



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), mayo-junio 2026,
Volumen 10, Número 3.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i3

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL TIEMPO DE TRATAMIENTO TÉRMICO EN LA CINÉTICA DE ADSORCIÓN DE LA ZEOLITA NATURAL

**STUDY ON THE INFLUENCE OF HEAT TREATMENT TIME ON THE
ADSORPTION KINETICS OF NATURAL ZEOLITE**

Arianny Cruz Rodriguez

Universidad ISA, Departamento de Postgrado y Educación Continuada. Santiago de los Caballeros. República Dominicana

Lázaro Pérez Acosta

Universidad ISA, Departamento de Ciencias Básicas.
Santiago de los Caballeros. República Dominicana

María Yamilex Cabrera Pichardo

Investigador independiente. Santiago de los Caballeros. República Dominicana

José Gregorio Blanco Guzmán

Universidad ISA, Departamento de Ciencias Básicas.
Santiago de los Caballeros. República Dominicana

Estudio de la influencia del tiempo de tratamiento térmico en la cinética de adsorción de la zeolita natural

Arianny Cruz Rodríguez¹

acruz@isa.edu.do

<https://orcid.org/0009-0001-1708-4111>

Universidad ISA, Departamento de Postgrado y Educación Continuada. Santiago de los Caballeros. República Dominicana

Lázaro Pérez Acosta

lperez@isa.edu.do

<https://orcid.org/0000-0001-7469-4605>

Universidad ISA, Departamento de Ciencias Básicas.
Santiago de los Caballeros. República Dominicana

María Yamilex Cabrera Pichardo

mariaycp819@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0002-4931-0977>

Investigador independiente. Santiago de los Caballeros. República Dominicana

José Gregorio Blanco Guzmán

jblanco@isa.edu.do

<https://orcid.org/0000-0001-8474-0513>

Universidad ISA, Departamento de Ciencias Básicas.
Santiago de los Caballeros. República Dominicana

RESUMEN

El presente estudio evaluó la influencia del tiempo de tratamiento térmico en la cinética de adsorción de la zeolita natural utilizando el colorante RhB. Se emplearon muestras en polvo con tamaños de partículas entre $300\mu\text{m} < a \leq 600\mu\text{m}$, que fueron sometidas a diferentes tiempos de tratamiento, $t = 0, 0.5\text{ h}$ y 1.5 h , a $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para los ensayos de adsorción, cada muestra fue evaluada en las concentraciones $20, 32, 40$ y 48 mgL^{-1} y se mantuvo bajo agitación magnética durante diferentes tiempos de contacto: $20, 40, 60, 80, 100, 120$ y 140 min . De esta forma, se realizaron un conjunto de ensayos que combinaron todas las concentraciones iniciales con todos los tiempos de contacto, para cada muestra. Desde los resultados se constató que el tiempo de tratamiento térmico tuvo marcada influencia en las propiedades adsorbentes de nuestras muestras, modificando tanto la capacidad de adsorción como la rapidez del proceso. Sin embargo, los valores de capacidad de adsorción reportados fueron relativamente pequeños a bajas concentraciones. El proceso de adsorción se ajustó adecuadamente al modelo cinético PSO, sugiriendo que el mecanismo predominante es la quimisorción. También, se identificó que con tan solo 30 min de tratamiento térmico, bajo las condiciones usadas, se mejoran las propiedades adsorbentes sin comprometer la microestructura del material.

Palabras clave: zeolita natural; clinoptilolita; tratamiento térmico; rodamina B.

¹ Autor principal

Correspondencia: acruz@isa.edu.do

Study on the influence of heat treatment time on the adsorption kinetics of natural zeolite

ABSTRACT

In this work we study the influences of the heat treatment time on the adsorption kinetics of natural zeolite using RhB dye. Powdered samples with particle sizes in the range of $300\text{ }\mu\text{m} < a \leq 600\text{ }\mu\text{m}$ were subjected to different treatment times ($t = 0, 0.5\text{ h}$, and 1.5 h) at $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. For the adsorption experiments, each sample was tested at initial concentrations of $20, 32, 40$ y 48 mgL^{-1} and kept under magnetic stirring for various contact times ($20, 40, 60, 80, 100, 120$, and 140 minutes). In this way, a full set of experiments was carried out, combining all initial concentrations with all contact times for each sample. The results showed that the treatment time had a significant influence on the adsorbent properties of our samples, affecting both the adsorption capacity and the rate of the process. However, the reported adsorption capacities were relatively low at lower concentrations. The adsorption process was well described by the pseudo-second-order (PSO) kinetic model, suggesting that chemisorption is the dominant mechanism. It was also found that a heat treatment of just 30 minutes, under the conditions used, is enough to improve the adsorptive properties without compromising the material's microstructure.

