

Síntesis de Adsorbentes Híbridos y su Aplicación para Remover Compuestos Tóxicos en Agua

K. Y. Álvarez-Rivera¹, A.P. Montiel-Carrillo¹, J.A. Sandoval-Mendoza¹, C. D. Monreal-Rojas¹, J.I. Hernández-Arredondo¹, L. A. Najera-Rodriguez¹ y A. Jacobo-Azuara¹

¹Departamento de Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato
aazuara@ugto.mx¹

Resumen

El desarrollo de nuevos materiales para su aplicación en procesos de remediación ambiental se ha ido desarrollando en los últimos años, entre los materiales que han despertado interés en la academia y en el área tecnológica, se encuentran los materiales híbridos. En este trabajo se sintetizó una organoarcilla utilizando un surfactante catiónico como el HexaDecilTrimetilAmonio sobre la superficie específica de la nanoarcilla; y un Polixilosano Per Arilado para utilizarlo como soporte. Las pruebas de caracterización por TGA permitieron comprobar la presencia del surfactante en la nanoarcilla, observándose una pérdida de peso entre los 200 y 400 °C. La máxima capacidad de adsorción de la organoarcilla fue de 2 mg/g para la adsorción de Colorantes y Cromo VI y los datos experimentales fueron interpretados satisfactoriamente por el modelo de la isoterma de Langmuir. Las curvas de decaimiento de concentración de los contaminantes muestran que el proceso de adsorción esta regido por el transporte externo de masa.

Palabras clave: membranas híbridas, colorantes textiles, adsorción

Introducción

El agua es un recurso natural indispensable para la vida, por lo cual constituye una necesidad básica para la salud. El acceso a agua, saneamiento e higiene es un derecho humano. Sin embargo, miles de millones de personas se enfrentan a la dificultad para acceder a los servicios más elementales. Aproximadamente 1.800 millones de personas en todo el mundo utilizan una fuente de agua potable que está contaminada por sustancias químicas orgánicas e inorgánicas [1].

En los últimos años la disponibilidad de esta se ha reducido debido al crecimiento exponencial de la población y el gran desarrollo industrial. Habitualmente el agua potable proviene de fuentes superficiales como lagos, ríos, manantiales y subterráneas. Es precisamente en estos puntos donde desembocan los efluentes de las industrias, concentrándose una gran cantidad de compuestos tóxicos en el agua. Las fuentes de contaminación de los sistemas acuosos pueden ser naturales y antropogénicas. La primera son procesos propios de la naturaleza tales como las erupciones volcánicas, erosión del suelo, mientras que la contaminación antropogénica es producida por actividades del hombre como la agricultura, industrias metalmeccánicas, actividades mineras, entre otras [2].

En México existe un marco normativo regulador para la prevención de contaminación por cromo hexavalente dichas normas son: NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT-1996, NOM-052-SEMARNAT-2005 [3, 4]. Estas especifican los límites permisibles de Cromo hexavalente en los efluentes.

Sumado a esta problemática la industria textil genera una gran cantidad de contaminantes al medio ambiente, siendo la de mayor consumo de diferentes tintes y colorantes tales como azul de metileno, negro reactivo V, Naranja II y amarillo brillante, estos colorantes además de no ser biodegradables poseen la característica de ser carcinogénicos y mutagénicos. Tal como en caso del Cromo VI, actualmente se tienen mecanismos que moderan la concentración de colorantes en distintos ecosistemas como lo es la norma NOM-065-ECOL-1994 [5]. Lamentablemente el crecimiento demográfico, el uso excesivo de colorantes textiles y la inexistencia de compromiso social por la deposición correcta de estos contaminantes ha incrementado exponencialmente el daño al medio ambiente. Es importante mencionar la toxicidad que generan estos compuestos, se ha

demonstrado que ciertos colorantes azo pueden ser carcinogénicos y mutagénicos, además de que sus productos de degradación pueden resultar más tóxicos [6].

