q, se determinó con la ecuación 2.

$$q = \frac{(\text{Volumen solución acuosa} * (\text{concentración inicial} - \text{concentración final}))}{(\text{Masa de carbon})} \quad (2)$$

El equilibrio en la operación adsorción se representó a través de las isotermas de adsorción, los modelos de isoterma empleados con mayor regularidad son el modelo de Freundlinch y el de Langmuir, las expresiones matemáticas de cada isoterma se presentan en la Tabla 2.

Modelo de isoterma	Ecuación	Ecuación linealizada	Fuente
Freundlinch	$q=K_f \cdot C^{1/n}$	$\log q = \log K_f + 1/n \cdot \log C$	[25]
Langmuir	$q = (b \cdot q_m \cdot C) / (1 + b \cdot C)$	$C/q = 1/(b \cdot q_m) + C/q_m$	[26]

Tabla 2. Ecuaciones de los modelos de isoterma aplicados para el análisis de resultados.

Donde q es la capacidad adsorbida por unidad en peso de adsorbente, K_f es la constante de equilibrio y n es una constante relacionada con la intensidad de adsorción, la cual está restringida a valores mayores que la unidad. Un rango de n entre 2 y 10 representa una buena intensidad de adsorción y C es la concentración de soluto en el equilibrio [25]. En la ecuación de Langmuir, q es capacidad de adsorción en equilibrio y b corresponde a la constante de adsorción de Langmuir el cual representa la fuerza de adsorción de las especies en la superficie o afinidad de enlace. El valor de b es mayor cuanto mayor sea la energía de ligadura de la adsorción y cuanto menor sea la temperatura, C corresponde a la concentración de soluto en solución, q_m es la máxima capacidad de adsorción en monocapa y q corresponde a la capacidad de adsorción. A partir de las condiciones experimentales para las cuales se alcanzó la mayor reducción de concentración de sulfuros se determinó la tendencia cinética de la adsorción. La tendencia cinética del proceso analizado fue evaluada a partir de los modelos cinéticos de pseudo primer orden y pseudo segundo orden. Las ecuaciones correspondientes a cada modelo cinético se presentan en la Tabla 3.

Modelo cinético	Ecuación	Ecuación linealizada	Fuente
Pseudo primer orden	$q_t = q_e (1 - e^{-k_1 t})$	$\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - k_1 / 2.303 t$	[27]
Pseudo segundo orden	$q_t = t / (1 / (k_2 \cdot q_e^2) + t / q_e)$	$t/q_t = 1 / (k_2 \cdot q_e^2) + 1/q_e t$	

Tabla 3. Ecuaciones de los modelos cinéticos para adsorción.

Donde q_t es la capacidad de adsorción en un tiempo de adsorción t , k_1 es la constante cinética de pseudo primer orden, q_e es la capacidad de adsorción de equilibrio. Para el modelo de pseudo segundo orden k_2 es la constante cinética de pseudo segundo orden. Los ensayos para determinar la tendencia cinética de la operación analizada fueron realizados en modo batch y para los valores de los factores para los cuales se alcanzó la mayor reducción de concentración de sulfuros en solución acuosa.

3. Resultados y Discusión

Los ensayos para obtención de carbón activado a partir de zuro de maíz permitieron determinar que por cada 100 g de zuro de maíz se obtienen en promedio 5.5 g de carbón. En total fueron empleados 5000 g de zuro de maíz, para un total de 275 g de carbón. La tabla 4 contiene las condiciones de cada ensayo realizado, así como también los resultados obtenidos en cada experimento, conforme con el diseño experimental empleado.

Ensayo	pH Inicial	Tiempo (min)	Concentración inicial de sulfuros [mg/L]	Porcentaje (%) de reducción de concentración de sulfuros	Capacidad de adsorción, q (mg/g)
1	13	75	50	77.6	3.9
2	11	90	50	99.7	4.9
3	11	75	75	96.5	7.2
4	11	60	100	97.6	9.8
5	9	60	75	98.2	7.4
6	11	75	75	96.6	7.2
7	13	60	75	66.1	4.9
8	9	75	100	99.0	9.9
9	13	90	75	80.2	6.0
10	11	75	75	96.9	7.3
11	11	90	100	98.9	9.9
12	9	75	50	98.4	4.9
13	9	90	75	97.9	7.3
14	13	75	100	87.2	8.7
15	11	75	75	96.8	7.3
16	11	60	50	98.1	4.9
17	11	75	75	96.5	7.2

Tabla 4. Condiciones experimentales y resultados de cada ensayo.

