

DOI: <https://doi.org/10.24275/rtediq.11.020>

Tratamiento sonoquímico de baja frecuencia para la degradación del colorante reactivo negro 5 y su impacto en la fitotoxicidad


Gallardo Sánchez Sara Elizabeth¹, Pérez Santiago Juan Luis¹, Martínez Delgadillo Sergio Alejandro³, Pérez Loredó María Guadalupe^{1,2}, Montes García María Monserrat¹, Yáñez Varela Juan Antonio^{1*}

¹Unidad de Estudios Superiores Tultitlán, Universidad Mexiquense del Bicentenario, San Antonio s/n, Col. Villa Esmeralda. Tultitlán, Estado de México, C.P. 54910. México.

²Universidad Tecnológica Fidel Velázquez, División Académica de Tecnología Ambiental, Av. Emiliano Zapata S/N, El Trafico, Nicolás Romero, Estado de México, C.P.54400. México.

³Universidad Autónoma Metropolitana, Departamento de Ciencias Básicas. Av. San Pablo No. 420, Azcapotzalco, Ciudad de México, C.P. 02128. México.

*Autor para correspondencia: juan.varela@umb.mx

ORCID : 0000-0002-6478-8090

Recibido:

25/abril/2025

Aceptado:

10/diciembre/2025

Palabras clave:

Colorante Azoico,
fitotoxicidad,
ultrasonido

Keywords:

Azo Dye,
phytotoxicity,
ultrasound

RESUMEN

Este estudio evaluó la degradación sonoquímica del colorante Reactivo Negro 5 (RB5) en soluciones acuosas mediante ultrasonido de baja frecuencia (42 kHz, 100 W), a distintas potencias por unidad de volumen (P/V) y pH. Se analizaron concentraciones iniciales de RB5 de 1 a 24 mg·L⁻¹, con P/V de 500 a 1000 mW·mL⁻¹ y pH de 2.0 y 8.0. Los resultados muestran que a 1000 mW·mL⁻¹ y pH 2.0, la degradación fue hasta un 45% mayor que a 500 mW·mL⁻¹, con constantes cinéticas de pseudo-primer orden hasta un 40% mayores. Bioensayos con *Hordeum vulgare* y *Brachypodium* sp. revelaron que concentraciones de RB5 ≥ 5 mg·L⁻¹ reducen la germinación en más del 40%, siendo *Brachypodium* sp. más sensible. La sonólisis de baja frecuencia se presenta como una estrategia eficaz para disminuir la fitotoxicidad de los efluentes textiles, mostrando un gran potencial para aplicaciones sostenibles.

ABSTRACT

This study investigated the sono-chemical degradation of Reactive Black 5 (RB5) dye in aqueous solutions using low-frequency ultrasound (42 kHz, 100 W), optimizing power per unit volume (P/V) and pH. Initial RB5 concentrations ranged from 1 to 24 mg·L⁻¹, with P/V of 500 to 1000 mW·mL⁻¹ and pH of 2.0 and 8.0. Results showed that at 1000 mW·mL⁻¹ and pH 2.0, degradation was up to 45% higher than at 500 mW·mL⁻¹, with pseudo-first-order kinetic constants increased by up to 40%. Phytotoxicity assays with *Hordeum vulgare* and *Brachypodium* sp. revealed that RB5 concentrations ≥ 5 mg·L⁻¹ reduced germination by over 40%, with *Brachypodium* sp. being more sensitive. Low-frequency sonolysis offers an efficient strategy to mitigate textile effluent toxicity, with potential for sustainable applications.

Introducción

La producción de pigmentos para industrias como la textil, farmacéutica y alimentaria es esencial para mejorar la apariencia y el atractivo comercial de los productos. Sin embargo, la creciente demanda de colorantes, especialmente los azoicos, ha generado un impacto ambiental significativo. Anualmente, se producen aproximadamente 8×10^5 toneladas de colorantes a nivel mundial (Slama et al., 2021), pero los procesos de pigmentación suelen ser ineficientes, generando efluentes acuosos con altas concentraciones de estos compuestos. La presencia de colorantes azoicos en cuerpos de agua altera los procesos fotosintéticos, incrementa la demanda química (DQO) y bioquímica de oxígeno (DBO), y afecta parámetros como el color, pH y oxígeno disuelto, con graves consecuencias para los ecosistemas acuáticos (Al-Tohamy et al., 2022).