Por este motivo, es necesario plantear soluciones viables y amigables con el ambiente para eliminar estos contaminantes, una propuesta potencial lo son las membranas híbridas, las cuales están compuestas por componentes orgánicos e inorgánicos que poseen una sinergia apta para el tratamiento de estos contaminantes. Existen diferentes procesos de remoción de este tipo de contaminantes, como la filtración por membranas, procesos de oxidación avanzada, coagulación-floculación, fotocatalisis, electrocoagulación y adsorción [7 – 13].

En este trabajo se utilizará el proceso de adsorción, la cual es un proceso de separación y concentración de uno o más componentes de un sistema sobre una superficie líquida o sólida. Este fenómeno tiene lugar cuando se coloca dicha superficie en contacto con una disolución. Debido a que la adsorción es un fenómeno superficial, los buenos adsorbentes deben tener una estructura muy porosa para que exista una relación alta de área superficial a volumen [13]. Existen una gran variedad de adsorbentes, entre los más utilizados; están los carbones activados, arcillas, biopolímeros, zeolitas, perlas de sílice y plantas o desechos lignocelulósicos son algunos de los adsorbentes, generalmente con procesos variados de modificación química, comúnmente empleados para remover colorantes iónicos, metales pesados, materiales radioactivos entre otros contaminantes orgánicos e inorgánicos generados por diferentes tipos de industrias [9]. Sin embargo, en la actualidad se han desarrollado nuevos adsorbentes, los cuales se caracterizan por sus propiedades fisicoquímicas estables, su bajo costo y sustentabilidad. Entre ese tipo de adsorbentes novedosos, se encuentran las membranas híbridas, las cuales se caracterizan en que las partículas inorgánicas (adsorbentes) se dispersan en una matriz polimérica. En la Figura 1 se muestran algunos de los tipos de estructuras de nanocompuestos híbridos. El material correspondiente a menudo se denomina membrana de matriz mixta (MMM). Este diseño ofrece la posibilidad de combinar la fácil procesabilidad del polímero y el rendimiento superior de separación de gases de los materiales inorgánicos [15]. Las aplicaciones de las membranas híbridas son muy amplias, entre las que más destacan la separación de mezclas gaseosas, la separación de CO₂ y el tratamiento de aguas residuales [14-17]. Otras aplicaciones que van surgiendo son en la producción de celdas de combustible y la adsorción de contaminantes, esta última de gran importancia en el presente proyecto, ya que permitirá buscar la sinergia de dos materiales para potencializar la adsorción de contaminantes como los colorantes y el cromo, los cuales presentan una gran problemática como se ha mencionado anteriormente.

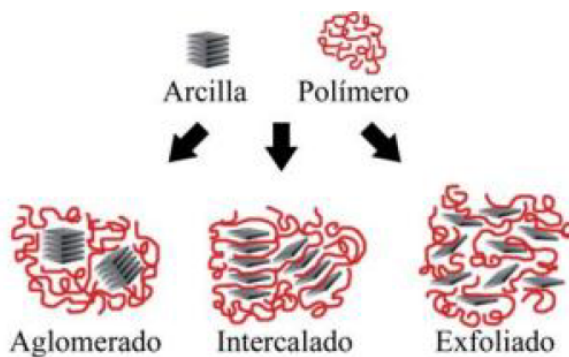


Figura 1. Tipos de nanocompuestos usando arcillas y polímeros.

El objetivo de este proyecto fue desarrollar una película para soportar un material con propiedades de adsorción, mediante la interacción de un material inorgánico (arcilla tipo bentonita) y un compuesto orgánico (polisiloxano per arilado) para su uso en procesos de remediación ambiental tales como la adsorción.

Metodología Experimental

Síntesis del Polixilosano Per Arilado (PPA)

