

CAPÍTULO 4

ESTUDIO DE LA CINÉTICA DE ADSORCIÓN DE COLORANTE SINTÉTICO EN AGUA MEDIANTE NANOARCILLAS ACTIVADAS CON ÁCIDO DÉBIL

Data de aceite: 02/10/2023

Yubher Aderson Vargas Torre

<https://orcid.org/0009-0005-6166-3881>
Universidad Nacional José María
Arguedas

David Oscco Perez

<https://orcid.org/0009-0009-8073-244X>
Universidad Nacional José María
Arguedas

Ayde Quispe Guizado

<https://orcid.org/0000-0001-5682-5376>
Universidad Nacional José María
Arguedas

Sofia Pastor Mina

<https://orcid.org/0009-0003-5604-7270>
Universidad Nacional José María
Arguedas

David Choque Quispe

<https://orcid.org/0000-0003-4002-7526>
Universidad Nacional José María
Arguedas

Carlos Alberto Ligarda Samanez

<https://orcid.org/0000-0001-7519-8355>
Universidad Nacional José María
Arguedas

Yakov Felipe Carhuarupay-Molleda

<https://orcid.org/0000-0001-6467-677X>
Universidad Nacional José María
Arguedas

Betsy Suri Ramos-Pacheco

<https://orcid.org/0000-0002-0286-0632>
Universidad Nacional José María
Arguedas

Katia Choque-Quispe

<https://orcid.org/0000-0003-0789-293X>
Universidad Nacional José María
Arguedas

Elibet Moscoso Moscoco

<https://orcid.org/0000-0002-0546-4504>
Universidad Nacional José María
Arguedas

Diego E. Peralta-Guevara

<https://orcid.org/0000-0003-2988-0809>
Universidad Nacional José María
Arguedas

RESUMEN: Los colorantes sintéticos en los efluentes afectan en gran medida a los seres vivos y al ecosistema acuático. En esta investigación se evaluó la cinética de adsorción de colorante sintético Azul de Metileno (AM) mediante nanoarcillas activadas con ácido débil en medio acuoso. La activación se realizó con NaCl a 1M y H₃PO₄ al 10%, para posteriormente realizar tratamientos de cinética de adsorción en pH (5 y 8) y, con arcilla Activada (AA) y arcilla

natural (AN); para los tiempos 0, 30, 50, 70, 90, 130, 180, 230, 330 y 430 min; tomando lecturas de absorbancia mediante un Espectrofotómetro a 664 nm. Los resultados del estudio cinético se ajustaron a los datos experimentales a los modelos pseudo de primer orden y segundo orden; donde, este último presenta un mejor ajuste a la cinética de adsorción del azul de metileno con AA y AN con $R^2=0.99$. A su vez se pudo determinar la capacidad de adsorción en equilibrio que oscilan entre 2.473 a 4.868 mg/g; se observa una adsorción rápida en los primeros 30 a 50 min, donde el pH óptimo fue en pH 5; así mismo; la AA posee un grado de cristalinidad de 97.24% con 2.85 nm de tamaño de cristales. La AA con ácido fosfórico y cloruro de sodio posee una mayor capacidad de adsorción a comparación de la arcilla Natural; este recurso es económico y amigable con medio ambiente, que se puede aprovechar en el tratamiento de aguas.

PALABRAS CLAVE: Arcilla, adsorción, azul de metileno, cinética.

ABSTRACT: Synthetic dyes in effluents greatly affect living beings and the aquatic ecosystem. In this research, the adsorption kinetics of synthetic dye Methylene Blue (MB) was evaluated by weak acid activated nanoclays in aqueous medium. The activation was carried out with NaCl at 1M and H₃PO₄ at 10%, to subsequently perform adsorption kinetics treatments at pH (5 and 8) and with activated clay (AA) and natural clay (AN); for times 0, 30, 50, 70, 90, 130, 180, 230, 330 and 430 min; taking absorbance readings by means of a spectrophotometer at 664 nm. The results of the kinetic study were adjusted to the experimental data to the pseudo first order and second order models; where, the latter presents a better adjustment to the adsorption kinetics of methylene blue with AA and AN with $R^2=0.99$. At the same time, it was possible to determine the adsorption capacity in equilibrium that oscillates between 2.473 to 4.868 mg/g; a fast adsorption is observed in the first 30 to 50 min, where the optimum pH was at pH 5; likewise, AA has a degree of crystallinity of 97.24% with 2.85 nm of crystal size. AA with phosphoric acid and sodium chloride has a higher adsorption capacity compared to natural clay; this resource is economical and environmentally friendly, which can be used in water treatment.

KEYWORDS: Clay, adsorption, methylene blue, kinetics.