La industria textil, responsable del 20% de la contaminación hídrica global (Periyasamy, 2024), es una de las principales fuentes de estos efluentes, con niveles de DQO que oscilan entre 100 y 5600 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Rafaqat et al., 2022), superando considerablemente el límite máximo permisible de 180 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ indicado por la NOM-001-SEMARNAT-2021. Además de superar este parámetro, los efluentes textiles contienen compuestos orgánicos, de entre los que destacan los colorantes azoicos, tal como el Reactivo Negro 5 (RB5), agente tóxico y bio-persistente. Su exposición prolongada puede causar afecciones respiratorias y se ha asociado con un potencial carcinogénico (De Luca & Nagy, 2020). Además, la estructura molecular del RB5, mostrada en la figura 1, con grupos funcionales reactivos, tales como los azoicos $-\text{N}=\text{N}-$, dificulta su degradación, favoreciendo su acumulación en sedimentos y cadenas alimenticias, lo que provoca eutrofización y pérdida de biodiversidad.

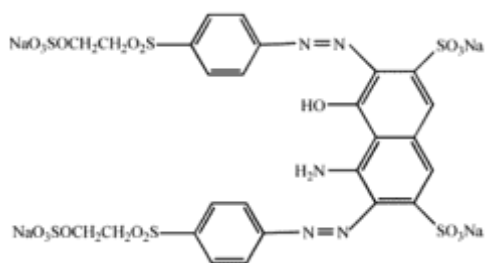
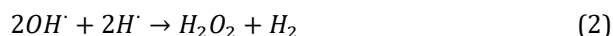
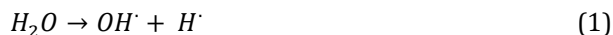


Figura 1. Molécula del Reactivo Negro 5. Tomado de Ben et al., 2023.

Diversas tecnologías han sido propuestas para mitigar la contaminación por colorantes azoicos en efluentes acuosos (Quintero & Cardona, 2010).

Los métodos biológicos, como el uso de hongos *Penicillium* sp. y *Pycnoporus* sp., lograron decoloraciones del 89% y 71%, respectivamente, en 15 días, a partir de soluciones de $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Salas et al., 2012). Por su parte, los métodos fotocatalíticos, empleando catalizadores de TiO_2 , alcanzaron una decoloración del 100% en 120 minutos con soluciones de $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Marcos et al., 2022). Sin embargo, estos enfoques presentan limitaciones, como la necesidad de microorganismos o catalizadores externos, largos tiempos de operación y la posible generación de subproductos tóxicos. En contraste, la sonólisis ofrece una alternativa eficiente que minimiza el uso de aditivos y reduce el impacto ambiental, como se explora en este estudio.

Por lo anterior, el uso de ultrasonido ha emergido como una alternativa prometedora para la degradación de colorantes azoicos debido a la cavitación acústica, que genera radicales hidroxilo ($\text{OH}\cdot$) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) capaces de oxidar compuestos orgánicos complejos (Vajnhandl & Le Marechal, 2007), según las reacciones:



A diferencia de los métodos biológicos y fotocatalíticos, la sonólisis no requiere reactivos externos, minimizando la generación de subproductos contaminantes. En los procesos sonoquímicos, la frecuencia y la potencia son variables clave (Vajnhandl & Le Marechal, 2007). La frecuencia determina el tipo de cavitación: a bajas frecuencias (como 42 kHz), se genera cavitación transitoria con colapsos violentos que producen radicales hidroxilo ($\text{OH}\cdot$), mientras que, a altas frecuencias, la cavitación estable es menos efectiva para la degradación. La potencia, por su parte, controla la intensidad de la cavitación, pero un exceso puede provocar saturación de burbujas, reduciendo la eficiencia (Ashokkumar et al., 2016). Aunque se asume que frecuencias y potencias altas mejoran el desempeño, los costos operativos son elevados, y las bajas frecuencias han mostrado constantes cinéticas de pseudo-primer orden limitadas ($1.1 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$; Sathishkumar et al., 2014). Este estudio optimiza la sonólisis de baja frecuencia para degradar el colorante Reactivo Negro 5, ajustando la potencia por unidad de volumen y el pH.