La síntesis del material polisiloxano se realizó mediante el mecanismo general de la hidrólisis de clorosilanos, el material básico de partida para la síntesis de los polisiloxanos son los dialquildiclorosilanos, los cuales son hidrolizados, produciendo silanoles y ácido clorhídrico; cuando dos moléculas de silanol interaccionan, se condensan produciendo la función disiloxano Si-O-Si; cuando se tienen disilanoles, se concatenan para polimerizar las cadenas del polisiloxano. En virtud del fuerte enlace formado entre el silicio y el oxígeno, durante la hidrólisis estas reacciones de condensación de los silanoles son altamente exotérmicas [18]. Posteriormente se llevó a cabo la condensación de los silanoles generados (SiOH); para finalmente, dar lugar al polisiloxano per arilado (PPA). En este sentido, se realizó la siguiente metodología: Se vertieron 180 mL de Tetrahidrofurano (THF) seco a un matraz de dos bocas en atmósfera de N₂, en seguida se adicionaron con agitación magnética difenil diclorosilano (Ph₂SiCl₂), trifenil clorosilano (Ph₃SiCl) y fenil clorosilano (PhSiCl₃); en relación molar 6:2:1, conservando la atmósfera de N₂. Se mantuvo en agitación constante por 20 min y posteriormente se agregó gota a gota durante dos horas 60 mL agua desionizada. Finalmente, se realizó un secado del disolvente y del agua utilizando el rotavapor, por 2 horas. [19, 20].

Síntesis de la Organoarcilla

La síntesis de la organoarcilla se llevó a cabo preparando una solución 40 mmol/L de surfactante Bromuro de HexaDecilTrimetilaAmonio (HDTMA) color blanco brillante. Se diluyó en agua desionizada y se aforó en un matraz de un 1 L. Se pesaron 100 g de Bentonita y se agregaron a un matraz Erlenmeyer junto con la solución previamente preparada de HDTMA, se dejó en agitación constante por durante 7 días hasta que se alcanzó el equilibrio. Finalmente se decantó la fase acuosa y la organobentonita (fase sólida) se lavó 4 veces con agua desionizada para eliminar el exceso de surfactante y se puso a secar por 24 horas a 60 °C. La organobentonita resultante se trituroó en un mortero de ágata para posteriormente tamizarla.

Organoarcilla soportada en una película de PPA

La organoarcilla soportada en PPA, se realizó de acuerdo con la siguiente metodología. Primero se prepararon las películas del PPA sobre un soporte de vidrio, para posteriormente realizar la impregnación de la organoarcilla sobre la película de PPA. Para la primera parte, se preparó una solución del 15% de PPA. En donde, se pesaron 0.7 g de PPA y 5 mL de cloroformo. A continuación, se fue depositando 120 µL de la solución preparada sobre un portaobjetos, enseguida se dejó secar el disolvente hasta obtener una película uniforme y semitransparente. Este procedimiento se repitió en ambas caras del portaobjetos y hasta terminarse la solución preparada. En la segunda etapa, se preparó una solución de 1 g de organoarcilla en 5 mL de acetona, 120 µL de esta solución se fue depositando sobre la película de PPA preparada previamente en ambas caras del portaobjetos y se dejó secar el disolvente. Este proceso de igual forma se repitió hasta terminarse la solución de organoarcilla preparada.

Caracterización Físicoquímica de la Organoarcilla

La caracterización de las propiedades físicoquímicas de la organoarcilla se realizó mediante las pruebas de Absorción Atómica por Emisión de Plasma, Termodesorción Programada, Espectroscopía de Infrarrojo para determinar la composición química, estabilidad térmica y grupos funcionales de la arcilla y organoarcilla, respectivamente. Se realizó también la prueba de Capacidad de Intercambio Catiónico, para medir la cantidad de sitios intercambiables de arcilla, materia orgánica o sustancias húmicas y representa la cantidad de cationes que las superficies pueden retener. Este método consiste en la saturación de la arcilla con un catión electrolíticamente fuerte, como el sodio, para luego reemplazar estos lugares por iones cuya fuerza electrolítica es menor, como el amonio, de esta forma todo el sodio que se adhirió a la parte aniónica de la arcilla quedará en solución y podrá ser medido por técnicas como absorción atómica. La capacidad de intercambio catiónico se estimó por medio de la siguiente ecuación:

$$CIC = \frac{[Na^+]V100}{m PM}$$

Ecuación 1

Donde:

[Na] = Concentración de Na en la solución intercambiante [mg/L]

V = Volumen de la solución intercambiante [L]

m = masa de la organoarcilla [g]

PM = peso molecular de Na * (234 g/mol = 23 mg/meq)

Los sitios ácidos y básicos presentes en la arcilla y la organoarcilla se determinaron por un método de titulación ácido-base propuesto por Boehm. El cuál consistía en neutralizar los sitios ácidos con una solución patrón 0.1 N de NaOH y los sitios básicos con una solución patrón de 0.1 N de HCl.

