

Uso de hongos inmovilizados en materiales carbonosos para la remoción de colorantes en aguas residuales

Use of fungi immobilized in carbon-based materials for the removal of dyes from wastewater

Melissa Escalante-García¹, Lilian Eloisa Rodríguez-Márquez¹, Edgar Vázquez-Núñez^{1*}

¹ Grupo de investigación sobre Aplicaciones Nano y Biotecnológicas para la Sostenibilidad (NanoBioTS), Laboratorio de Sostenibilidad Ambiental y Energética (LaSAE), División de Ciencias e Ingenierías, Campus León, Universidad de Guanajuato. Lomas del Bosque 103, Lomas del Campestre, León, Guanajuato.

Resumen

La presencia de colorantes sintéticos en aguas residuales representa una problemática ambiental relevante debido a su toxicidad, estabilidad química y baja biodegradabilidad. En este estudio, se evaluó el potencial del hongo *Pleurotus djamor* inmovilizado sobre materiales carbonosos para la remoción del colorante Rojo Congo (RC) en medio líquido. Se elaboraron sistemas biohíbridos utilizando biocarbón (BC) y biocarbón magnetizado (BC-Fe₃O₄) obtenidos a partir de residuos lignocelulósicos de *Ricinus communis*, los cuales sirvieron como soporte para pellets de micelio.

La metodología incluyó ensayos de crecimiento de *Pleurotus djamor* en presencia de RC, preparación de pellets miceliares, síntesis de materiales adsorbentes y pruebas de remoción en medio líquido con distintas concentraciones de adsorbente (0.5 g y 1.0 g). Se monitoreó la concentración residual de RC mediante espectrofotometría UV-Vis y se calcularon tanto la eficiencia de remoción como la capacidad de adsorción específica.

Los resultados mostraron que los sistemas individuales con biocarbón presentaron una mayor eficiencia en la remoción de RC en comparación con los sistemas biohíbridos. En particular, el biocarbón magnetizado (Pellet-BC-Fe₃O₄) destacó por su desempeño superior, atribuible a su alta porosidad y amplia superficie específica. Además, la incorporación de magnetita facilita la recuperación del material mediante separación magnética, lo que representa una ventaja operativa significativa.

Palabras clave: Adsorción; Biocarbón; Micelio; Pellet; *Pleurotus djamor*; Rojo Congo.

Introducción

La presencia de colorantes sintéticos en aguas residuales provenientes de las industrias textil, papelera, cosmética y alimentaria representa una problemática ambiental de gran relevancia, debido a su alta estabilidad química, toxicidad y baja biodegradabilidad (Lin *et al.*, 2023). Estos compuestos pueden interferir con la penetración de la luz en cuerpos de agua, afectar procesos fotosintéticos y generar productos intermedios potencialmente cancerígenos (Ramamurthy *et al.*, 2024). Por ello, se han desarrollado diversas tecnologías para su remoción, entre las cuales destacan los procesos de adsorción y biodegradación (Oladoye *et al.*, 2024).

En este contexto, los hongos filamentosos han demostrado una notable capacidad para degradar y transformar colorantes, gracias a la producción de enzimas extracelulares como lacasas, peroxidases y manganoso peroxidases (Aragaw *et al.*, 2024). No obstante, la aplicación directa de hongos en sistemas acuosos puede enfrentar limitaciones operativas relacionadas con la separación del biomaterial y su estabilidad estructural. Para superar estas barreras, la inmovilización de hongos sobre soportes sólidos ha surgido como una estrategia prometedora que mejora su reutilización, actividad enzimática y resistencia a condiciones adversas (Ogawa *et al.*, 2024).

Los basidiomicetos han cobrado especial interés por su capacidad para degradar compuestos recalcitrantes mediante un conjunto diverso de enzimas ligninolíticas. Estas enzimas, como las lacasas y peroxidasas, no solo participan en la descomposición de lignina en sistemas naturales, sino que también permiten la transformación de contaminantes orgánicos complejos, como los colorantes azo, antraquinónicos y trifenilmetanos. Su metabolismo secundario versátil y su tolerancia a condiciones ambientales variables los posicionan como agentes clave en la biorremediación de aguas residuales (Sahoo *et al.*, 2025).