En la Tabla 4 se observa que el porcentaje de reducción de concentración de sulfuros alcanza valores superiores al 95% para pH entre 9 y 11, y que este valor se reduce significativamente a pH 13, de acuerdo con lo anterior el efecto de cada variable sobre el porcentaje de reducción de concentración se muestra en la Figura 1. Por otra parte, los resultados presentados en la tabla 4 indican que la máxima capacidad de adsorción se alcanza para tiempos de contacto superiores a 75 minutos.

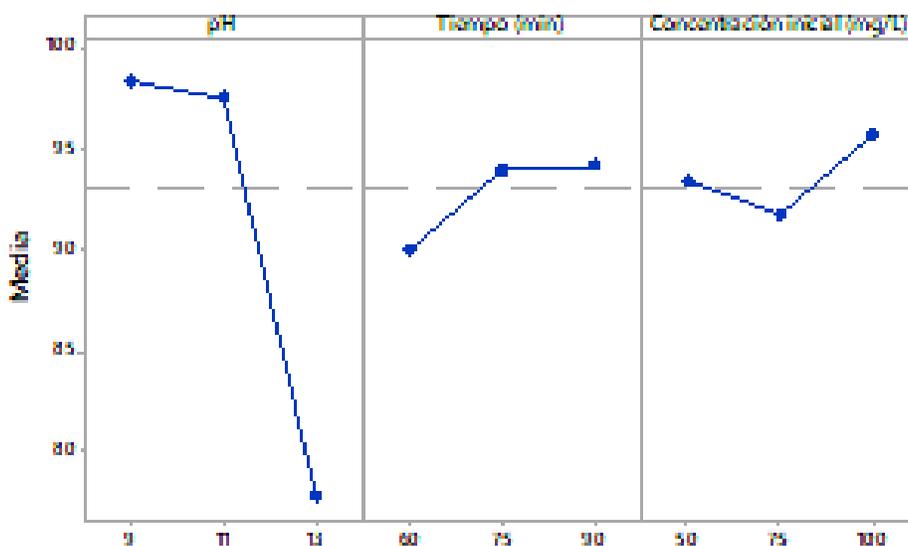


Figura 1. Diagrama de efectos principales para el porcentaje de remoción de sulfuros.

El diagrama de efectos principales permite determinar que la variable que presenta mayor influencia sobre la variable de respuesta, es decir, el porcentaje de reducción de concentración de sulfuros es el pH inicial de la solución, además, al aumentar el tiempo de contacto la variable de respuesta aumenta su valor hasta un tiempo de adsorción de 75 minutos, después de este tiempo el efecto pierde relevancia y la variación aparentemente no es significativa, hecho que puede ser por causa de la saturación del material adsorbente con el adsorbato. Con respecto a la concentración inicial de sulfuros en solución se observa que al aumentar la concentración inicial el porcentaje de remoción es mayor, es decir, que, a mayor gradiente de concentración, se puede esperar mayor remoción de contaminante hasta alcanzar el límite de saturación del adsorbente. Para verificar estadísticamente la influencia de cada variable sobre el porcentaje de remoción de sulfuros se realizó el análisis de varianza (anova) y se presenta en la Tabla 5.

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Valor F	Prov > F
Modelo	1426.808	9	158.534	19.098	0.0004
pH (A)	878.014	1	878.014	105.77	< 0.0001
Tiempo (min) (B)	34.736	1	34.736	4.184	0.0800
Concentración Inicial (mg/L) (C)	7.296	1	7.296	0.878	0.379
A2	368.981	1	368.981	44.45	0.0003
B2	12.330	1	12.330	1.485	0.262
C2	55.5199	1	55.5199	6.688	0.036
A*B	51.480	1	51.480	6.201	0.041
A*C	27.248	1	27.248	3.282	0.112
B*C	0.014	1	0.014	0.001	0.967
Residuo	58.106	7	8.300		
Desviación estándar	2.881	R ²	0.960		
Media	93.158	R ² ajustado	0.910		
Coefficiente de variación	3.092				

Tabla 5. Anova para la superficie de respuesta construida con los resultados experimentales.