Pruebas de Equilibrio y Cinética de Adsorción

Las pruebas de equilibrio de adsorción de los colorantes y del Cromo VI se realizaron en un adsorbedor de lote a temperatura constante de 25 °C (Figura 2) mediante el siguiente procedimiento. Se pesaron 0.5 g de organoarcilla y se pusieron en contacto en una solución de 50 mL de concentración inicial de 20 ppm de colorante o Cromo VI, a un pH entre 2 y 10, dependiendo del tipo de compuesto y su diagrama de especiación. Los experimentos de equilibrio se llevaron a cabo durante 7 días y se ajustó el pH cada 24 horas. Una vez transcurridos los 7 días se tomó una alícuota y se midió la concentración en equilibrio por medio de la técnica de Espectrofotometría de UV-Visible, marca Shimadzu, modelo 2401.

La concentración del Cromo VI se determinó utilizando un método colorimétrico formando un complejo. Se prepararon estándares a diferentes concentraciones de $K_2Cr_2O_7$ y pH 1.5-2.0, utilizando agua desionizada y ácido sulfúrico; así como la solución de 1,5-difenilcarbazida en acetona al 5%. Se prepararon las curvas de calibración de cada colorante en un rango de 450 nm a 350 nm. Para cada colorante se tomaron 23 muestras de cada minuto de la prueba de adsorción cinética y se siguió para las distintas muestras a analizar.

Las pruebas de cinética de adsorción se realizaron en un reactor en lote a $T = 25$ °C y con control de pH (Figura 3). Estas pruebas permiten describir la velocidad de adsorción entre el adsorbato y el adsorbente, así como para determinar si existen problemas de transferencia de masa como la difusión intraparticular [21, 22]. La metodología seguida para dichas pruebas se presenta a continuación: primeramente, se rotularon tubos para los tiempos de cinética, en cada colorante y muestra de Cromo VI se rotuló tomando un intervalo de tiempo de 0 a 120 minutos. Se prepararon soluciones de 20 ppm de cada colorante y Cromo VI. Se vertió la solución de 20 ppm al reactor con agitador magnético al igual que la organoarcilla y se colocó a una temperatura constante de 25°C. Se tomaron alícuotas para los tiempos descritos anteriormente. Finalmente, el pH se ajustó en cada colorante y solución de Cromo VI.

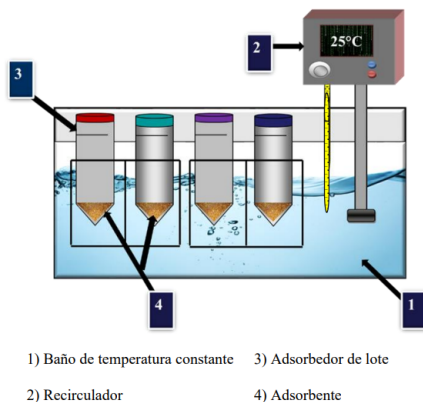
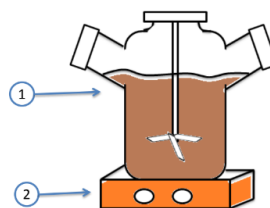


Figura 2. Adsorbedor en lote para pruebas de equilibrio. $T = 25$ °C, $C_0 = 20$ ppm y pH entre 2 y 10.



1. Reactor de tanque agitado.
2. Plancha de agitación.

Figura 3. Reactor en lote para pruebas de cinética. $T = 25$ °C, $C_0 = 20$ ppm y pH entre 2 y 10.

Resultados

Caracterización Físicoquímica

Los resultados de la composición química de la nanoarcilla y organoarcilla, obtenidos por Absorción Atómica se muestran en la Tabla 1, se observa que no hubo variación significativa en el

porcentaje de Silicio y Aluminio de la nanorcilla con la presencia del surfactante HDTMA. En la Tabla 2 se muestran los resultados de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y sitios activos, se observa una disminución de la CIC, esto es debido a la presencia de la molécula del HDTMA sobre los sitios catiónicos de la nanoarcilla. La concentración de sitios básicos disminuyó 2.5 veces con respecto a la nanoarcilla.