1 | INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico, industrial y el crecimiento de las poblaciones ha ocasionado que los contaminantes de los residuos líquidos se incrementan a diario, en volumen, carga, concentración y diversidad; donde la presencia sobre los cuerpos receptores, acrecientan en el grado de contaminación y efectos nocivos sobre la vida acuática (Xiao et al., 2021; Qin et al., 2023). La industria textil, cosmética, pintura y papel son las principales emisoras de grandes volúmenes de aguas residuales coloreadas contenido con amplia variedad de tintes sintéticos, compuestos orgánicos recalcitrantes y otros compuestos químicos, incluidos los ácidos, bases, sales, agentes humectantes, colorantes, acabados auxiliares, compuestos tóxicos e inhibitorios, surfactantes, entre otros (Kong et al., 2019). Además, la creciente necesidad de producción textil genera efluentes que se conviertan en una de las principales fuentes puntuales de contaminación de las aguas superficiales, como

consecuencia se produce cambio de color, oxígeno disuelto, conductividad, pH y salinidad (Quintero, 2012). Muchos de los procesos textiles tienen un manejo de manera discontinuo, por la que, las concentraciones de los materiales residuales pueden variar a largo de un periodo de tiempo.

Los colorantes sintéticos de las aguas residuales textiles afectan la estética, transparencia del agua e interfieren en la transmisión de la luz a los medios acuáticos, que impiden la demanda química de oxígeno y procesos de fotosíntesis (Vilaseca, 2015), lo que puede conllevar a la destrucción de la comunidad acuática en el ecosistema (Abdel-Fadeel et al., 2022). Además, de generar colores no deseados, algunos de estos tintes pueden degradarse y originar toxicidad acuática, debido a que los tintes son cancerígenos y mutágenos (Sonawane et al., 2009; Ahmed et al., 2021)

Por los efectos peligrosos de los colorantes, se emplean varios tratamientos físico-químicos para su eliminación, como ozonización, coagulación/floculación, oxidación avanzada, la filtración por membrana (Zinadini et al., 2014) y la extracción líquido-líquido, sin embargo, demanda muchos recursos y generan lodos residuales (Modirshahla et al., 2011; Kandisa et al., 2016). En la actualidad, la adsorción es un método prometedor y eficiente para remover las aguas residuales coloreadas, ya que se caracteriza por su alta eficiencia, simplicidad de construcción, ausencia de formación de lodos, bajo costo, facilidad de uso y flexibilidad (Kiranşan et al., 2014). Por la que, utilizan como materia las arcillas como adsorbentes, debido a su estructura tiene una alta capacidad de adsorción, puesto a que tienen una alta área superficial y una superficie con sitios activos para la adsorción (Zhou et al., 2019).

Las arcillas poseen una gran superficie específica y una buena capacidad de intercambio catiónico, que es conocida por su capacidad de acumulación de tintes tóxicos y peligrosos solubles en agua en la superficie. La superficie de la arcilla se puede activar para aumentar las interacciones mediante modificación químicamente con ácido y/o base, o mediante la funcionalización con aditivos seleccionados (Kiranşan et al., 2014). Por la que (Abdel-Fadeel et al., 2022), demostró que nanoarcilla de holista puede eliminar la mayoría de los tintes dentro 30 min, con una capacidad de adsorción de 12,5 mg/g para colorante Acid Red y 13,9 mg/g para colorante Brilliant Green, se ajustaron mejor modelo cinético de pseudo-segundo orden. De igual manera (Vanaamudan & Sudhakar, 2015) determinó que la quitosano-nanoarcilla modificada orgánicamente (cloisita 30B) se comporta como un excelente adsorbente para reactivos colorantes azul-21 y rojo-141; los datos de cinética de adsorción ajustados bien con el modelo cinético de pseudo-segundo orden. Del mismo modo, (Kiranşan et al., 2014) evaluó la eficacia del nanomaterial de montmorillonita (MMT) modificado con bromuro de cetiltrimetilamonio (CTAB) para la adsorción de Acid orange 7 (AO7), predijo que la eficiencia máxima de decoloración sería del 87,19 % a una concentración de AO7 de 49 mg/L, una dosis de adsorbente de 0,8 g/L, un tiempo de reacción de 27 min y un pH inicial de 6; y los resultados del estudio de isoterma se ajustan

al modelo de Freundlich ($R^2 > 0,9$).

Por ello, el presente estudio pretende realizar el estudio cinético del colorante sintético a través de arcillas activadas, en medio acuoso, con el fin de remediar aguas contaminadas y proponer la aproximación de un material amigable al ambiente para futuras investigación que puedan aplicarlo a espacio contaminados con colorantes sintéticos.