Entre los basidiomicetos, *Pleurotus djamor* destaca como una especie con gran potencial biotecnológico debido a su rápido crecimiento, facilidad de cultivo y alta producción de enzimas oxidativas (Kryczyk-Poprawa *et al.*, 2025). Este hongo comestible, además de ser una fuente de alimentos funcionales, ha demostrado una notable eficacia en la decoloración de colorantes mediante procesos de biosorción y biodegradación. Su capacidad para colonizar diversos sustratos lignocelulósicos también facilita su integración en sistemas de tratamiento sustentables mediante inmovilización sobre soportes naturales o sintéticos.

En este contexto, la inmovilización de hongos sobre materiales carbonosos, como el biocarbón y sus derivados magnetizados, ha emergido como una estrategia prometedora para mejorar la eficiencia en la remoción de contaminantes. Estos materiales ofrecen una alta superficie específica, porosidad y estabilidad, permitiendo una interacción sinérgica entre la capacidad adsorbente del soporte y la actividad enzimática del hongo inmovilizado (Najim *et al.*, 2024). Así, se establecen sistemas bio-híbridos capaces de remover colorantes mediante mecanismos físico-químicos y biológicos combinados, con potencial para aplicaciones en tratamientos de aguas residuales a escala real.

Entre los soportes utilizados, los materiales carbonosos y sus derivados modificados ofrecen una plataforma adecuada por su alta superficie específica, porosidad, estabilidad química y afinidad con moléculas orgánicas (Pawłowicz *et al.*, 2024). La combinación sinérgica entre la capacidad adsorbente del material carbonoso y la actividad biocatalítica del hongo inmovilizado permite la remoción eficiente de colorantes mediante mecanismos físicos y biológicos simultáneos.

Este trabajo aborda el potencial del uso de hongos inmovilizados en matrices carbonosas como sistemas híbridos para la remediación de aguas contaminadas con colorantes, particularmente el rojo congo (RC), determinando la capacidad adsorptiva de los materiales compositados, así como revisando las ventajas operativas y perspectivas para su implementación a escala real.

Materialles y Métodos

Manufactura de biocarbón

Para la obtención del biocarbón, se emplearon los residuos lignocelulósicos de la cascarilla de *Ricinus communis* previamente lavados con agua destilada para eliminar impurezas superficiales. Posteriormente, los residuos fueron secados a temperatura ambiente durante 48 horas. La biomasa seca fue triturada y tamizada para obtener una granulometría homogénea (<2 mm).

El proceso de carbonización se realizó mediante pirólisis lenta en una mufla con atmósfera inerte. La temperatura de pirólisis fue de 700 °C, manteniéndose por 1 hora. Al finalizar, el sistema se enfrió naturalmente. El biocarbón resultante fue lavado con agua destilada, filtrado por gravedad empleando papel Whatman® y secado en un horno a 80°C durante 24 h, el material fue almacenado en frascos herméticos hasta su caracterización y posterior uso.

Manufactura del composito biocarbón-magnetita

La síntesis del composito biocarbón-magnetita (BC-Fe₃O₄) se llevó a cabo mediante un método de coprecipitación química in situ (Guel-Nájjar *et al.*, 2023). Primero, se dispersó la biomasa previamente obtenida en agua desionizada (proporción 1:4 p/v), sometiéndola a agitación constante.

A esta suspensión se añadió cloruro férrico hexahidratado (FeCl₃·6H₂O), en una proporción 1:1.34 respecto a la biomasa (p/p). La mezcla fue mantenida en agitación durante 30 minutos, permitiendo el crecimiento y anclaje de las nanopartículas. Finalmente, el material fue sometido a pirólisis en una mufla con atmósfera inerte a 700 °C durante 2 h. El producto obtenido fue separado aplicando un campo magnético, enjuagado con agua destilada y sometido a secado a 80°C durante 24 h. El material fue denominado BC-Fe₃O₄ y conservado en condiciones secas para futuras aplicaciones.