Keywords: natural zeolite; clinoptilolite; heat treatment; rhodamine B.

*Artículo recibido 20 mayo 2026
Aceptado para publicación: 20 junio 2026*



INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, hemos visto cómo el aumento de la actividad industrial ha generado cada vez mayor preocupación sobre temas de sostenibilidad y medio ambiente. Un ejemplo claro de esto se observa en la contaminación de acuíferos debido a determinados procesos en la industria textil. En este sector, uno de los mayores problemas de contaminación está relacionado con el uso intensivo de colorantes sintéticos, compuestos que se fabrican específicamente para ser muy estables y que resistan la degradación por microorganismos. El hecho de que estos compuestos persistan en el agua no solo hace más difíciles los tratamientos convencionales, sino que también implica riesgos importantes para la salud humana, estando asociados a efectos mutagénicos y carcinogénicos (Forgacs et al., 2004; Robinson et al., 2001, Pedebos et al., 2024). Entre estos colorantes, la rodamina B es uno de los que más se estudia (RhB), un compuesto catiónico muy utilizado en la industria textil y que, por su toxicidad y estabilidad química, representa un riesgo ambiental y sanitario cuando está presente en aguas residuales (Pompeu et al., 2023).

Ante estas limitaciones, la utilización de materiales adsorbentes naturales de bajo costo y fácil adquisición, se presenta como una alternativa interesante en el tratamiento de las aguas residuales. Dentro de este contexto, la zeolita natural, sobre todo la clinoptilolita, destaca por su elevada capacidad de adsorción e intercambio iónico, permitiendo la eficiente eliminación de contaminantes, entre ellos los colorantes textiles. (Elbanna et al., 2024). Además, a diferencia de otros adsorbentes como el carbón activado, la zeolita es abundante, económica y con potencial de regeneración, lo que la convierte en un recurso atractivo para aplicaciones sostenibles a gran escala.

Por otra parte, está bien establecido que la modificación de materiales adsorbentes mediante tratamientos térmicos constituye una estrategia eficaz para mejorar su desempeño. Dichos procesos pueden alterar la estructura cristalina, aumentar el área superficial específica y modificar el tamaño de poro, lo que impacta directamente en la cinética y capacidad de adsorción (Ortiz-Iniesta, Heeres, & Melian-Cabrera, 2013). En la clinoptilolita, por ejemplo, la calcinación favorece la deshidratación, la remoción de impurezas y la activación de los canales internos de la zeolita, incrementando el área superficial y la accesibilidad a los sitios activos. Investigaciones previas han reportado que la activación térmica de la zeolita natural conduce a una mejora significativa en la remoción de RhB respecto al material en estado



natural, en particular cuando se combina con pretratamientos de intercambio catiónico (Kuśmirek, Fronczyk & Świątkowski, 2023). No obstante, la mayoría de los trabajos se han enfocado en estudiar la influencia de la temperatura de calcinación, manteniendo constante la duración del tratamiento en intervalos de 2 a 5 horas, sin evaluar sistemáticamente cómo el tiempo de exposición térmica condiciona la estructura y, en consecuencia, la capacidad adsorbente del material para el caso de la RhB (Pedebos et al., 2024).

Evidencia indirecta en otros sistemas de adsorción sugiere que el tiempo de tratamiento térmico es un parámetro crítico: tiempos demasiado cortos pueden resultar insuficientes para eliminar agua estructural o impurezas, mientras que tiempos prolongados a temperaturas elevadas pueden inducir dealuminación y colapso parcial de la estructura cristalina, reduciendo la microporosidad y la densidad de sitios activos (Breck, 1974). Esto indica que debe existir un intervalo de tiempo óptimo de calcinación en el que se maximiza la capacidad de adsorción de contaminantes catiónicos, como la RhB.

En este contexto, el estudio de la influencia del tiempo de tratamiento térmico en la zeolita natural constituye un vacío de investigación relevante, cuya exploración puede aportar criterios más precisos para optimizar el uso de este material en la remediación de efluentes coloreados. De aquí, que resulta válido preguntarse: ¿Cómo influye el tiempo de tratamiento térmico en la cinética de adsorción de la zeolita natural utilizando el colorante RhB?

Por tal razón, el presente estudio se enfoca en evaluar preliminarmente la influencia del tiempo de tratamiento térmico en la cinética de adsorción de la zeolita natural frente a la RhB, bajo la hipótesis de que un incremento controlado en dicho tiempo genera modificaciones estructurales que potencian la capacidad de adsorción del material. Con ello, se busca contribuir al desarrollo de alternativas eficientes, sostenibles y de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria textil.