El ANOVA para la superficie de respuesta de segundo orden, de los resultados experimentales confirma que la variable que tiene mayor influencia sobre la reducción de concentración de sulfuros en solución acuosa es el pH inicial de la solución. Esta situación se debe a las características de la superficie y señala que en medio muy alcalino el exceso de iones OH⁻ da lugar a competencia por los sitios activos en la superficie del material y por lo tanto la saturación de este con especies distintas a las que se desea remover, Además, la solubilidad del sulfuro en agua varía significativamente con respecto al pH, de manera que a pH alcalino predomina el sulfuro en solución y a pH ácido el equilibrio se desplaza hacia la forma de ácido sulfhídrico, la cual es volátil. La Figura 2 corresponde a la superficie de respuesta trazada a partir del modelo de segundo orden para el cual se logró la mejor correlación con los resultados experimentales. En esta grafica se observa el efecto del pH sobre la variable de respuesta.

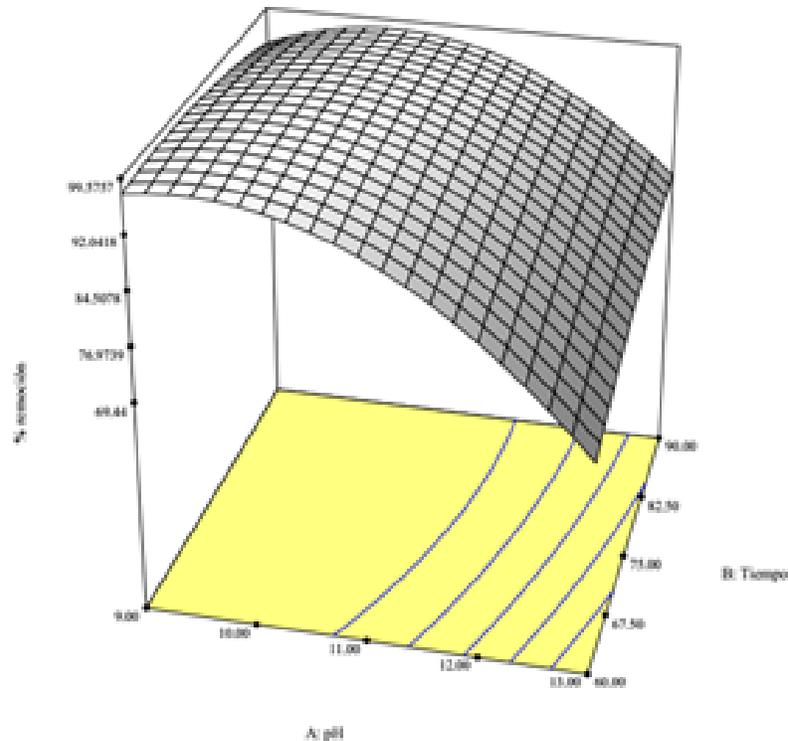


Figura 2. Superficie de respuesta para los resultados experimentales.
Fuente: elaboración propia

La superficie de respuesta obtenida permite observar que el factor que tiene la mayor influencia sobre la reducción de concentración de sulfuros es el pH. A partir de esta superficie y su ecuación, se realizó la optimización y se determinó que la reducción de concentración de sulfuros alcanza un valor máximo cuando el pH inicial de la solución acuosa es igual a 11, el tiempo de adsorción de 90 minutos y la concentración inicial de sulfuros es de 100 mg/L. Cabe señalar que el efecto del tiempo de contacto tiene poca relevancia para los ensayos realizados al mismo pH, en otras palabras, para tiempos de contacto de 60 minutos, se alcanza el equilibrio, el resultado de 90 minutos resulta de la optimización matemática de los resultados, pero como fue señalado para 60 min de tiempo de reacción el sistema alcanza el equilibrio. Por otra parte, la significativa diferencia de porcentaje de remoción a distintos pH está influenciada por el pH, este factor afecta las cargas en la superficie del material y el equilibrio del sulfuro en el agua. Generalmente las aguas residuales de curtiembres que contiene sulfuros se encuentran a pH cercano a 13 y una vez el sulfuro es oxidado por aireación catalítica el pH desciende aproximadamente a 9. Lo anterior representa el motivo para la selección del rango de pH analizado. Generalmente la adsorción se emplea para la remoción de contaminantes a bajas concentraciones