2 I MATERIALES Y MÉTODOS/METODOLOGÍA

2.1 Colección de muestra y preparación del adsorbente

La arcilla, fue recolectada de la provincia de Huanta en el departamento de Ayacucho con coordenadas geográficas 12°56'23" S y 74°14'51" W con una altitud de 2627 ms.n.m. Posteriormente, se realizó el molido en un molino planetario PM100, y luego se tamizaron a 4 micras y seguidamente se eliminó la materia orgánica con H_3PO_4 , a una concentración del 10% en una proporción de 1g de arcilla/4 ml de ácido fosfórico. Luego se agitó a 300 rpm a 60 °C por 6 horas y se enjuago en una centrifuga, utilizando agua ultrapura, a 9000 rpm, a una temperatura de 22° C por 30 minutos; este proceso se repitió hasta obtener un pH neutro. Finalmente, la arcilla se secó en una estufa a 75 °C por 24 h, obteniéndose 16 g del adsorbente (Choque et al., 2022).

2.2 Activación de la arcilla

Se preparo una solución de NaCl a 1 M, en donde se le agrego arcilla una proporción de 1g/ 5 ml de NaCl y para luego, ponerlo al Sonicador Ultrasonic Proessor modelo VCX 750 a 10 Hz por 10 min, por triplicado el proceso. Seguidamente se puso a agitar la solución, a 200 rpm a 22°C por 30 minutos. Para ser enjuago a través de una centrifuga, utilizando agua ultrapura, a 9000 rpm, a una temperatura de 22° C, por 30 minutos; este proceso se repitió hasta obtener una conductividad menor a 10 μ S/cm. Por último, se llevó a secar en una estufa a 75 °C por 24 h y obteniéndose 15.13 g de arcilla activada; la cual fue almacenada en un tubo de tapa rosca.

2.3 Análisis difractométrico XRD de la arcilla activada

El análisis de difracción de rayos X, para la arcilla, se realizó utilizando un difractómetro Bruker, modelo D8-Focus (Karlsruhe, Alemania), (Cu $K\alpha_1 = 1.54 \text{ \AA}$) a 40 kV y 40 mA, y un detector PSD Lynxeye (Choque et al., 2022).

2.4 Procedimiento de adsorción

Se realizó cuatro tratamientos (T1, T2, T3 y T4) con pH (5 y 8) y Acilla (Natural y Activada), bajo condiciones de temperatura del ambiente. Primeramente, se ajustó el pH con NaOH (0,1 N) y HCl (0.1 N) en vasos precipitados de 250 ml.

El colorante utilizado para la solución fue el Azul de Metileno (319.85 g/mol) a 2310

ppm, y se agregó 50 µl en 100 ml de agua destilada. Seguidamente se agregó arcilla a 100 ppm, a la solución del tinte en base al tratamiento requerido y luego se agitó en agitador magnético a 60 rpm durante los tiempos (0, 30, 50, 70, 90, 130, 180, 230, 330 y 430 min) para obtener la adsorción. Posteriormente se filtró la solución y se midió la absorbancia del agua filtrada, a una longitud de onda de 664 nm con un espectrofotómetro UV-Vis, modelo iris HI801 de la marca Hanna (Choque et al., 2023; Nipa et al., 2023).

La adsorción experimental del AM en el tiempo (q_t) se determinó a través de la Ecuación (1)

$$q_t = \frac{V(C_0 - C_t)}{m} \quad (1)$$

Donde, C_t , es la concentración del AM en el tiempo t (mg/L); C_0 , es la concentración inicial del AM en $t = 0.0$ min (mg/L); V es el volumen de la solución (L); m , es la masa de la arcilla (mg).

2.5 Estudios cinéticos

La cinética describe la velocidad en el que el adsorbato se adhiere al adsorbente en un tiempo de contacto y se tiene que tener conocimiento las leyes de adsorción a través de los modelos cinéticos.

Los datos experimentales $q_{t, \text{exp}}$ se ajustaron a los modelos cinéticos, pseudo primer orden y pseudo segundo orden y se evaluaron el coeficiente de correlación ajustada, así como los residuales de cada modelo.

Modelo de pseudo primer orden

La siguiente ecuación expresa el modelo cinético pseudo primer orden (2) (Albis et al., 2019; Choque et al., 2023).

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 t \quad (2)$$

Donde, q_e (mg/g): es la capacidad de colorante adsorbido en el equilibrio; q_t (mg/g): capacidad de colorante adsorbido en el tiempo t ; k_1 : constante de velocidad de adsorción (min^{-1}); t (min): tiempo de contacto.

Modelo de pseudo segundo orden

La ecuación (3) expresa en su forma integral linealizada del modelo cinético pseudo segundo orden (Choque et al., 2023; Nipa et al., 2023) .