METODOLOGÍA

Preparación de las muestras

Para este estudio se utilizó zeolita natural, del tipo clinoptilolita, importada desde Cuba y comercializada en República Dominicana por la empresa ECOSEA S.R.L. Primeramente, se redujo el tamaño de partículas a través de la molienda manual durante 15 *min* en un mortero ágata. Luego, el polvo obtenido se tamizó para obtener una distribución de tamaños de partículas entre $300\mu\text{m} < a \leq 600\mu\text{m}$. Este polvo fino se lavó varias veces con agua destilada para eliminar impurezas. Con el propósito de reducir el aire atrapado dentro de los poros del material, el cual puede reducir el área superficial disponible para la adsorción, fue necesario hervir el polvo por un periodo de 30 minutos en 2 L de agua destilada y posteriormente se dejó enfriar a temperatura ambiente. Luego, se secó a una temperatura de 100 °C por un periodo de 24 h en una mufla Thermolyne Type 30400 de la marca Thermo Scientific. Finalmente, se separaron 3 porciones, de 50 g cada una, y se sometieron a un tratamiento térmico a 400 °C en un horno Fisher Scientific Isotemp Oven 200 Series modelo 215G, durante diferentes tiempos, $t = 0$, 0.5 h y 1.5 h, obteniéndose las muestras ST, T-0.5 y T-1.5 respectivamente.

Preparación de las soluciones y toma de medidas

Para los ensayos de adsorción se preparó primero una solución madre de RhB en agua destilada con una concentración de 1 gL^{-1} . A partir de esta solución se obtuvieron, mediante dilución con agua destilada, las concentraciones de trabajo: 24, 32, 40 y 48 mgL^{-1} .

Cada muestra de zeolita, correspondiente a un tiempo específico de tratamiento térmico, fue evaluada en todas las concentraciones mencionadas. Para ello, en matraces de 100 mL se colocaron 50 mL de la solución a analizar y se adicionó 1.0 g de polvo de la muestra respectiva. Posteriormente, cada sistema se mantuvo bajo agitación magnética durante diferentes tiempos de contacto: 20, 40, 60, 80, 100, 120 y 140 minutos. De esta forma, para cada condición de tratamiento térmico de la zeolita se obtuvo un conjunto de ensayos que combinó todas las concentraciones iniciales con todos los tiempos de contacto. Al finalizar cada ensayo, las soluciones se analizaron en un espectrofotómetro UV-Visible modelo Genesys 50, de la marca Thermo Scientific. Previamente, se construyó una curva de calibración a partir de soluciones estándar de RhB en agua destilada, lo que permitió determinar el coeficiente de extinción



molar del colorante. A partir de las absorbancias medidas se calcularon las concentraciones finales de RhB en cada muestra, con lo cual se elaboraron las curvas cinéticas de adsorción y se obtuvieron los parámetros de interés discutidos en la sección de resultados.

Ajuste y obtención de parámetros

Para describir la evolución de la adsorción de RhB en función del tiempo de contacto, se aplicaron los modelos cinéticos de pseudo-primer orden (PFO) y pseudo-segundo orden (PSO).

El modelo PFO, propuesto por Lagergren (1898), asume que la velocidad de adsorción es proporcional a la diferencia entre la capacidad de adsorción en equilibrio (q_e) y la adsorbida en el tiempo (q_t), y que se puede expresar matemáticamente como:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (1)$$

donde k_1 es la constante de velocidad (min^{-1}). Al integrar y reescribir se obtiene:

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

Por su parte, el modelo PSO, formulado por Ho y McKay (1999), considera que la cinética depende del cuadrado de la diferencia entre q_e y q_t , y que se expresa matemáticamente como:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (3)$$

donde k_2 es la constante de velocidad del modelo ($\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$). Al integrar y reescribir se obtiene:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (4)$$

En ambos casos, los parámetros cinéticos (q_e , k_1 y k_2) se obtuvieron a partir de los ajustes lineales correspondientes, usando las ecuaciones (2) y (4). La comparación de la capacidad de adsorción en equilibrio y de las constantes cinéticas para las diferentes muestras permitió evaluar el efecto del tiempo de tratamiento térmico sobre sus propiedades adsorbentes y determinar el mecanismo de absorción predominante del material. (Wang, & Guo, 2020).