Tabla 1. Composición química de la nanoarcilla y organoarcilla

Componente %	Nanoarcilla	Organoarcilla
SiO ₂	50.50	49.59
Fe ₂ O ₃	3.95	3.17
Al ₂ O ₃	15.63	15.86
K ₂ O	2.93	2.67
Na ₂ O	2.02	1.32
CaO	4.37	2.51
MgO	3.56	2.69
ppc 950°C	16.92	16.56
TOTAL	99.88	94.37

Tabla 2. Propiedades Fisicoquímicas de Nanoarcilla y Organoarcilla

Adsorbente	CIC meq/g	Sitios Ácidos meq/100 g	Sitios Básicos meq/100 g
Nanoarcilla	19.78	68	186
Organoarcilla	14.34	70	75

Los resultados de Infrarrojo y TGA se muestran en las Figura 4 y 5, respectivamente. Se observa en la Figura 4 las bandas características del HDTMA a una longitud de onda de 3028 cm⁻¹, en la Tabla 2 se muestran las vibraciones características de la nanoarcilla y del surfactante. En la Figura 5 se observa claramente la presencia del surfactante en la pérdida de peso entre los 200 y 500 °C, mientras que a temperaturas menores a los 200 °C se observan los picos correspondientes al agua superficial de la nanoarcilla y organoarcilla. Estos resultados indican que la síntesis de la organoarcilla se realizó correctamente.

Tabla 3. Longitudes de onda y tipo de vibración para Infrarrojo

Número de onda, cm ⁻¹	Tipo de vibración
3023.32	Alargamiento de N-H por la presencia de la sal de amida de la molecula de surfactante presente en la superficie de la organoarcilla
2924.68	Alargamiento de C-H por la presencia del grupo alcano (-CH ₂ -)
2851.54	
1640	Deformación de N-H
1488.79	Deformación de C-H por la del grupo alcano (-CH ₂ -)
1475.22	
1034.7	Alargamiento de C-N

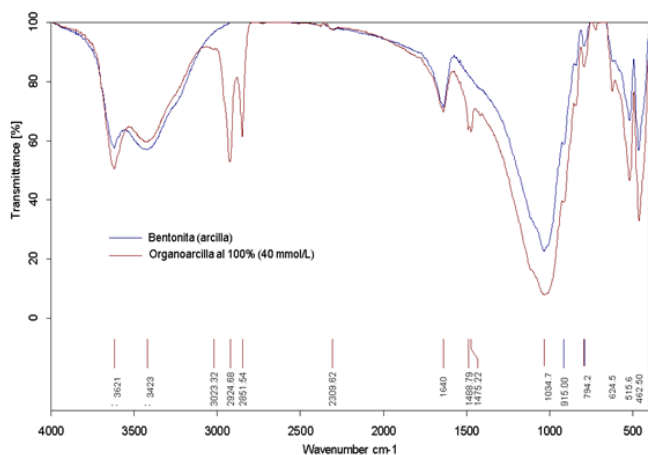


Figura 4. Espectros de IR para la nanoarcilla y organoarcilla.