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (3)$$

Donde, k_2 (g/mg.min): es la constante cinética del modelo de pseudo segundo orden; t (min): tiempo de contacto.

2.6 Ajuste de los datos obtenidos

Se considero los errores de los datos experimentales a través, de la minimización de la suma de errores al cuadrado (SEE) ecuación (4), evaluados a través de los métodos Quasi-Newton (QN) (Choque et al., 2023; Moroi et al., 2016).

$$SEE = \sum_{i=1}^N (q_{e_{mod}} - q_{e_{exp}})_i^2 \quad (4)$$

Donde N: es el número de mediciones experimentales y $q_{e_{exp}}$: es la capacidad de adsorción en equilibrio $q_{e_{mod}}$ experimental y : es la capacidad de adsorción en equilibrio del modelo.

Los datos se procesaron en los programas office Excel y STATICA. 64. VERSION 10.0.

3 | RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis difractométrico XRD y grado de cristalinidad de la arcilla

La figura 1 muestra los patrones XRD de la AA, evidenciando las intensidades presentadas por la emisión de rayos x, con un ángulo 2θ (o 2 theta), entre las direcciones del has emitido y recibido (Johnston et al., 2022). Se determinó mediante la intensidad emitida que la arcilla activada está compuesta por cuarzo $2\theta \approx 28.03$, mineral que se encuentra con mayor intensidad en la arcilla; siendo similar a los resultado obtenido por (Bernard et al., 2020), que analizó patrones de difracción de rayos X y la intensidad es notoria en arcilla Opalinusy. De igual manera, se encuentra magnetita $2\theta \approx 7.90$, caolinita $2\theta \approx 20.89$, Calcita $2\theta \approx 36.22$ y illita $2\theta \approx 41.65$ (Bernard et al., 2020; Johnston et al., 2022; Torres et al., 2013; Vaičiukynienė et al., 2020), todas estos minerales con intensidades menores.

De la misma manera se puede identificar la predominancia del pico con mayor intensidad en 2θ entre 20° y 40° (Figura 1), y esto puede ser debido a la estructura amorfa de la arcilla (Obregón et al., 2020). En cambio, se presentaron picos de menor intensidad a 2θ entre 0 y 80° , esta característica puede estar atribuida a arcilla modificada en medio básico y la adición de H_3PO_4 en la activación, debido a que los carbonatos y los óxidos son destruidos y eliminados (Choque et al., 2022); por ende permiten a la arcilla mejorar sus sitios de adsorción.

La AA presenta un grado de cristalinidad del 97.24 % y como resultado presenta un rigidez alta, asimismo, se relacionó que un alto grado de picos nítidos e intensos refleja un alto grado de cristalinidad de la arcilla (Johnston et al., 2022); por ejemplo en el caso del cuarzo. Por su parte, el tamaño de los cristales presentes en la AA es de 2.85 nm aproximadamente.

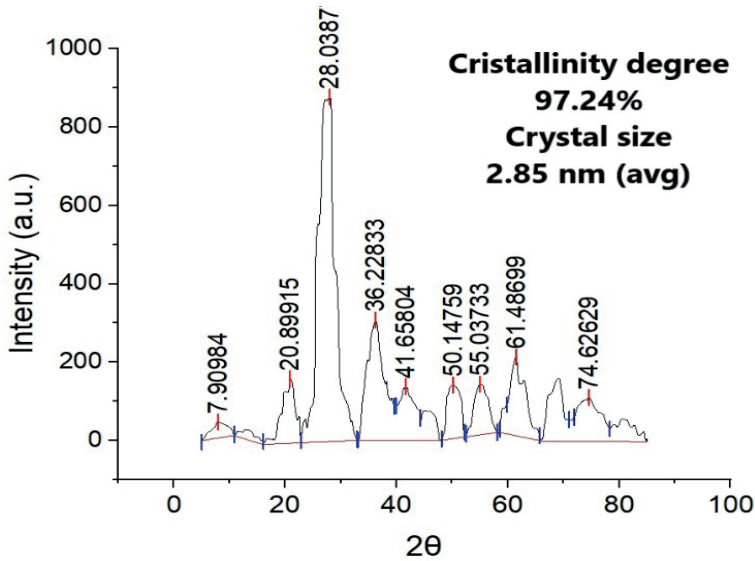


Figura 1. Difractograma de rayos X de la arcilla activada (AA)

3.2 Cinética de adsorción

El estudio cinético consiste en la rapidez con el que el adsorbato se adhiere a la superficie del absorbente a la cual se le denomina el proceso de adsorción (Bejarano et al., 2020; Choque et al., 2023). En la Tabla 1 se muestran los parámetros de los modelos pseudo primer orden (PPO) y pseudo de segundo orden (PSO).