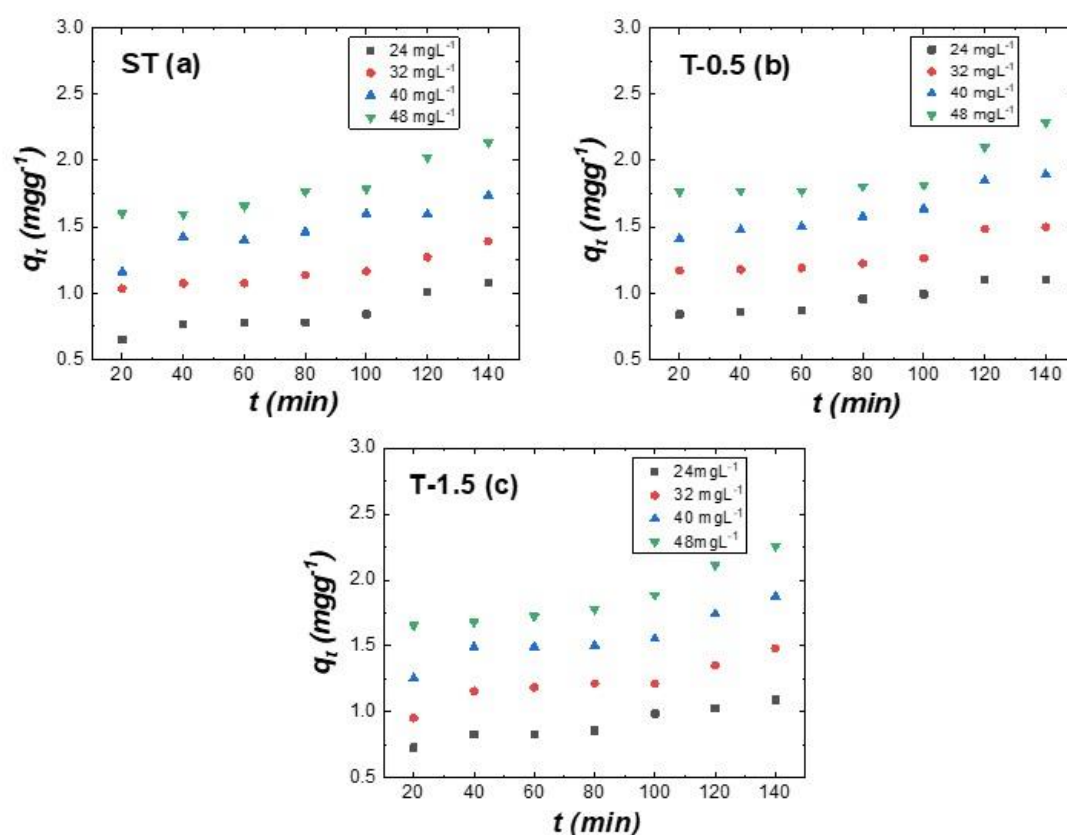
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se explicó, para entender los mecanismos y la rapidez con la que la RhB es adsorbida por nuestras muestras, fue necesario estudiar la cinética de adsorción y aplicar los modelos cinéticos correspondientes. En la figura 1 se presentan las curvas cinéticas de adsorción para las muestras ST, T-

0.5 y T-1.5. Es importante resaltar que nuestros valores de capacidad de adsorción se encuentran dentro del rango reportado por otros autores para la adsorción de RhB por zeolita, natural o levemente tratada, a bajas concentraciones (Elbanna et al., 2024). Desde los gráficos es visible que la cantidad adsorbida aumenta de forma continua para todas las muestras y todas las concentraciones evaluadas. Sin embargo, la muestra T-0.5 exhibe los mejores resultados. Este incremento en la capacidad de adsorción con respecto a ST es un resultado esperado, ya que el tratamiento térmico elimina agua estructural o impurezas, expandiendo el volumen libre de los microporos y facilitando el acceso a los sitios activos internos (Ortiz-Iniesta, Heeres, & Melian-Cabrera, 2013). Sin embargo, al prolongar el tratamiento térmico, se observa una ligera disminución en la capacidad de adsorción de T-1.5 comparada con la muestra T-0.5, lo cual sugiere que pudiera estar ocurriendo un proceso de deshidroxilación excesiva o un inicio de colapso estructural (Gualtieri & Passaglia, 2020).

Por otra parte, podemos apreciar que la adsorción fue directamente proporcional a la concentración inicial del adsorbato en el rango de concentraciones estudiado. Este comportamiento también concuerda con estos tipos de sistemas, donde el gradiente de concentración favorece la transferencia de RhB desde el medio de solución hacia los sitios activos del adsorbente (Nyankson et al., 2020).