Crecimiento de *P. djamor* en cajas Petri

Se evaluó el crecimiento radial de *Pleurotus djamor* en medio sólido PDA (Papa-Dextrosa-Agar), suplementado con colorante Rojo Congo (RC) a diferentes concentraciones (10, 50, 100 mg/L). Las soluciones madre de los colorantes fueron añadidas sobre el medio de cultivo sólido por vaciado en placas Petri (90 mm de diámetro) y se dejaron en contacto hasta la sequedad del líquido. Para cada tratamiento se realizaron tres repeticiones. Como control, se utilizaron placas con PDA sin colorantes.

Discos de inóculo (1 mm de diámetro) se obtuvieron de cultivos activos de *P. djamor* y se colocaron al centro de cada placa. Las cajas fueron incubadas a 25 ± 2 °C en oscuridad constante. El crecimiento radial del micelio se midió diariamente en dos direcciones perpendiculares, registrando el promedio de ambas lecturas.

El ensayo se mantuvo hasta que las placas control presentaron cobertura completa del medio. La tasa de crecimiento radial (mm/día) se calculó con la fórmula:

$$R = \frac{(D_t - D_0)}{t} \quad (\text{Ec.1})$$

donde:

- D_t : diámetro del micelio al día t
- D_0 : diámetro inicial (1 mm)
- t : número de días transcurridos

Adicionalmente, se determinó el índice de inhibición porcentual del crecimiento micelial con respecto al control mediante la siguiente expresión:

$$\text{Inhibición (\%)} = \left(\frac{R_{\text{control}} - R_{\text{tratamiento}}}{R_{\text{control}}} \right) \quad (\text{Ec.2})$$

donde:

- R_{control} : tasa de crecimiento en medio PDA sin colorante
- $R_{\text{tratamiento}}$: tasa de crecimiento en presencia del colorante

Este análisis permitió cuantificar el efecto inhibitorio del colorante sobre el crecimiento de *P. djamor*, así como identificar posibles concentraciones tolerables o incluso estimulantes para futuras aplicaciones.

Ensamblaje de pellets de micelio de *P. djamor*-biocarbón

Se prepararon cultivos líquidos en matraces Erlenmeyer de 125 mL, utilizando 100 mL de medio de cultivo PDA. Se inocularon matraces con un fragmento de micelio activo de *Pleurotus djamor*, colocado cuidadosamente para que flotara sobre la superficie del medio. Los cultivos fueron incubados a 24 °C durante 5 días, permitiendo el crecimiento inicial del micelio.

Una vez concluida la incubación, se agitó el contenido de los matraces con el fin de desintegrar el micelio y separar las hifas. Posteriormente, se prepararon nuevos cultivos líquidos en matraces con 100 mL de caldo de cultivo fresco, a los cuales se adicionaron 20 mL del micelio previamente licuado (hifas en suspensión). Estos cultivos fueron incubados bajo agitación constante a 140 rpm durante 60 horas para inducir la formación de pellets miceliares.

Finalmente, los pellets obtenidos fueron tamizados y enjuagados cuidadosamente con agua destilada estéril para eliminar residuos del medio. Los pellets limpios fueron almacenados en frascos de vidrio con agua destilada o estéril a 4 °C hasta su posterior uso.