Se observó que los coeficientes de determinación (R^2) del modelo PPO, oscilan entre los rangos de 0.79 a 0.98 y con valores de $R^2 > 0.70$ sugieren buen ajuste de un modelo a datos experimentales; por lo que los resultados encontrados indican que el modelo PPO se ajusta adecuadamente a los datos experimentales de la cinética. En el modelo cinético PSO se encuentra en 0.73, y 0.99 los valores de R^2 , indicando buen ajuste a los datos obtenidos. Por ende, el modelo que más se ajusta a la cinética de adsorción del AM con AA y AN es el modelo de pseudo segundo orden tal como se evidencian en trabajos similares (Bejarano et al., 2020; Ullah et al., 2022). Mismos comportamientos obtuvieron por Loufi et al., (2023), que realizaron la cinética de adsorción con arcillas naturales y el modelo PPO presento una menor adaptación a los datos experimentales $R^2=0.74$, un mejor ajuste en PSO con $R^2=0.99$.

Los modelos de PPO y PSO se ajustaron a través del método Quasi-Newton, y se reportó que el parámetro de constante de velocidad de adsorción K_1 , tiene comportamiento similar en los T_1 y T_2 con 0.035 min^{-1} . En cambio, en T_4 ligera diferencia con 0.033 min^{-1} y en T_3 presentó mayor velocidad de adsorción con 0.052 min^{-1} . Por otra parte, la constante de velocidad de PSO K_2 , tiene diferentes valores en el pH 5 con 0.016 y 0.035 g/mg.min en

AA y AN, respectivamente. Sin embargo, el comportamiento es constante en pH 8 tanto AA y AN; estos tiempos mostrados en los tratamientos realizados, indican que el tiempo necesario para obtener la capacidad de adsorción en equilibrio son cortos (Otavo, 2019).

La capacidad de AM adsorbido en el equilibrio q_e en PPO, reporta una mayor adsorción en el tratamiento T_1 a pH 5 y con AA, llegando a su capacidad en 4.64 mg/g; seguidamente en los tratamientos a pH 8 con AA y AN, exhiben valores constantes de 3.20 y 3.72 mg/g, respectivamente. Sin embargo, presentó una menor capacidad de adsorción en el T_2 , con 2.849 mg/g. En PSO reportó una mayor capacidad de adsorción del AM con AA de 4.868 mg/g y viceversa con AN (2.473 mg/g) en pH 5. Además, los T_3 y T_4 tiene una capacidad de adsorción constante de 3.71 mg/g con AA y 3.847 mg/g con AN; similares resultados se obtuvieron Cuesta & Nieto, (2022), donde el modelo PSO presento una capacidad de adsorción de 2.78 mg/g y una velocidad de adsorción de 4.75g/mg.min. con arcilla roja y el colorante (Azul Marino Básico 2RN). En ambos modelos la arcilla activada presento una mayor capacidad de adsorción en equilibrio esto puede estar atribuida a que la adición de NaCl y H_3SO_4 , que aumentan la capacidad en los sitios de adsorción en la arcilla y a su vez mejorando el comportamiento tixotrópico (Choque et al., 2022).

La distribución de las residuales de modelo PPO tiende a ser tendenciosos en los tratamientos T_2 , T_3 y T_4 y una distribución ligeramente tendenciosa en T_1 , siendo similar la distribución en todos los tratamientos de PSO. Este parámetro de ajuste permite evidenciar los errores a través de la diferencia entre los valores experimentales y los valores que predice el modelo.

Pseudo Primer Orden						
Tratamiento	pH	Tipo de arcilla	q_e (mg/g)	K_1 (min^{-1})	R^2	Residuales
T_1	5	AA	4.644	0.035	0.79	LT
T_2		AN	2.849	0.035	0.87	T
T_3	8	AA	3.208	0.052	0.98	T
T_4		AN	3.726	0.033	0.84	T
Pseudo Segundo Orden						
Tratamiento	pH	Tipo de arcilla	q_e (mg/g)	k^2 (g/mg.min)	R^2	Residuales
T_1	5	AA	4.868	0.016	0.88	LT
T_2		AN	2.473	0.035	0.73	LT
T_3	8	AA	3.710	0.027	0.99	LT
T_4		AN	3.847	0.025		LT

Donde T: Tendencioso; LT: ligeramente tendencioso

Tabla 1: Adsorción de azul de metilo

Con se muestra en la figura 2, el modelo PPO y PSO a pH 5 con AA, el proceso de adsorción se desarrolló rápidamente en los tiempos 15 a 20 min, seguidamente con

comportamiento lento hasta llegar a la capacidad de adsorción de 4.644 y 4.868 mg/g y, alcanzar el equilibrio en 180 y 340 min con PPO y PSO, respectivamente. El rápido inicio de adsorción puede estar influenciada al mayor número de sitios libres en la superficie del adsorbente (Loutfi et al., 2023); además, puede estar atribuida a la capacidad de intercambio catiónico de la arcilla (Choque et al., 2022); dado que esta característica permite a la arcilla adsorber cationes del colorante azul de metileno (AM), dado que el tinte posee carga catiónica.