En este contexto, el presente estudio propone una estrategia innovadora para la decoloración de soluciones acuosas de RB5, combinando ultrasonido de baja potencia (100 W) y frecuencia (42 kHz) con la optimización del pH para maximizar la generación del radical hidroxilo y la ruptura de enlaces azo.

A través de estudios cinéticos y la evaluación de diferentes concentraciones iniciales, se determinará la velocidad de reacción. Además, se analizará la toxicidad de las soluciones tratadas mediante bioensayos con *Hordeum vulgare* y *Brachypodium* sp., evaluando la viabilidad de esta tecnología en términos de sostenibilidad y eficiencia para contribuir a la gestión de efluentes textiles.

Metodología

Materiales y reactivos

Para los ensayos de sonólisis y fitotoxicidad, se utilizó el colorante Reactivo Negro 5 ($\geq 50\%$ de pureza, Sigma-Aldrich). Las soluciones de RB5 y los bioensayos se prepararon con agua destilada (conductividad $\leq 1.5 \mu\text{S}/\text{cm}$). Las soluciones estándar para generar la curva de calibración del RB5 se prepararon con concentraciones en el rango de $0.3 - 10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, con las que se construyó la correlación mostrada en la figura 2.

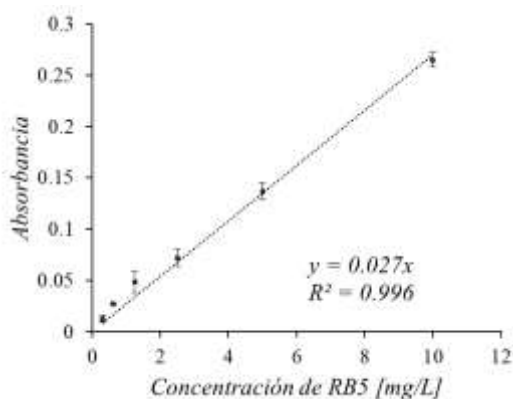


Figura 2. Curva de calibración del Reactivo Negro 5 medida a $\lambda = 600 \text{ nm}$.

El ajuste del pH se realizó con soluciones de H_2SO_4 (3 M) y NaOH (5 M) para minimizar el volumen añadido al volumen de reacción. El pH se midió con un medidor Consort R735, calibrado con soluciones buffer estándar (pH 4.0, 7.0 y 10.0). Las semillas utilizadas de pasto (*Brachypodium* sp.) y cebada (*Hordeum vulgare*) son comerciales sin ningún pretratamiento previo.

Sonólisis de soluciones de Reactivo Negro 5

Las soluciones de Reactivo Negro 5 (RB5) se sometieron a radiación ultrasónica utilizando un baño ultrasónico de inmersión (Cole-Parmer, 42 kHz, 100 W). La reacción se llevó a cabo en un matraz aforado de 1 L, colocado en contacto directo con la superficie vibratoria de los transductores piezoeléctricos, como se ilustra en la figura 3.

Se emplearon volúmenes de reacción de 100 a 200 mL para variar la potencia por unidad de volumen. La temperatura se mantuvo constante a $25 \text{ }^\circ\text{C}$, utilizando el líquido del baño ultrasónico como medio refrigerante. Las soluciones problema de RB5 se prepararon a concentraciones iniciales en el rango de $2 \text{ a } 24 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, para posteriormente ajustar el pH a 2.0 y 7.0 unidades, según los requerimientos del ensayo. La degradación se monitoreó tomando alícuotas de 3 mL cada 10 minutos durante 60 minutos. La absorbancia de las muestras se midió a 600 nm , correspondiente al pico característico del cromóforo del RB5, utilizando un espectrofotómetro UV-Vis (METASH).