Remoción de RC en medio líquido

La capacidad de remoción del colorante se evaluó mediante ensayos en medio líquida utilizando una concentración inicial de 50 mg/L de RC en todos los tratamientos. Se establecieron dos experimentos independientes:

1. Primer experimento (0.5 g de adsorbente): En matraces Erlenmeyer de 50 mL, se añadieron 20 mL de solución de RC (50 mg/L) y 0.5 g de los siguientes materiales adsorbentes (tratamientos), por separado: biocarbón (BC), biocarbón magnetizado (BC-Fe₃O₄), pellets de micelio con biocarbón (Pellet-BC), pellets de micelio con biocarbón magnetizado (Pellet-BC-Fe₃O₄), pellets de micelio sin biocarbón (Pellet-micelio), y un control sin material adsorbente (blanco). Los matraces fueron incubados bajo agitación constante a 140 rpm a temperatura ambiente (25 ± 2 °C).

2. Segundo experimento (1.0 g de adsorbente): Se repitieron las mismas condiciones experimentales, pero utilizando 1.0 g de cada uno de los materiales adsorbentes, i.e., BC, BC-Fe₃O₄, Pellet-BC, Pellet-BC-Fe₃O₄, Pellet-micelio y el control.

En ambos ensayos, se tomaron alícuotas de 1 mL en los tiempos 0, 15, 30, 60, 180 y 300 minutos. Las muestras fueron centrifugadas a 2000 rpm durante 3 minutos para separar los sólidos, y la concentración residual de RC en el sobrenadante se determinó mediante espectrofotometría UV-Vis a una longitud de onda de 524 nm, correspondiente al máximo de absorbancia del Rojo Congo (Lata *et al.*, 2024). Los experimentos se realizaron por triplicado y los datos obtenidos fueron utilizados para calcular la eficiencia de remoción de cada material a lo largo del tiempo.

Cálculo de eficiencia de remoción

La eficiencia de remoción del RC por los diferentes materiales fue determinada a partir de la concentración inicial y final del colorante en solución. Las mediciones se realizaron mediante espectrofotometría UV-Vis a 524 nm, utilizando curvas de calibración previamente establecidas.

La eficiencia de remoción (%R) se calculó con la siguiente expresión:

$$\text{Eficiencia de remoción (\%R)} = \left(\frac{C_0 - C_t}{C_0} \right) \quad (\text{Ec.3})$$

donde:

- C_0 es la concentración inicial de RC (mg/L)
- C_t es la concentración en el tiempo t (mg/L)

Asimismo, se calculó la cantidad adsorbida de colorante por unidad de masa del adsorbente (q_t) a distintos tiempos utilizando:

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t) \cdot V}{m} \quad (\text{Ec.4})$$

donde:

- q_t es la capacidad de adsorción a tiempo t (mg/g)
- V es el volumen de solución (L)
- m es la masa del adsorbente (g)

Análisis estadístico

Los resultados experimentales fueron expresados como media ± desviación estándar ($n = 3$). Para evaluar la significancia de las diferencias entre tratamientos en cuanto a la eficiencia de remoción de Rojo Congo (%R) y la capacidad de adsorción (q_t), se realizó un análisis de varianza de una vía (ANOVA de un factor), considerando como factor de clasificación el tipo de material adsorbente. Posteriormente, se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey HSD (Honestly Significant Difference) con un nivel de significancia del 95% ($p < 0.05$) para identificar diferencias significativas entre pares de medias. El análisis estadístico se efectuó de forma independiente para cada experimento (0.5 g y 1.0 g de adsorbente), así como para cada punto de tiempo evaluado (15, 30, 60, 180 y 300 min), con el fin de analizar el efecto del tipo de material sobre la remoción del colorante a lo largo del tiempo. Los cálculos fueron realizados utilizando el software estadístico R y la paquetería de libre acceso.

Resultados

Como primer paso, se cultivó *Pleurotus djamor* en placas PDA suplementadas con distintas concentraciones de Rojo Congo (Fig. 1) para evaluar visualmente su tolerancia al colorante.