Por otra parte, en la AN a pH 5 se muestra que el tiempo de adsorción ocurre durante los 30 y 40 min en PPO y PSO, respectivamente (Figura 2); para luego tener un incremento moderado, esto puede estar influenciado por la disponibilidad de suficientes sitios para la adsorción en la arcilla y a su vez, por la repulsión de carga de las moléculas de tinte libres (Loutfi et al., 2023; Rehman et al., 2021). Posteriormente presenta un comportamiento constante, hasta llegar a su capacidad de adsorción en los dos modelos. De igual manera, en pH 8 con AA, el tiempo de adsorción rápida aumenta al 40 y 50 min en PSO y PPO, respectivamente, a comparación de los tratamientos a pH 5. Asu vez, en PSO el tiempo para alcanzar el equilibrio 3.71 mg/g, tiende a aumentar de 40-400 min, donde el aumento del tiempo de contacto puede llevar a una mejor capacidad de adsorción. Similar efecto encontró Rehman et al., (2021), que el tiempo de contacto (10-380 min) condujo a una mejor capacidad de adsorción de 81,54 a 107,18 mg/g. Y, por último, se muestra que la adsorción rápida se realiza en los primeros 30 y 50 min y llegando la capacidad de adsorción en equilibrio en los 400 y 230 min en PSO y PPO, respectivamente.

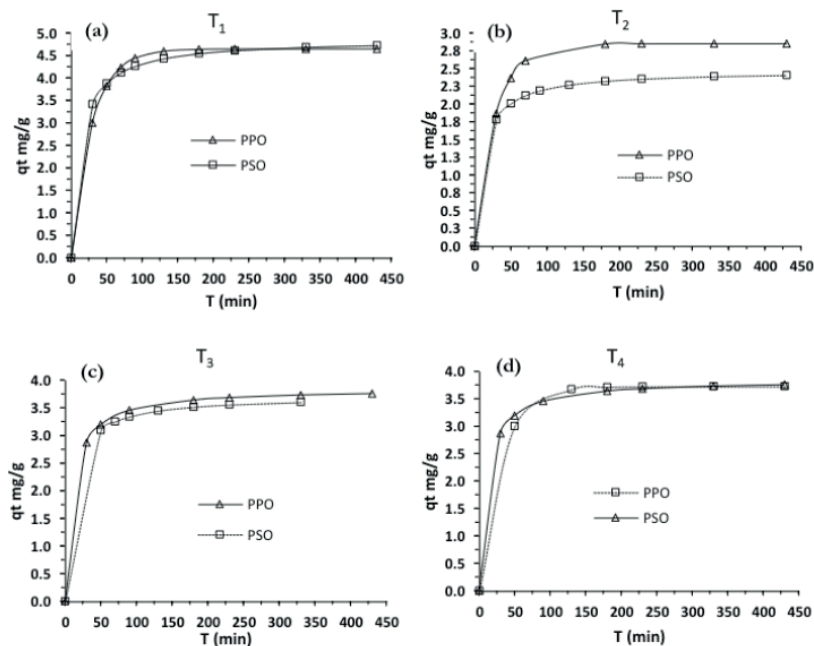


Figura 2. Curvas de los modelos cinéticos pseudo primer PPO y pseudo segundo orden PSO; (a) T_1 a pH 5 con AA; (b) T_2 a pH 5 con AN; (c) T_3 a pH 8 con AA; d) T_4 a pH 8 con AN.

4 | CONCLUSIONES

Los datos experimentales obtenidos se ajustaron mejor al modelo cinético pseudo segundo orden, bajo las condiciones de un pH 5 y con AA. Por otro lado, los resultados experimentales mostraron que la arcilla activada con ácido fosfórico y cloruro de sodio posee una mayor capacidad de adsorción a comparación de la arcilla natural. La caracterización de la AA mediante XRD, presenta un grado de cristalinidad de 97.24 % con un tamaño de cristal de 2. 85 nm, siendo el mineral de cuarzo con mayor intensidad. Por su parte, la arcilla es un recurso natural económico y amigable con medio ambiente, que se puede aprovechar en el tratamiento de aguas residuales, contaminadas con colorantes catiónicos como el Azul de metileno. Si embargo se deben de realizar más estudios para comprobar la eficiencia, viabilidad y uso en escalas mayores de las arcillas en la eliminación de los colorantes sintéticos.