Figura 3. Fotografía del sistema de reacción para la decoloración de soluciones de RB5 mediante ultrasonido.

Evaluación de fitotoxicidad

La fitotoxicidad de las soluciones de RB5 (tratadas mediante sonólisis y sin tratar) se evaluó mediante un bioensayo de germinación basado en el estándar OECD No. 208 modificado, utilizando semillas de *Brachypodium* sp. y *Hordeum vulgare*. Se prepararon soluciones de RB5 a concentraciones de 1, 1.5, 2.5, 5 y $24 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

Las semillas ($n = 10$ por tratamiento, con dos réplicas) se incubaron durante 96 horas a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ en oscuridad, sobre algodón humedecido con 5 mL de cada solución. Se incluyó un control negativo (agua destilada) para verificar la viabilidad de las semillas. La germinación se definió como la emergencia de una radícula de al menos 2 mm. El porcentaje de germinación ($\% G$) se calculó para cada tratamiento mediante la ecuación 3:

$$\% G = 1 - \frac{n_{\text{semillas}} - n_{\text{semillas germinadas}}}{n_{\text{semillas}}} \times 100 \quad (3)$$

Resultados y discusión

Efecto de la potencia por unidad de volumen

La figura 4 muestra la variación de la concentración de Reactivo Negro 5 (RB5) en función del tiempo, utilizando una concentración inicial de $24 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ y un pH de 7.0 unidades, para diferentes potencias por unidad de volumen (P/V: 500, 666 y $1000 \text{ mW}\cdot\text{mL}^{-1}$).

Los resultados, obtenidos como promedio de tres réplicas, indican que la P/V de $1000 \text{ mW}\cdot\text{mL}^{-1}$ logra una mayor degradación del colorante en comparación con las P/V de 500 y $666 \text{ mW}\cdot\text{mL}^{-1}$. A los 40 minutos, las concentraciones residuales para P/V de 500 y $666 \text{ mW}\cdot\text{mL}^{-1}$ difieren en solo $0.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, mostrando tendencias similares, mientras que la P/V de $1000 \text{ mW}\cdot\text{mL}^{-1}$ reduce significativamente la concentración de RB5, pues alcanza una remoción de hasta el 50%. Este comportamiento sugiere que una mayor P/V incrementa la eficiencia de la cavitación acústica, favoreciendo la generación de radicales hidroxilo ($\text{OH}\cdot$) responsables de la degradación del colorante.

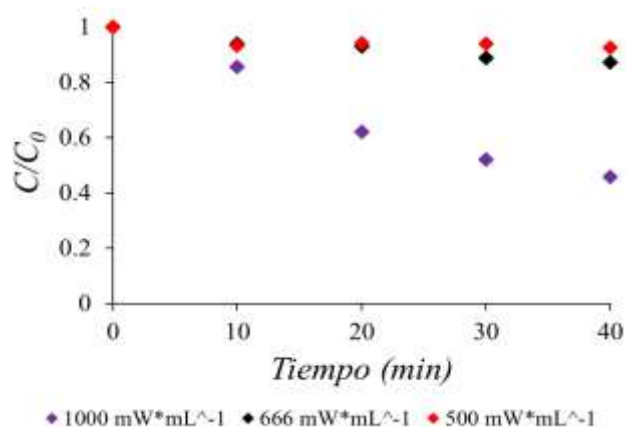


Figura 4. Variación de la concentración de RB5 en función del tiempo para diferentes potencias por unidad de volumen (P/V: 500, 666 y $1000 \text{ mW}\cdot\text{mL}^{-1}$, correspondientes a 100, 150 y 200 mL) a una concentración inicial de $24 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

Estos resultados destacan la importancia de optimizar la P/V en procesos sonoquímicos. La similitud entre las P/V de 500 y $666 \text{ mW}\cdot\text{mL}^{-1}$ indica un umbral a partir del cual el incremento en la potencia no mejora proporcionalmente la degradación, posiblemente debido a la saturación de eventos de cavitación. En contraste, la P/V de $1000 \text{ mW}\cdot\text{mL}^{-1}$ incrementa la transferencia de energía, mejorando la ruptura de los enlaces azo del RB5. Estos hallazgos respaldan el diseño de reactores continuos con alta P/V para reducir costos operativos y mejorar la sostenibilidad en la decoloración de efluentes textiles.