El equilibrio del proceso fue analizado a pH 9 y para un periodo de tiempo de 90 minutos, a fin de lograr el equilibrio del sistema, los experimentos para determinar el modelo cinético fueron efectuados a pH 9, concentración inicial de sulfuros de 100 mg/L y para un periodo de tiempo de 90 minutos, la toma y análisis de muestras fue realizada cada 5 minutos. Con respecto al equilibrio se analizaron las isoterms de Freundlich y Langmuir, los resultados se ajustaron mejor al modelo de Langmuir, situación que en la mayoría de los casos indica que la adsorción ocurre en monocapa, probablemente la adsorción toma lugar por la formación

de enlaces entre las especies en solución y los sitios activos en la superficie del carbón [28]. Con respecto a la cinética de la adsorción, se analizaron los modelos de pseudo primer y pseudo segundo orden, los resultados de estos ensayos presentaron mayor correlación para el modelo de pseudo segundo orden, el cual se generalmente se asocia con adsorción de tipo químico [29]. La Figura 3 contiene los gráficos de los datos obtenidos para las formas linealizadas de la isoterma de Langmuir (a) y cinética de pseudo segundo orden (b).

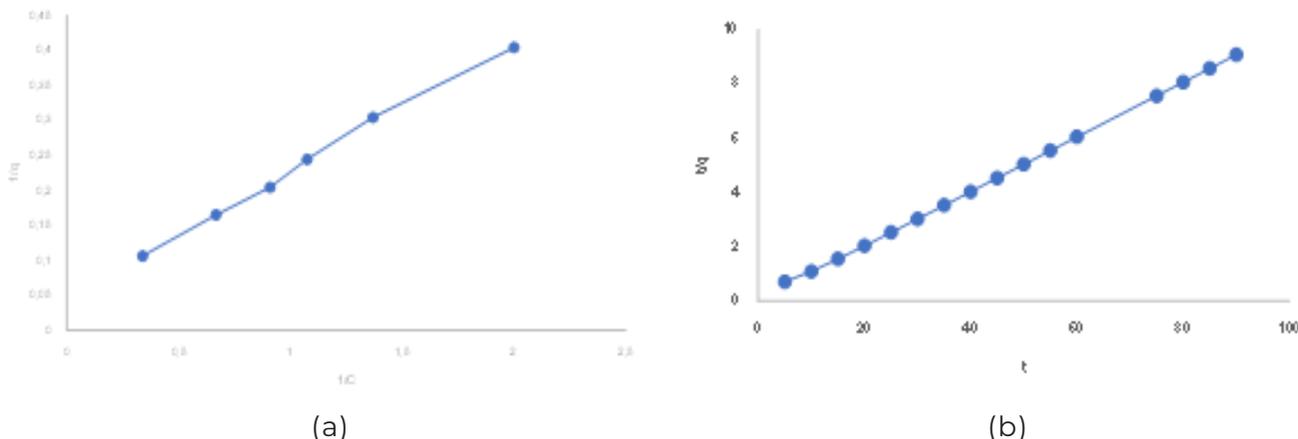


Figura 3. Gráficos de correlación para determinación de constantes de (a) modelo de isoterma de Langmuir, (b) modelo cinético de pseudo segundo orden.

La Tabla 6 contiene los valores de los parámetros que permiten conocer la isoterma de equilibrio para el carbón elaborado, así como también la tendencia cinética del proceso de adsorción.

Isoterma de Langmuir		Cinética de pseudo segundo orden	
q_{max} (mg/g)	22.21	q_e (mg/g)	10.04
K_L (L/mg)	0.25	K_2 (g/(mg*min))	0.13
R^2	0.99	R^2	0.99

Tabla 6. Isoterma de adsorción y modelo cinético para los resultados experimentales.

Los ensayos realizados para determinar la cinética de adsorción señalan que el proceso alcanza el equilibrio en aproximadamente 35 minutos, valor relativamente bajo y que puede ser por causa de una baja área superficial del material obtenido.

4. Conclusiones

El porcentaje masico de carbón activado obtenido a partir zuro de maíz fue del 5.5%. El carbón obtenido no fue modificado químicamente y se empleó de manera directa para la adsorción de sulfuros en solución acuosa. Los resultados experimentales de los ensayos de adsorción permiten determinar que el pH inicial de la solución es la variable que influye en mayor medida sobre la reducción de concentración de sulfuros en solución, este hecho se debe al equilibrio del sulfuro en solución acuosa y a las cargas sobre la superficie del material. El equilibrio y la cinética del proceso analizado fueron analizados a pH 9, puesto que este es el valor de pH del agua residual en las curtiembres después de la oxidación

catalítica preliminar que se realiza a los sulfuros, la concentración de sulfuros después de la oxidación catalítica generalmente toma valores entre 50 mg/L y 150 mg/L.