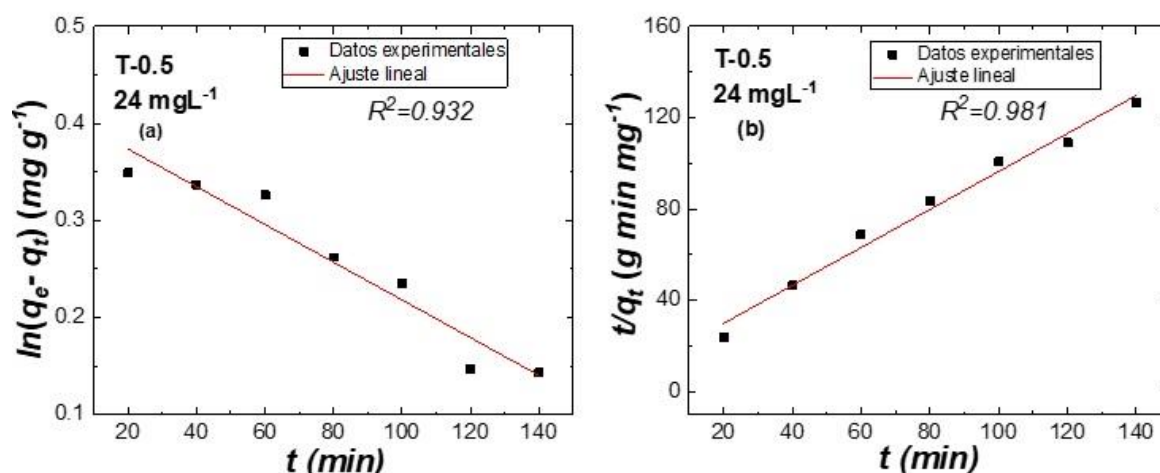
Figura 1. Curvas cinéticas de adsorción para las muestras ST, T-0.5 y T-1.5.



La figura 2 muestra una selección de los procesos de ajuste lineal de los datos experimentales según los modelos PFO y PSO, específicamente para la muestra T-0.5 a la concentración 24 mg L^{-1} . Desde la regresión lineal se obtuvieron, como parámetros de ajustes, la cantidad de adsorbato adsorbido en el equilibrio, q_e , y las constante de velocidad, k_1 y k_2 , y los resultados se muestran en la tabla 1.

La validez del modelo PSO para describir nuestros procesos de adsorción es claramente apreciable a través de la correspondencia entre el ajuste y los datos experimentales. Una observación detallada en la tabla 1 muestra que los coeficientes de determinación ($R^2 > 0.961$) fueron significativamente superiores a los obtenidos con el modelo PFO, especialmente a altas concentraciones donde el ajuste de PFO se desvía significativamente, con $R^2 = 0.396$, como en el caso de la muestra T-0.5 a 48 mg L^{-1} . Resultados similares durante el proceso de ajuste se obtuvieron para todas las muestras y a todas las concentraciones.

Figura 2. Selección del proceso de regresión lineal por mínimos cuadrados para la muestra T-0.5, para una concentración inicial de 24 mgL^{-1} , según ecuación 2 en (a) y ecuación 4 en (b).



Desde los datos de la tabla 1 también podemos apreciar que, para el modelo PFO, el valor de q_e disminuye al aumentar la concentración (por ejemplo, de 1.70 mg g^{-1} a 1.15 mg g^{-1} en la muestra ST), lo cual físicamente no tiene sentido en estos tipos de sistemas (Chu, Bollinger & Kierczak, 2025). En cambio, al aplicar el modelo PSO ocurre lo contrario y q_e aumenta con la concentración (de 1.16 mg g^{-1} a 2.26 mg g^{-1} en la muestra ST). Este resultado evidencia que el modelo PSO no solo concuerda más con los resultados experimentales, sino que describe un comportamiento coherente en función de la concentración inicial de adsorbato.

El buen ajuste del modelo PSO a nuestros datos sugiere que el mecanismo predominante corresponde a un proceso químico (quimisorción), mediado por interacciones electrostáticas o intercambio de electrones entre grupos funcionales de la RhB y los sitios activos de la zeolita (Nyankson et al, 2020). Por tanto, la velocidad de adsorción dependerá más de la disponibilidad de sitios activos que de la concentración en disolución o del transporte de masa. Sin embargo, la reducción de la velocidad de adsorción k_2 con el aumento de la concentración inicial pudiera indicar que existen posibles contribuciones de difusión, aunque al parecer no son predominantes. Esto podría ser la causa también de tiempos de equilibrio relativamente largos y de que no se alcance la saturación, como se observa en las curvas de la figura 1.