Evaluación de la velocidad de decoloración

La degradación del Reactivo Negro 5 (RB5) mediante sonólisis se ajustó a un modelo cinético de *pseudo-primer* orden, descrito por la ecuación 4:

$$-\frac{d[\text{RB5}]}{dt} = k'[\text{RB5}][\text{OH}\cdot] \quad (4)$$

donde $-d[\text{RB5}]/dt$ es la velocidad de degradación ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{ min}^{-1}$), $[\text{RB5}]$ y $[\text{OH}\cdot]$ representan las concentraciones del colorante ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), y radicales hidroxilo, respectivamente, y k' es la constante cinética de pseudo-primer orden (min^{-1}). Asumiendo que la concentración de radicales hidroxilo permanece constante, la velocidad depende únicamente de $[\text{RB5}]$. Los datos experimentales, obtenidos a concentraciones iniciales de 1, 2.5, 5, 13 y $24 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, con una potencia por unidad de volumen de $1000 \text{ mW}\cdot\text{mL}^{-1}$, se ajustaron a la forma linealizada del modelo ($\ln([\text{RB5}]_0/[\text{RB5}])$ vs. tiempo), como se muestra en la figura 5.

Las pruebas se realizaron a un pH ajustado de 2.0 y sin ajuste ($\text{pH} \approx 8.0$). El ajuste al modelo linealizado de los datos experimentales es lo suficientemente bueno, ya que los datos son representados en al menos un 95% según el coeficiente de correlación R^2 , que se reporta para cada uno de los casos en la figura 5.

El análisis de las constantes cinéticas de pseudo-primer orden (k') obtenidas del modelo cinético revela un aumento en k' al disminuir la concentración inicial de RB5, con valores que oscilan entre 0.0055 y 0.028 min^{-1} cuando el pH natural (~ 8.0) (Figura 5B). En contraste, a pH 2.0, se observó que la constante cinética (k') alcanzaba un valor de 0.029 min^{-1} específicamente a una concentración inicial de $13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Este hallazgo sugiere que, bajo condiciones ácidas (pH 2.0), la concentración inicial de $13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ representa un punto donde la eficiencia de la degradación sonolítica es particularmente alta, lo cual podría estar relacionado con las características del colorante en un ambiente altamente protonado o con una mayor disponibilidad de especies oxidantes a este pH. Al comparar nuestros resultados con los de Ghows y Entezari (2013), quienes reportaron valores de k' de $0.011 \pm 0.004 \text{ min}^{-1}$ para ultrasonido solo (20 kHz, 41 W) y $0.113 \pm 0.002 \text{ min}^{-1}$ para ultrasonido con nano-catalizadores, se observa que nuestros valores de k' obtenidos a baja frecuencia (42 kHz) son competitivos en comparación con la sonólisis sola reportada por ellos, y presentan eficiencias significativas sin requerir aditivos. Estos resultados indican la importancia de optimizar el pH y la densidad de potencia (P/V) en los procesos de sonólisis para alcanzar eficiencias comparables a o incluso rivalizar con procesos sinérgicos que involucran catalizadores

El efecto benéfico del pH ácido se puede atribuir a la mayor disponibilidad de radicales hidroxilo ($\text{OH}\cdot$) en medios ácidos, que favorecen la ruptura de los enlaces azoicos del RB5. Este efecto se atribuye a la protonación de los grupos funcionales del RB5 ($-\text{SO}_3\text{H}$, $-\text{NH}_3^+$, $\text{Ar}-\text{OH}$), que aumenta su reactividad frente a los radicales $\text{OH}\cdot$. Estos hallazgos concuerdan con Vajnhandl y Le Marechal (2007), quienes reportaron una degradación más rápida del RB5 a pH ácido usando ultrasonido a 847 kHz y 100 W, aunque el presente estudio logra resultados comparables a una frecuencia menor (42 kHz). Estos hallazgos colocan al control del pH como una estrategia clave para optimizar reactores sonoquímicos, reduciendo el tiempo de irradiación y el consumo energético en la degradación de colorantes azoicos.