Se determinó que al aumentar el pH a valores superiores a 11, la efectividad de la operación se reduce, hecho que puede ser por la interferencia que ocasiona el exceso de iones OH⁻ los cuales pueden ocupar los sitios activos en la superficie del material y por lo tanto reducir la disponibilidad de estos para ser ocupados por iones sulfuro. La máxima disminución de concentración de sulfuros alcanzó un valor del 98.96 % para pH inicial de la solución igual a 11, concentración inicial de sulfuros igual a 100 mg/L y 90 minutos de tiempo de adsorción, aunque la optimización de los resultados indicó que la máxima adsorción se logra para un tiempo de contacto de 90 minutos, los resultados experimentales y la superficie de respuesta indican que el equilibrio se alcanza a un tiempo inferior a 40 minutos.

El equilibrio del proceso de adsorción fue analizado a pH 9 y se ajustó al modelo de isoterma de Langmuir con un valor máximo de capacidad de adsorción de 22.2 mg/g y la cinética del proceso tiende a ser de pseudo segundo orden con un valor del coeficiente cinético igual a 0.1296 g/(mg *min), el tipo de isoterma y cinética del proceso analizado, indican que la adsorción es de tipo mono capa, en otras palabras, el fenómeno de adsorción toma lugar por la interacción del soluto con los grupos funcionales existentes en la superficie de material adsorbente. Este trabajo aporta nuevos datos experimentales de adsorción de sulfuros presentes en sistemas acuosos a través de un carbón activado obtenido del zuro de maíz.

Referencias

- [1] S. Coca, M. Yulier y A. Romero, "Revisión del estado actual de la industria de las curtiembres en sus procesos y productos: un análisis de su competitividad", *Revista Facultad De Ciencias Económicas*, vol. 26, n° 1, pp. 113-124, 2018.
- [2] M. Dimas, "Proceso de Curtición Control de Calidad y Maquinas," de Tecnología del cuero, Hualhuas- Huancayo, Mitinci, 2000, pp. 16-17.
- [3] M. Solano, "Impacto ambiental por aguas residuales y residuos sólidos en la calidad del agua de la parte media- alta de la microcuenca del río Damas y propuesta de manejo", Universidad Nacional, costa rica, 2011.
- [4] J. Vollertsen, N. Haaning, J. Stokbro, W.-A. Tove y Hvitved-Jacobsen, "Corrosion of concrete sewers-the kineticsof hydrogen sulfide oxidation," *Science of The Total Environment*, vol. 394, n° 1, pp. 162-170, 2008.
- [5] X. Shugen, S. Huang, D. Guo, Y. Zhao y M. S., "Failure analysis of a carbon steel pipeline exposed to wet Hydrogen sulfide environment," *Engineering Failure Analysis*, vol. 71, n° 1, pp. 1-10, 2017.
- [6] O. Habeeb, R. Kanthasamy, S. Ezzuldin y O. Abayomi, "Characterization of agriculture wastes based activated carbon for removal of hydrogen sulfide from petroleum refinery wastewater," *MaterialsToday Proceedings*, vol. 20, n° 4, pp. 588-594, 2020.
- [7] M. Hassan, M. Rahimi y Y. Tagheie, "Microfluidic cold stripping of H₂S from crude oil in low temperature and natural gas consumption," *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 34, n° 1, pp. 499-508, 2016.
- [8] R. Lestari, W. Sediawan, S. Syamsiah y A. Teixeira., "Hydrogen sulfide removal from biogas using a salak fruit seeds packed bed reactor with sulfur oxidizing bacteria as biofilm," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 4, n° 2, p. 2370-2377, 2016.
- [9] D. Nguyen y T. Badosz, "Activated carbons with metal containing bentonite binders as adsorbents of hydrogen sulfide," *Carbon*, vol. 43, n° 2, p. 359-367, enero 2005.
- [10] C. Lien, J. Lin y C. Ting, "Water Scrubbing for Removal of Hydrogen Sulfide H₂S Inbiogas from Hog Farms," *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, vol. 3, pp. 1-6, 2014.
- [11] J. Razna, B. Podemska, P. Nowicki y R. Pietrzak, "The use of microwave radiation for obtaining activated carbons from sawdust and their potential application in removal of NO₂ and H₂S," *Chemical Engineering Journal*, vol. 269, n° 1, pp. 352-358, 2015.
- [12] J. Carriazo, M. Saavedra y M. Molina, "Propiedades adsorbtivas de un carbón activado y determinación de la ecuación de Langmuir y empleando materiales de bajo costo," *Educación química*, vol. 21, n° 3, pp. 224-229, 2010.
- [13] A. León, J. Castro, O. Arguello y J. Rincón, "Evaluación del cuesco de palma africana y del carbón del cerrejón para producir carbón activado," *Revista colombiana de química*, vol. 18, n° 1-2, pp. 67-79, 1989.
- [14] G. Gonzalez y E. Peña, "Estudio del proceso de obtención de carbón activado a partir de la cáscara de cacao criollo," Managua: Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, 2020.
- [15] K. Peña, L. Giraldo y J. Moreno, "Preparación de carbón activado a partir de cáscara de naranja por activación química. caracterización física y química," *Revista Colombiana de Química*, vol. 41, n° 2, pp. 310-323, 2012.
- [16] O. Echeverri, M. Carmona y J. Mojica, "Aplicación de Modelos Matemáticos en Curvas de Ruptura de contaminantes del Biogás," *Revista ION*, vol. 29, n° 1, pp. 81-94, 2016.
- [17] R. Fonseca, L. Giraldo y J. Piraján, "Adsorción de Cr (III) desde solución acuosa sobre carbones activados obtenidos de residuos de Zea mays," *AFINIDAD LXXII*, vol. 72, n° 569, pp. 31-36, 2015.
- [18] G. Guzmán y L. Esquivel, "Remoción de molibdeno con carbón activado de tusa de maíz (Zea Mays) enaguas del río Challhuahuacho - Cotabambas," *Ciencia latina*, vol. 5, n° 1, pp. 459-473, 2021.
- [19] D. Navarrete y F. Caroca, "Desarrollo de carbón activado a partir de desechos agroindustriales con aplicación en adsorción de arsénico," FONDEF, Santiago de Chile, 2017.