Al comparar los valores de q_e obtenidos desde el modelo PSO, se aprecia que no existen prácticamente diferencias entre las muestras T-0.5 (2.41 mg g^{-1}) y T-1.5 (2.39 mg g^{-1}). O sea, tres veces el tiempo de tratamiento térmico no conlleva a mejoras significativas en las propiedades adsorbentes del material. Desde un enfoque energético, este resultado sugiere que un tratamiento térmico de tan solo 30 min sería suficiente para mejorar las propiedades adsorbentes de la zeolita activada con respecto al material sin tratar, lo cual sería ventajoso desde el punto de vista de la producción a gran escala y de costos.

Tabla 1. Parámetros de ajuste a los modelos cinéticos PFO y PSO para todas las muestras.

Muestra	Concentraciones iniciales	Pseudo Primer Orden			Pseudo Segundo Orden		
		$q_e(\text{mg g}^{-1})$	$k_1(\text{min}^{-1})$	R^2	$q_e(\text{mg g}^{-1})$	$k_2(\text{g mg}^{-1}\text{min}^{-1})$	R^2
ST	24 mgL^{-1}	1.7009	0.0024	0.88 2	1.1652	0.0536	0.94 4
	32 mgL^{-1}	1.3426	0.0026	0.86 1	1.4418	0.0468	0.98 3
	40 mgL^{-1}	1.1541	0.0053	0.91 4	1.8407	0.0362	0.99 2
	48 mgL^{-1}	1.1536	0.0131	0.79 3	2.2625	0.0261	0.98 1
T-0.5	24 mgL^{-1}	1.5107	0.0019	0.92 3	1.2008	0.0524	0.98 1
	32 mgL^{-1}	1.2470	0.0033	0.74 9	1.5936	0.0400	0.96 1
	40 mgL^{-1}	1.0845	0.0072	0.86 2	2.0280	0.0305	0.97 8
	48 mgL^{-1}	0.7218	0.0087	0.39 6	2.4063	0.0245	0.97 7

T-1.5	24 mgL ⁻¹	1.6025	0.0022	0.95 1	1.1846	0.0452	0.98 1
	32 mgL ⁻¹	1.3559	0.0035	0.87 2	1.5530	0.0378	0.98 2
	40 mgL ⁻¹	1.1504	0.0067	0.84 4	1.9693	0.0302	0.98 3
	48 mgL ⁻¹	0.9639	0.0122	0.72 2	2.3929	0.0229	0.97 2

Utilizando los parámetros de ajustes, se obtuvieron las curvas cinéticas de adsorción teóricas, según ambos modelos, para todas las muestras y a todas las concentraciones. En las figuras 3, 4 y 5 se presentan dichos resultados junto a las curvas experimentales. En todos los casos se aprecia la buena correspondencia entre teoría y experimento, sobre todo a bajas concentraciones. Para concentraciones de 48 mg L⁻¹ al parecer comienzan a influir posibles contribuciones de difusión que coexisten con el control químico, como se discutió anteriormente.

Por último, podemos mencionar que si bien el tratamiento térmico no afectó el mecanismo fundamental de adsorción, sí modificó la eficiencia del proceso. Es claramente observable que las muestras con tratamiento térmico mostraron mejor afinidad por el colorante y al parecer la mayor parte de la limpieza estructural ocurrió en los primeros 30 min del tratamiento térmico, al menos en las condiciones en que se desarrollaron las mediciones (tamaño de partícula, temperatura de tratamiento térmico y rango de concentraciones iniciales).

Figura 3. Curvas experimentales y curvas teóricas obtenidas a partir de los parámetros de ajuste de los modelos cinéticos PFO y PSO para la muestra ST.