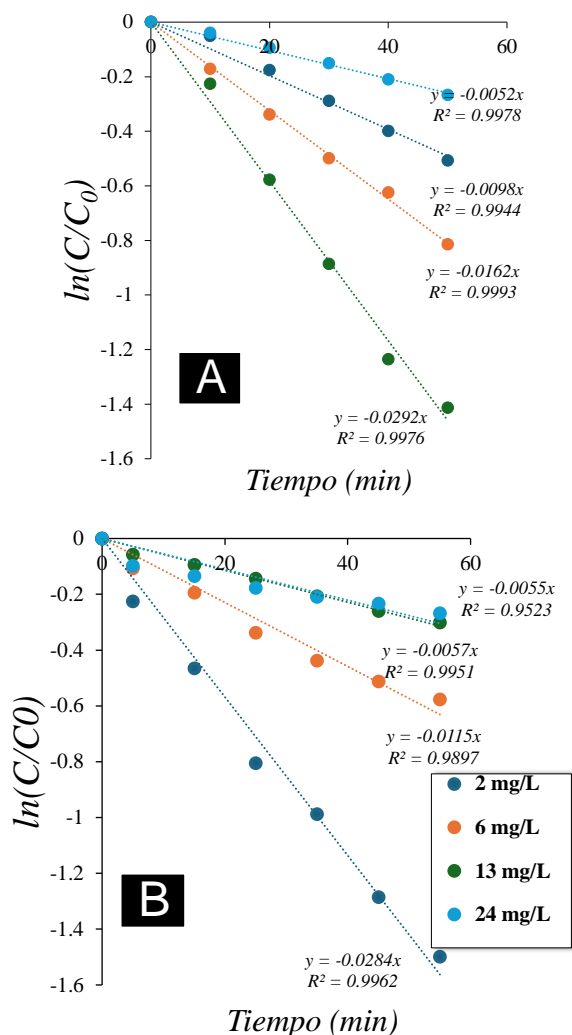


Figura 5. Ajuste de los datos experimentales al modelo cinético de pseudo-primero orden: **A.** pH ajustado a 2.0; **B.** pH sin ajustar (≈ 8.0). Los gráficos muestran $\ln([\text{RB5}]_0/[\text{RB5}])$ en función del tiempo para diferentes concentraciones iniciales, con los coeficientes de correlación (R^2) y las constantes cinéticas (k').

Bioensayos de fitotoxicidad de RB5 mediante germinación

Para evaluar el impacto ambiental del colorante Reactivo Negro 5 (RB5) en ecosistemas acuáticos, se realizaron bioensayos de fitotoxicidad midiendo la germinación de *Hordeum vulgare* (cebada) y *Brachypodium* sp. (pasto), especies modelo comunes próximas a cuerpos de agua superficiales. Estos ensayos determinaron si las concentraciones de RB5 sin tratar representan un riesgo para la vegetación, complementando la evaluación de la sonólisis como tratamiento sostenible.

Tabla 1. Porcentaje de germinación de *Hordeum vulgare* expuesta a diferentes concentraciones de RB5 durante 96 horas, comparado con un control.







Concentración de RB5 (mg/L)	Figura	% Germinación
Control		80
1		50
1.5		60
2.5		50
5		30
24		0

La tabla 1 presenta los porcentajes de germinación de *Hordeum vulgare* expuesta a soluciones sin tratar de RB5 a concentraciones de 1, 1.5, 2.5, 5 y 24 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, con tres réplicas por tratamiento. El control (agua destilada) mostró un 80% de germinación, reflejando la viabilidad de las semillas bajo las condiciones establecidas.

Las concentraciones de 1 y 1.5 mg·L⁻¹ redujeron la germinación a un promedio de 60%, mientras que a 5 mg·L⁻¹ y superiores, la germinación disminuyó notablemente hasta un 40% (50% del control).