AGRADECIMIENTO

El presente trabajo fue financiado por la vicepresidencia de investigación de la Universidad Nacional José María Arguedas (UNAJMA-UNAJMA). Se agradece al laboratorio de Investigación en Materiales para el Tratamiento de Aguas y Alimentos (LIMTA-UNAJMA), al Laboratorio de Investigación de Nanotecnología en Alimentos (LINA- UNAJMA) y al Centro de Investigación de Estudiantes de Ingeniería Ambiental (CINEIA- UNAJMA), al grupo de Investigación en Desarrollo de Materiales Avanzados para el Tratamiento de Aguas Alimentos (G-LIMTA-UNAJMA), Grupo de Investigación en Nutraceuticos y Biomateriales (GIMBIO-UNAJMA)

REFERENCIAS

Abdel-Fadeel, M. A., Aljohani, N. S., Al-Mhyawi, S. R., Halawani, R. F., Aljuhani, E. H., & Salam, M. A. (2022). A simple method for removal of toxic dyes such as Brilliant Green and Acid Red from the aquatic environment using Halloysite nanoclay. *Journal of Saudi Chemical Society*, 26(3), 101475. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2022.101475>

Ahmed, R., Rahman Rafia, R., & Abul Hossain, M. (2021). Kinetics and Thermodynamics of Acid Red 1 Adsorption on Used Black Tea Leaves from Aqueous Solution. *International Journal of Sciences*, 10(06), 7–15. <https://doi.org/10.18483/ijsci.2469>

Albis, A., Llanos, H., Galeano, J., & García, D. (2019). Adsorción de azul de metileno utilizando cáscara de yuca (*Manihot esculenta*) modificada químicamente con ácido oxálico. *Revista ION*, 31(2), 99–110. <https://doi.org/10.18273/revion.v31n2-2018007>

Bejarano, M., Estrella, A., Márquez, O., Ríos, A., & Rodríguez, M. (2020). Estudio de la adsorción de los colorantes Drimaren Amarillo CL-2R y Basic Azul Marino 2 RN en arcillas activadas. *NOVASINERGIA*, 3(2), 93–107. <https://doi.org/https://doi.org/10.37135/ns.01.06.08>

- Bernard, E., Jenni, A., Fisch, M., Grolimund, D., & Mäder, U. (2020). Micro-X-ray diffraction and chemical mapping of aged interfaces between cement pastes and Opalinus Clay. *Applied Geochemistry*, 115, 104538. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104538>
- Choque, D., Ligarda, C. A., Choque, Y., Solano, A. M., Ramos, B. S., Zamalloa, M. M., Álvarez, G. J., Zamalloa, A., Choque, K., & Alzamora, H. (2023). Multimetal removal in aqueous medium using a potato starch/nopal mucilage copolymer: A study of adsorption kinetics and isotherms. *Results in Engineering*, 18(2023), 101164. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101164>
- Choque, D., Ligarda, C. A., Ramos, B. S., Solano, A. M., Quispe, J., Choque, Y., Peralta, D. E., Mart, E. L., Correa, O., Masco, M. L., Lechugal, W. J., & Amanca, F. M. (2022). Formulation of Novel Composite (Activated Nanoclay / Hydrocolloid of Nostoc sphaericum) and Its Application in the Removal of Heavy Metals from Wastewater. *Polymers*, 14(2803).
- Cuesta, E. E. C., & Nieto, A. S. N. (2022). Evaluación de la Capacidad de Adsorción de Arcillas Naturales Mediante Cinética e Isotermas de Adsorción en la Remoción de Colorantes [Universidad Nacional de Chimborazo]. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/9876>
- Johnston, C. J., Pepper, R. A., Martens, W. N., & Couperthwaite, S. (2022). Relationship between thermal dehydroxylation and aluminium extraction from a low-grade kaolinite: Role of clay chemistry and crystallinity. *Hydrometallurgy*, 214, 105967. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105967>
- Kiranşan, M., Soltani, R. D. C., Hassani, A., Karaca, S., & Khataee, A. (2014). Preparation of cetyltrimethylammonium bromide modified montmorillonite nanomaterial for adsorption of a textile dye. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 45(5), 2565–2577. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2014.06.007>
- Kong, Y., Zhuang, Y., Han, Z., Yu, J., Shi, B., Han, K., & Hao, H. (2019). Dye removal by eco-friendly physically cross-linked double network polymer hydrogel beads and their functionalized composites. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 78, 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.07.006>
- Loufi, M., Mariouch, R., Mariouch, I., Belfaquir, M., & ElYoubi, M. S. (2023). Adsorption of methylene blue dye from aqueous solutions onto natural clay: Equilibrium and kinetic studies. *Materials Today: Proceedings*, 72, 3638–3643. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.412>
- Modirshahla, N., Hassani, A., Behnajady, M. A., & Rahbarfam, R. (2011). Effect of operational parameters on decolorization of Acid Yellow 23 from wastewater by UV irradiation using ZnO and ZnO/SnO₂ photocatalysts. *Desalination*, 271(1–3), 187–192. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.12.027>
- Moroi, G. N., Avram, E., & Bulgariu, L. (2016). Adsorption of Heavy Metal Ions onto Surface-Functionalised Polymer Beads. I. Modelling of Equilibrium Isotherms by Using Non-Linear and Linear Regression Analysis. *Water, Air, and Soil Pollution*, 227(8), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s11270-016-2953-5>
- Nipa, S. T., Shefa, N. R., Parvin, S., Khatun, M. A., Alam, M. J., Chowdhury, S., Khan, M. A. R., Shawon, S. M. A. Z., Biswas, B. K., & Rahman, M. W. (2023). Adsorption of methylene blue on papaya bark fiber: Equilibrium, isotherm and kinetic perspectives. *Results in Engineering*, 17(October 2022), 100857. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100857>
- Obregón, D., Ilse, I. D., & Sun, R. (2020). REMOCIÓN DE MERCURIO EMPLEANDO CARBÓN ACTIVADO PREPARADO A PARTIR DE AGUAJE (*Mauritia flexuosa*). *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 86(1), 70–87. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v86i1.274>