- [20] A. Padilla y J. Pérez, "Remoción de colorantes azóicos (A5 y R40) con carbón activado de cáscara de nuez," *Ingeniería, investigación y tecnología*, vol. 21, n° 3, pp. 1-11, 2020.
- [21] G. Liu, Y. Song, H. Sheng, R. Stedtfeld, X. Jiang y F. Wang, "Adsorption Kinetics of 2,2',4,4'-Tetrabromodiphenyl Ether (BDE-47) on Maize Straw-Derived Biochars," *Pedosphere*, vol. 29, n° 6, pp. 721-729, 2019.
- [22] T. Gebreegziabherac, S. Wangb y H. Namd, "Adsorption of H₂S, NH₃ and TMA from indoor air using porous corncob activated carbon: Isotherm and kinetics study," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 7, n° 4, pp. 1-11, 2019.
- [23] M. Felista, W. Wanyonyi y G. Ongera, "Adsorption of anionic dye (Reactive black 5) using macadamia seed Husks: Kinetics and equilibrium studies," *Scientific African*, vol. 7, n° 1, pp. 1-8, 2020.
- [24] R. Baird, E. Rice y A. Eaton, *Standard methods for the examinations of water and wastewater*, Madrid: American water works associations, water environment federation, 2012.
- [25] C. Rivas, O. Núñez, F. Longoria y L. Gonzalez, "Isoterma de langmuir y freundlich como modelos para la adsorción de componentes de ácido nucleico sobre WO₃," *Saber*, vol. 26, n° 1, pp. 43-49, 2014.
- [26] J. Hernández, L. Reyna, E. Ortiz y S. Rojas, *Isoterma de Adsorción de Langmuir*, Monterrey: Universitat de València.
- [27] F. Canelo y M. Benavente., «Estudio del equilibrio y cinética de adsorción de Cd (II), Ni (II) y Cr (VI) usando Quitosano y Quitosano modificado con cobre,» *Nexo*, vol. Vol. 26, n° 2, pp. 56-68, 2013.
- [28] J. Torres y A. Gasca, *Carbón activado de carácter básico para recuperar oro de lixiviados cianurados*, San Luis Potosí: Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C., 2016.
- [29] D. Figueroa, A. Moreno y A. Hormaza., "Equilibrio, termodinámica y modelos cinéticos en la adsorción de Rojo 40 sobre tuza de maíz," *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 14, n° 26, pp. 105-120, 2013.