La tabla 2 muestra los resultados para *Brachypodium sp.* bajo las mismas condiciones. El control alcanzó un 80% de germinación, pero las concentraciones de 1 y 1.5 mg·L⁻¹ redujeron la germinación a un promedio de 55%. A 5 mg·L⁻¹, la germinación cayó marcadamente a 30%, y a 24 mg·L⁻¹ se observó germinación nula, indicando una toxicidad severa.

Tabla 2. Porcentaje de germinación de *Brachypodium sp.* expuesta a diferentes concentraciones de RB5 (sin tratar) durante 96 horas, comparado con un control.

Concentración de RB5 (mg/L)	Figura	% Germinación
Control		80
1		60
1.5		60
2.5		50
5		40
24		40

Los resultados revelan que concentraciones de RB5 superiores a 5 mg·L⁻¹ inhiben la germinación en más del 40% en ambas especies, con *Brachypodium sp.* mostrando mayor sensibilidad.

A 24 mg·L⁻¹, la germinación de *Brachypodium sp.* fue nula, mientras que *Hordeum vulgare* mantuvo un 40%, sugiriendo diferencias en la tolerancia fisiológica entre especies. Estos hallazgos indican que concentraciones de RB5 \geq 5 mg·L⁻¹, comunes en efluentes textiles no tratados, representan un riesgo significativo para la germinación de plantas, pudiendo comprometer la biodiversidad en ecosistemas acuáticos. Comparado con estudios previos, como Al-Tohamy et al. (2022), que reportan toxicidad de colorantes azoicos en cultivos, estos resultados subrayan la necesidad de tratar efluentes para reducir la fitotoxicidad.

La evaluación de soluciones tratadas por sonólisis podría confirmar si este método mitiga los efectos adversos del RB5.

Conclusiones

El tratamiento sonoquímico a baja frecuencia (42 kHz) y potencia (100 W) demostró ser efectivo para degradar el colorante Reactivo Negro 5 (RB5) en soluciones acuosas. La potencia por unidad de volumen (P/V) resultó un parámetro crítico, logrando a 1000 mW·mL⁻¹ una reducción de hasta el 45% en la concentración de RB5 (inicial: 24 mg·L⁻¹) comparado con 500 y 666 mW·mL⁻¹.

Un pH ácido (2.0) incrementó notablemente la constante cinética de pseudo-primer orden hasta en un 40%, especialmente a concentraciones altas, debido a la mayor reactividad de los grupos funcionales del RB5 en presencia de radicales hidroxilo (OH·).

Los bioensayos de fitotoxicidad con *Hordeum vulgare* y *Brachypodium sp.* revelaron que concentraciones de RB5 \geq 5 mg·L⁻¹ (sin tratar) reducen la germinación en más del 40%, con *Brachypodium sp.* mostrando mayor sensibilidad al inhibir su germinación completamente al exponerse a concentraciones de 24 mg·L⁻¹.

Estos resultados destacan el potencial de la sonólisis de baja frecuencia para reducir la fitotoxicidad de efluentes textiles a niveles seguros para los ecosistemas acuáticos. La optimización del pH y la P/V mejora la eficiencia energética, haciendo viable su aplicación en reactores industriales. Combinar el ultrasonido con otras tecnologías, como fotocatalisis o métodos biológicos, podría aumentar aún más la remoción de colorantes azoicos, superando las eficiencias reportadas para la sonólisis individual.

Futuras investigaciones deberían evaluar la toxicidad de soluciones tratadas y escalar el proceso para aplicaciones prácticas, contribuyendo a la gestión sostenible de aguas residuales.

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, por facilitar el acceso al Laboratorio de Procesos en Sistemas Acuáticos, cuya infraestructura fue esencial para realizar los ensayos sonográficos. Asimismo, se reconoce la valiosa contribución de los egresados de Ingeniería Química de la Universidad Mexiquense del Bicentenario, Daniela I. Soto-Román, Hilario S. Tapia-Estrada y Jocelyn I. Sánchez-Zamudio, quienes apoyaron en la ejecución de las pruebas experimentales.