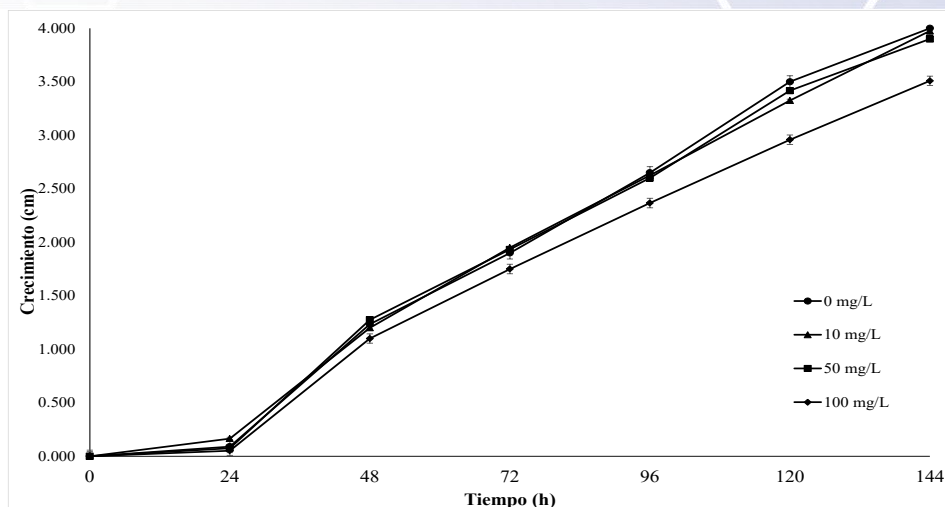


Figura 1. Crecimiento acumulado de *Pleurotus djamor* bajo concentraciones variables de RC.

En la Fig. 2 se muestra el crecimiento individual de *P. djamor* expuesto a diferentes concentraciones de RC.

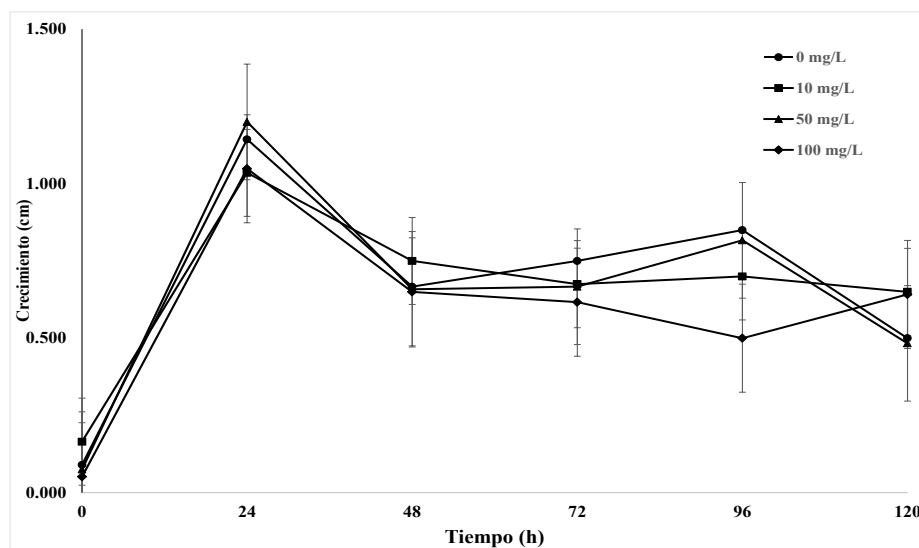


Figura 2. Tasa de crecimiento diarios *Pleurotus djamor* en PDA con distintas concentraciones de RC.

P. djamor fue expuesto a diferentes concentraciones iniciales de RC en medio sólido (Fig. 3), tal como se observa a continuación.