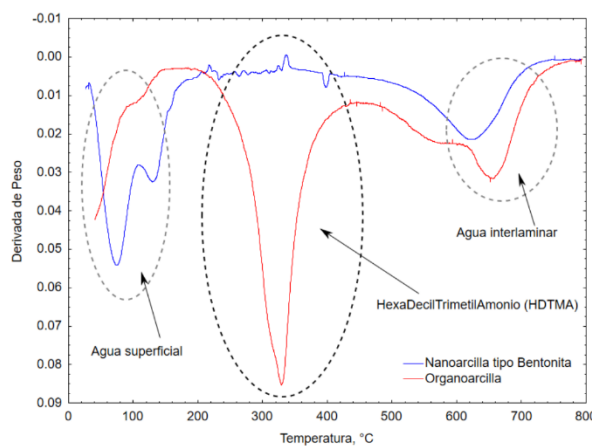


Figura 5. Curvas de TGA para la nanoarcilla y organoarcilla

Isotermas de Equilibrio de Adsorción

Los datos experimentales de equilibrio de adsorción se muestran en la Figura 6, para los colorantes sobre organoarcilla, respectivamente. Se observa una máxima capacidad de adsorción de 2 mg/g en el equilibrio cerca de los 40 min, que corresponde a un 98 % de remoción (ver Figura 8). Se observa también que antes de los 40 min la superficie cubierta dl de remoción en promedio para cada uno de los contaminantes. antes de ese tiempo se observa que a los 10 min la adsorción de los colorantes fue en el siguiente orden Azul de Metileno>Naranja II>Amarillo>Negro, lo que indica que existe una mayor afinidad de la superficie de la organoarcilla por el Azul de Metileno. Los datos experimentales fueron interpretados satisfactoriamente por el modelo de la Isoterma de Langmuir.

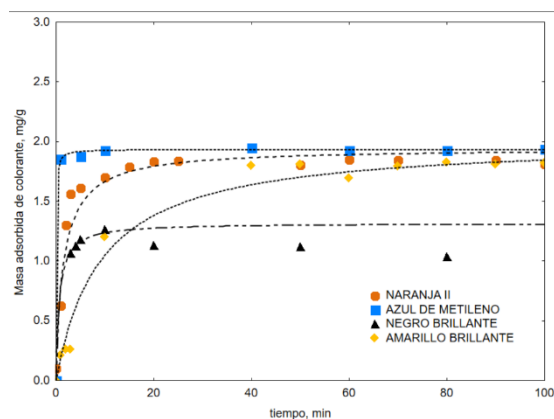


Figura 6. Isotermas de adsorción sobre organoarcilla a $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Las líneas representan el modelo de la isoterma de Langmuir.

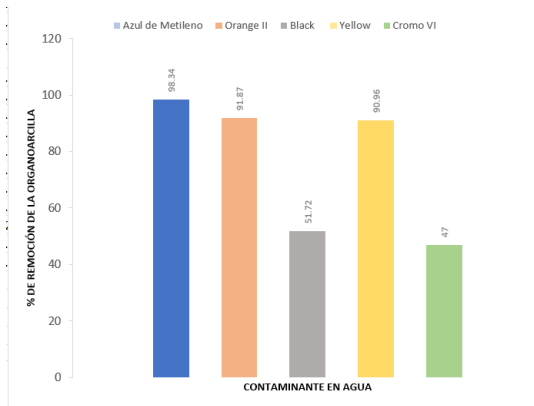


Figura 7. Porcentaje de remoción de la organoarcilla con los diferentes contaminantes.

Cinética de Adsorción

Los datos cinéticos para la adsorción de los contaminantes sobre la organoarcilla se muestran la Figura 8 para el Cromo VI y en la Figura 9 para los colorantes. Para el caso de la adsorción de Cromo VI sobre la organoarcilla sola y la soportada en PPA, se observa que la curva de decaimiento en función de la concentración relativa presenta dos etapas de adsorción, en ambos casos. La primera etapa de adsorción es rápida lo que indicaría que no el proceso se lleva a cabo por transferencia de masa externa y la segunda etapa corresponde únicamente al proceso de equilibrio, en donde se considera que el ion Cr(VI) se acomoda en los sitios activos con carga positiva, posiblemente generados por el ion amonio del surfactante, es decir es probable que exista un mecanismo de atracción electrostática entre el ion de Cr(VI) y la superficie de la organoarcilla. En el caso de los colorantes (Figura 9), se observan también dos etapas de adsorción. Sin embargo, para el colorante Azul de Metileno la caída de concentración es muy pronunciada, lo que indica que la adsorción es muy rápida y solo ocurre en la parte externa de la organoarcilla. En el caso de los otros colorantes se observa una adsorción lenta los primeros 20 min, probablemente por la difusión de la molécula del colorante en la fase orgánica de la organoarcilla. En todos los casos después de los 30 min se observa una adsorción lenta o de equilibrio.