Otavo, R. A. (2019). Estudio De La Remoción De La Tartrazina En Medio Acuoso Empleando Como Medio Adsorbente Una Arcilla Tipo Bentonita. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76518>

Quintero, L. (2012). Evaluación del tratamiento biológico para la remoción del color índigo del agua residual industrial textil, por un consorcio microbiano, en lecho fluidizado. Universidad Nacional de Colombia.

Rehman, M. U., Manan, A., Uzair, M., Khan, A. S., Ullah, A., Ahmad, A. S., Wazir, A. H., Qazi, I., & Khan, M. A. (2021). Physicochemical characterization of Pakistani clay for adsorption of methylene blue: Kinetic, isotherm and thermodynamic study. *Materials Chemistry and Physics*, 269, 124722. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124722>

Torres, J. A., Carriazo, J. G., & Sanabria, N. R. (2013). Síntesis y caracterización de bentonita modificada con especies de TiO₂ y mineral ilmenita Synthesis and characterization of modified-bentonite with obtained from ilmenite Abstract Síntese e caracterização de bentonita modificada com espécies de TiO₂ e. *Revista Colombiana de Química*, 42(45), 44–50.

Ullah, N., Ali, Z., Ullah, S., Khan, A. S., Adalat, B., Nasrullah, A., Alsaadi, M., & Ahmad, Z. (2022). Synthesis of activated carbon-surfactant modified montmorillonite clay-alginate composite membrane for methylene blue adsorption. *Chemosphere*, 309, 136623. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136623>

Vaičiukynienė, D., Nizevičienė, D., Kantautas, A., Bocullo, V., & Kiele, A. (2020). Alkali Activated Paste and Concrete Based on of Biomass Bottom Ash with Phosphogypsum. *Applied Sciences*, 10(5190), 1–13. <https://doi.org/10.3390/app10155190>

Vanaamudan, A., & Sudhakar, P. P. (2015). Equilibrium, kinetics and thermodynamic study on adsorption of reactive blue-21 and reactive red-141 by chitosan-organically modified nanoclay (Cloisite 30B) nano-bio composite. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 55, 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2015.03.025>

Vilaseca, V. M. (2015). Eliminación del color de las aguas residuales procedentes de la tintura con colorantes reactivos. Universidad Politécnica de Catalunya.

Xiao, H., Shahab, A., Xi, B., Chang, Q., You, S., Li, J., Sun, X., Huang, H., & Li, X. (2021). Heavy metal pollution, ecological risk, spatial distribution, and source identification in sediments of the Lijiang River, China. *Environmental Pollution*, 269(xxxx), 116189. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116189>

Zhou, Y., Lu, J., Zhou, Y., & Liu, Y. (2019). Recent advances for dyes removal using novel adsorbents: A review. *Environmental Pollution*, 252, 352–365. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.072>

Zinadini, S., Zinatizadeh, A. A., Rahimi, M., Vatanpour, V., Zangeneh, H., & Beygzadeh, M. (2014). Novel high flux antifouling nanofiltration membranes for dye removal containing carboxymethyl chitosan coated Fe₃O₄ nanoparticles. *Desalination*, 349, 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.07.007>