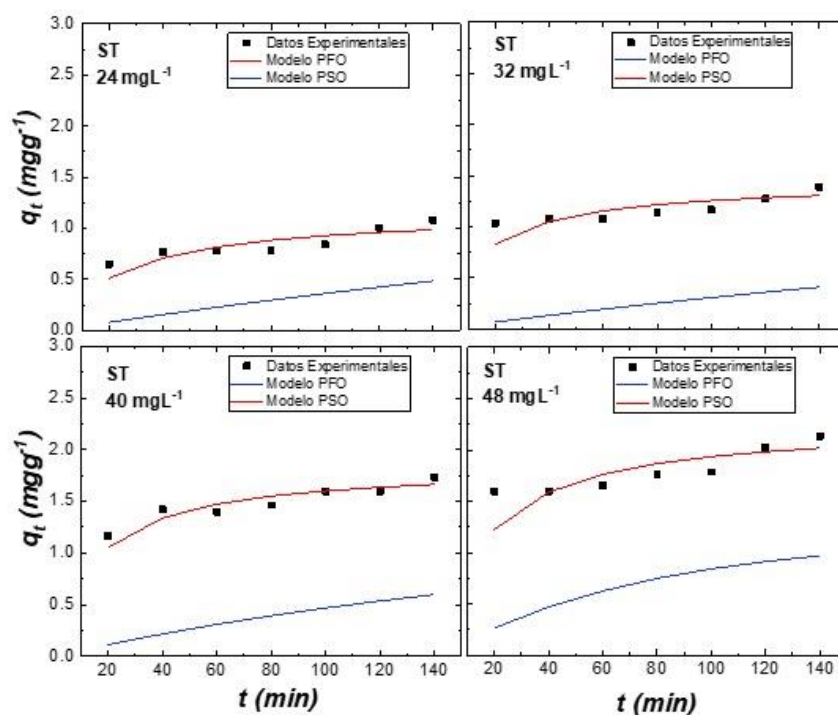


Figura 4. Curvas experimentales y curvas teóricas obtenidas a partir de los parámetros de ajuste de los modelos cinéticos PFO y PSO para la muestra T-0.5.

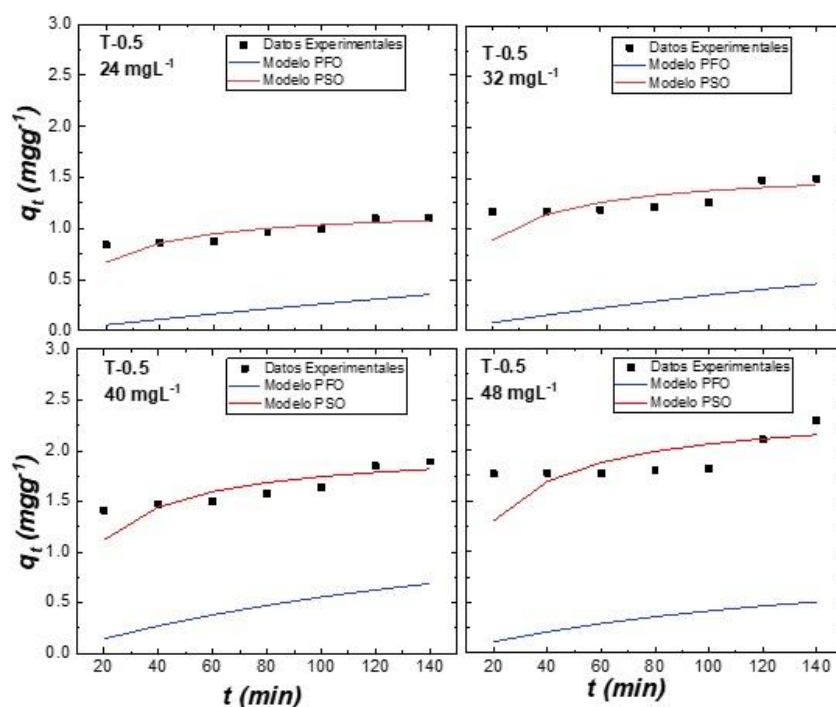
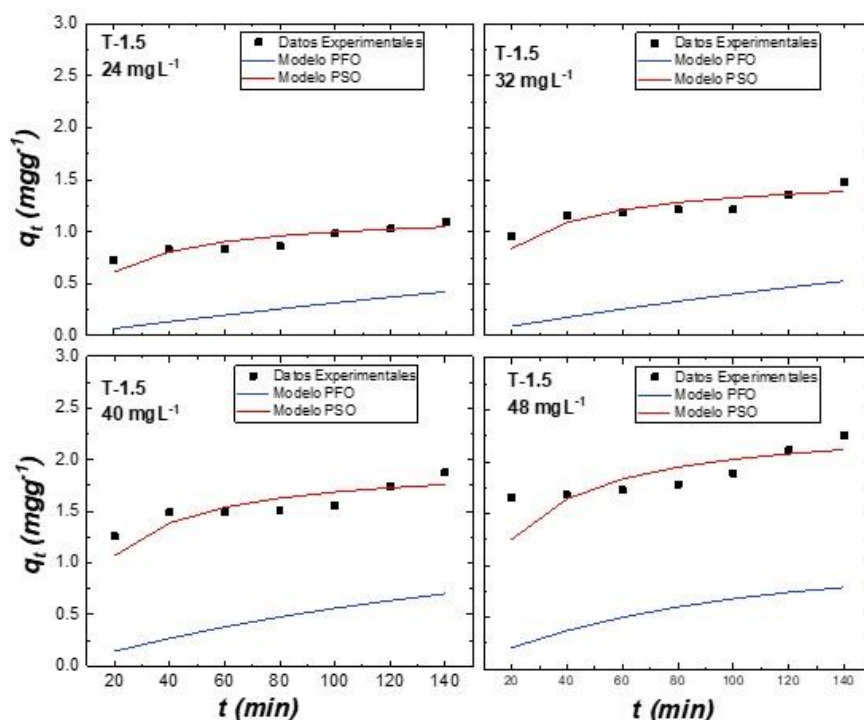


Figura 5. Curvas experimentales y curvas teóricas obtenidas a partir de los parámetros de ajuste de los modelos cinéticos PFO y PSO para la muestra T-1.5.