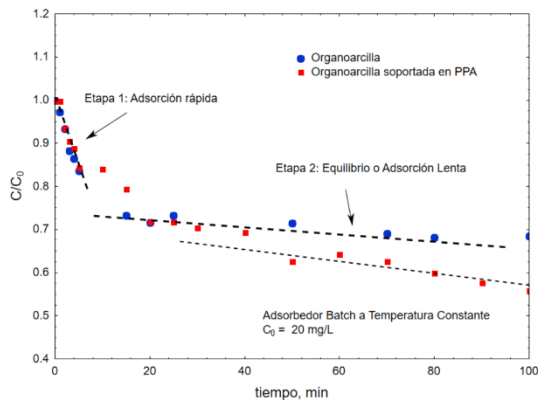


Figura 8. Curva de decaimiento de concentración relativa para el Cr(VI) sobre organoarcilla y organoarcilla soportada en PPA. $C_0 = 20$ ppm y $T = 25$ °C.

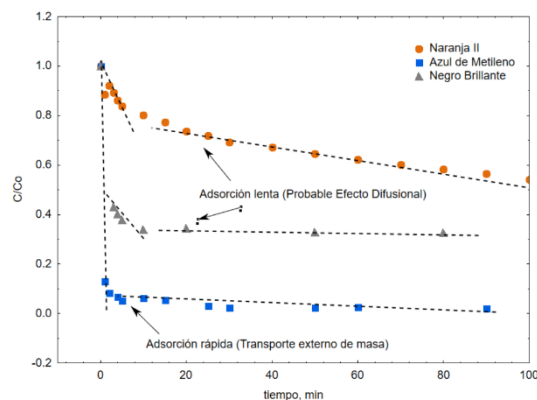


Figura 9. Curva de decaimiento de concentración relativa para los Colorantes sobre organoarcilla. $C_0 = 20$ ppm y $T = 25$ °C.

Conclusiones

Se logró sintetizar un material híbrido con propiedades hidrofóbicas y organofílicas para adsorber compuestos tóxicos orgánicos como algunos colorantes textiles y compuestos inorgánicos como el Cromo Hexavalente. Se obtuvieron porcentajes de remoción por encima del 90 % para todos los compuestos. Los datos de equilibrio de adsorción fueron interpretados satisfactoriamente por el modelo de la isoterma de Langmuir. Los resultados de caracterización fisicoquímica mostraron la presencia del surfactante en la nanoarcilla. Las pruebas de cinética de adsorción mostraron dos posibles mecanismos de interacción en función del tipo de contaminante. El primero del tipo de atracción electrostática entre los sitios positivos de la organoarcilla y la carga negativa del ion Cr(VI) y segundo por afinidad química entre el colorante y la fase orgánica de la organoarcilla.

Las pruebas de la organoarcilla soportada en PPA, mostraron una disminución de aproximadamente el 40 % con respecto a la organoarcilla sola, pero se observó una mejor estabilidad de dispersión en las pruebas cinéticas.

Agradecimientos

Los autores del presente trabajo de investigación hacen un extenso agradecimiento a la Dra. Rebeca Yasmín Pérez Rodríguez, a la M.C. Iris Violeta Hernández Cervantes y a la Q. Isela Paulina Castro Becerra, por su invaluable apoyo en la caracterización fisicoquímica de los materiales. Asimismo, se agradece la colaboración del Dr. Guillermo Manuel González Guerra, por la asesoría en la síntesis de las películas poliméricas.

Referencias

- [1] Objetivos de desarrollo sostenible. (2013, diciembre). AGUA LIMPIA Y SANEAMIENTO (N.º 6). ABC color. <https://doi.org/10.2478/s11814-009-0200-0>.
- [2] Padilla Ortega, E. (2013). Adsorción de metales pesados en solución acuosa sobre arcillas naturales, modificadas y bionanocomposites (Revisado ed., Vol. 1). Universidad Autónoma de San Luis Potosí. <https://doi.org/10.2478/s11814-009-0200-0>.
- [3] Comisión nacional del agua. NOM-001-SE- MARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT-1996. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx> (20 julio 2019).
- [4] Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. NOM-052-SEMARNAT-2005. Disponible en: <http://www.semarnat.gob.mx> (20 julio 2019).
- [5] (NORMA Oficial Mexicana NOM-065-ECOL-1994,1994)
- [6] Gavril, M., & Hodson, P. V. (2007). Investigation of the Toxicity of the Products of Decoloration of Amaranth by *Trametes versicolor*. *Journal of Environmental Quality*, 36(6), 1591–1598. <https://doi.org/10.2134/jeq2006.0433>