Referencias

- Al-Tohamy, R., Ali, S. S., Li, F., Okasha, K. M., Mahmoud, Y. A.-G., Elsamahy, T., Jiao, H., Fu, Y., & Sun, J. (2022). A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 231, 113160. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113160>
- Ashokkumar, M., Cavalieri, F., Chemat, F., Okitsu, K., Sambandam, A., Yasui, K., & Zisu, B. (Eds.). (2016). *Handbook of ultrasonics and sonochemistry*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-287-278-4>
- Ben Mbarek, W., Daza, J., Escoda, L., Fiol, N., Pineda, E., Khitouni, M., & Suñol, J. J. (2023). Removal of reactive black 5 azo dye from aqueous solutions by a combination of reduction and natural adsorbents processes. *Metals*, 13(3), 474. <https://doi.org/10.3390/met13030474>
- De Luca, P., & Nagy, J. B. (2020). Treatment of water contaminated with Reactive Black 5 dye by carbon nanotubes. *Materials*, 13(23), 5508. <https://doi.org/10.3390/ma13235508>
- Fetyan, N. A. H., & Salem Attia, T. M. (2020). Water purification using ultrasound waves: Application and challenges. *Arab Journal of Basic and Applied Sciences*, 27(1), 194–207. <https://doi.org/10.1080/25765299.2020.1762294>
- Ghows, N., & Entezari, M. H. (2013). Kinetic investigation on sono-degradation of Reactive Black 5 with core-shell nanocrystal. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20(1), 386–394. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.06.013>
- Marcos, M. L., Laura, M. C., Ricardo, L. M., & Elizabeth, R. G. (2022). Estudio de la degradación fotocatalítica del colorante Reactivo Negro 5 con el sistema titania industrial-alcóxido. *Revista de Química Aplicada*, 25(2), 300–310. <https://zaloamati.azc.uam.mx/server/api/core/bitstreams/b7d92ab6-4721-411b-bb9d-c4de4dfbcef4/content>
- Periyasamy, A. P. (2024). Recent advances in the remediation of textile-dye-containing wastewater: Prioritizing human health and sustainable wastewater treatment. *Sustainability*, 16(2), 495. <https://doi.org/10.3390/su16020495>
- Quintero, L., & Cardona, S. (2010). Tecnologías para la decoloración de tintes índigo e índigo carmín. *Dyna*, 77(162), 371–386. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49615023017>
- Rafaqat, S., Ali, N., Torres, C., & Rittmann, B. (2022). Recent progress in treatment of dyes wastewater using microbial-electro-Fenton technology. *RSC Advances*, 12(27), 17104–17137. <https://doi.org/10.1039/d2ra01831d>
- Salas Veizaga, D. M., Morales Belpaire, I., & Terrazas Siles, E. (2012). Capacidad decolorativa de *Corioloopsis polyzona*, *Pycnoporus* sp. y *Penicillium* sp. sobre Reactive Black 5 a diferentes condiciones de cultivo. *Biofarbo*, 20(1), 41–50. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=123456789>
- Sathishkumar, P., Mangalaraja, R. V., Rozas, O., Mansilla, H. D., Gracia-Pinilla, M. A., & Anandan, S. (2014). Low frequency ultrasound (42 kHz) assisted degradation of Acid Blue 113 in the presence of visible light driven rare earth nanoclusters loaded TiO₂ nanophotocatalysts. *Ultrasonics Sonochemistry*, 21(5), 1675–1681. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.03.004>
- Slama, H. B., Chenari Bouket, A., Pourhassan, Z., Alenezi, F. N., Silini, A., Cherif-Silini, H., Oszako, T., Luptakova, L., Golińska, P., & Belbahri, L. (2021). Diversity of synthetic dyes from textile industries, discharge impacts and treatment methods. *Applied Sciences*, 11(14), 6255. <https://doi.org/10.3390/app11146255>
- Vajnhandl, S., & Le Marechal, A. M. (2007). Case study of the sonochemical decolouration of textile azo dye Reactive Black 5. *Journal of Hazardous Materials*, 141(1), 329–335. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.07.005>