A partir de los resultados obtenidos pudimos constatar que el tiempo de tratamiento térmico utilizado tuvo marcada influencia en las propiedades adsorbentes de la zeolita natural. Sin embargo, los valores de capacidad de adsorción reportados fueron relativamente bajos para el rango de concentración inicial empleada. De igual manera, se identificó que tan solo 30 *min* constituyó el tiempo óptimo de tratamiento para mejorar las propiedades adsorbentes, logrando eliminar impurezas y mejorando la accesibilidad a los poros sin comprometer la microestructura de las muestras.

Desde los análisis cinéticos se concluyó que el proceso de adsorción se ajustó adecuadamente al modelo cinético PSO, sugiriendo que el mecanismo predominante son las interacciones químicas entre el adsorbato y el adsorbente. Por otro lado, con el tratamiento térmico no solo se modificó la capacidad de adsorción, sino también la rapidez del proceso y el tiempo para alcanzar el equilibrio.

De forma general, nuestros resultados permitieron establecer condiciones óptimas de activación térmica para mejorar el desempeño de la zeolita natural como adsorbente para la remoción de RhB en agua.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Breck, D. W. (1974). *Zeolite molecular sieves: Structure, chemistry, and use*. Wiley-Interscience.
- Chu, K. H., Bollinger, J.-C., & Kierczak, J. (2025). Pseudo-first-order kinetics in environmental adsorption: Why are there two distinct equations? *Environmental Surfaces and Interfaces*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.esi.2025.07.001>
- Elbanna, E. S., Farghali, A. A., Khedr, M. H., & Taha, M. (2024). Nano clinoptilolite zeolite as a sustainable adsorbent for dyes removal: Adsorption and computational mechanistic studies. *Journal of Molecular Liquids*, 409, 125538. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.125538>
- Forgacs, E., Cserhádi, T., & Oros, G. (2004). Removal of synthetic dyes from wastewaters: A review. *Environment International*, 30(7), 953–971.
- Gualtieri, A. F., & Passaglia, E. (2020). Effects of thermal treatment on natural clinoptilolite-rich zeolite behavior. *Molecules*, 25(11), 2570. <https://doi.org/10.3390/molecules25112570>
- Kuśmierk, K., Fronczyk, J., & Świątkowski, A. (2023). Adsorptive removal of rhodamine B dye from aqueous solutions using mineral materials as low-cost adsorbents. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234, 531. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06511-5>
- Nyankson, E., Adjasoo, J., Efavi, J. K., Yaya, A., Manu, G., Kingsford, A., & Abrokwhah, R. Y. (2020). Synthesis and kinetic adsorption characteristics of zeolite/CeO₂ nanocomposite. *Scientific African*, 7, e00257. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00257>
- Ortiz-Iniesta, M. J., Heeres, H. J., & Melian-Cabrera, I. (2013). Direct activation of microcrystalline zeolites. *Microporous and Mesoporous Materials*, 171, 208–214. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2013.01.006>
- Pedebos, M. E. S., Druzian, D. M., Oviedo, L. R., Ruiz, Y. P. M., Galembeck, A., Pavoski, G., Espinosa, D. C. R., & da Silva, W. L. (2024). Removal of rhodamine B dye by adsorption onto an eco-friendly zeolite and machine learning modeling. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 449, 115404. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2023.115404>
- Pompeu, L. D., Druzian, D. M., Oviedo, L. R., Viana, A. R., Mortari, S. R., Pavoski, G., Espinosa, D. C. R., Vizzotto, B. S., Fernandes, L. S., & da Silva, W. L. (2023). Adsorption of rhodamine B dye onto novel biochar: Isotherm, kinetic, thermodynamic study and antibiofilm activity.



Inorganic Chemistry Communications, 158(Part 1), 111509.

<https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111509>

Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R., & Nigam, P. (2001). Remediation of dyes in textile effluent:

A critical review. *Bioresource Technology*, 77(3), 247–255.

Wang, J., & Guo, X. (2020). Adsorption kinetic models: Physical meanings, applications, and solving

methods. *Journal of Hazardous Materials*, 390, 122156.