- [7] Valladares, D. (2014). Remoción de colorantes de aguas residuales de la industria textil, mediante el empleo de bagazo y microorganismos (Doctoral dissertation, Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico, Facultad de Química y Farmacia, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba).
- [8] Ayala, M. E., Peñuela Mesa, G., & Montoya, J. L. (2006). Procesos de membranas para el tratamiento de agua residual industrial con altas cargas del colorante amarillo ácido 23. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (38), 53-63.
- [9] Rubio, D. I. C., Calderón, R. A. M., Gualtero, A. P., Acosta, D. R., & Sandoval, J. (2015). Tratamientos para la remoción de metales pesados comúnmente presentes en aguas residuales industriales. Una revisión. *Ingeniería y región*, (13), 73-90.
- [10] Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria, R. A., & Gallo, J. A. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9-18.
- [11] Zaruma, P., Proal, J., Hernández, I. C., & Salas, H. I. (2018). Los colorantes textiles industriales y tratamientos óptimos de sus efluentes de agua residual: una breve revisión. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas*, (19), 38-47.
- [12] Gil, M. J., Soto, A. M., Usma, J. I., & Gutiérrez, O. D. (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción+ limpia*, 7(2), 52-73.
- [13] Guzmán, L., Villabona, Á., Tejada, C., & García, R. (2013). Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales: una revisión. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 16(1), 253-262.
- [14] Susana V. (2011). Tratamientos de aguas residuales industriales con materia orgánica no biodegradables. Escuela universitaria de ingeniería técnica industrial de Zaragoza. <https://zaguan.unizar.es/record/5976/files/TAZ-PFC-2011-294.pdf>
- [15] [Zornoza Encabo, B. (2011). Membranas híbridas polímeromaterial nanoestructurado poroso para la separación de mezclas gaseosas. UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA. <https://zaguan.unizar.es/record/7066/files/TESIS-2012-039.pdf>
- [16] Mahajan, R., Zimmerman, C.M., Koros, W.J., 1999. Fundamental and practical aspects of mixed matrix gas separation membranes. *ACS Symposium Series 733*, 277e286.
- [17] Perera-Mercado, Y. & Perez, Odilia & Castruita, G. & López, Nidia & Rodríguez, Sandra & Montes Luna, Angel. (2019). MODIFICACIÓN DE ZEOLITA NaY Y PREPARACIÓN DE MEMBRANASHÍBRIDAS PARA SEPARACIÓN DE MEZCLAS DE GASES.
- [18] Liguori, S., & Wilcox, J. (2018). Design Considerations for Postcombustion CO₂ Capture With Membranes. *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes*, 385–413. doi:10.1016/b978-0-12-813645-4.00014-3.
- [19] Arias, M., Penichet, I., Ysambertt, F., Bauza, R., Zougagh, M., & Ríos, Á. (2009). Fast supercritical fluid extraction of low- and high-density polyethylene additives: Comparison with conventional reflux and automatic Soxhlet extraction. *The Journal Of Supercritical Fluids*, 50(1), 22.
- [20] G. M. González (2015). Evaluación de un polisiloxano per arilado sulfonado como ionómero en celda de combustible tipo PEM. (Tesis Licenciatura). Universidad de Guanajuato, División de Ciencias Naturales y Exactas. 6-50, 93, 103.
- [21] MATEOS M. Estudio de materiales adsorbentes para el tratamiento de aguas contaminadas con colorantes. Tesis Doctoral Facultad de Ciencias Químicas Universidad Complutense de Madrid, 2012, 19 p
- [22] UNAM. Físicoquímica de alimentos: Fenómenos de superficie, adsorción. [en línea] [citado en 28 de agosto de 2017].