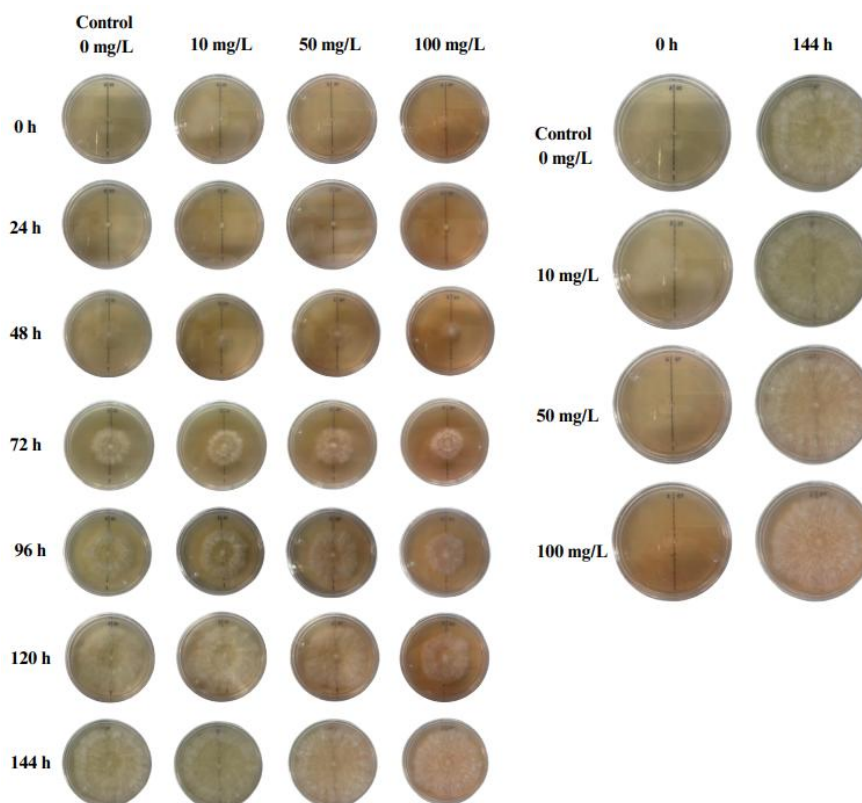


Figura 3. Comportamiento de crecimiento radial de *Pleurotus djamor* bajo concentraciones variables de RC.

Antes de los ensayos de remoción, se construyó una curva de calibración (Fig. 4) para determinar con precisión la absorbancia de RC durante las mediciones.

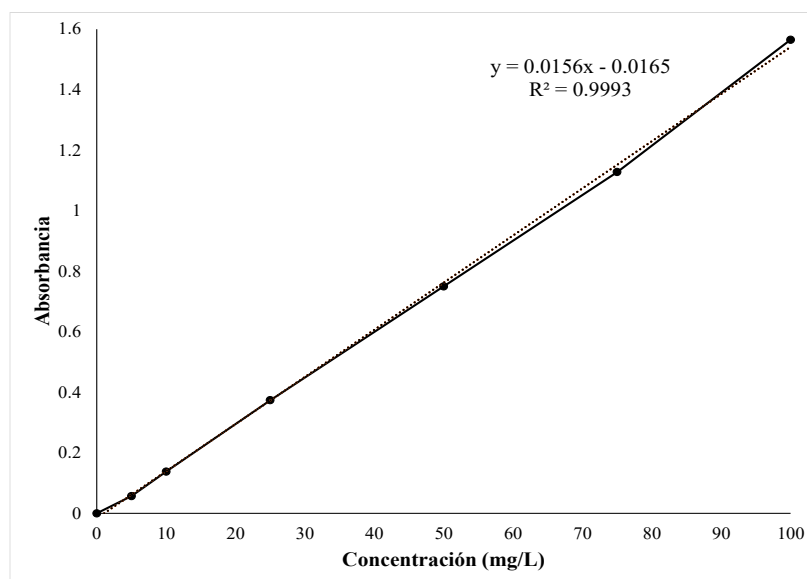


Figura 4. Curva de calibración del RC a 524 nm por espectrofotometría UV-Vis.

Posterior a ello, se evaluó la remoción de RC en medio líquido usando 0.5 g de Pellet-Micelio, Pellet-BC, Pellet-BC-Fe₃O₄, BC, BC-Fe₃O₄ y un blanco en distintos tiempos. Se muestran resultados en la Fig. 5.

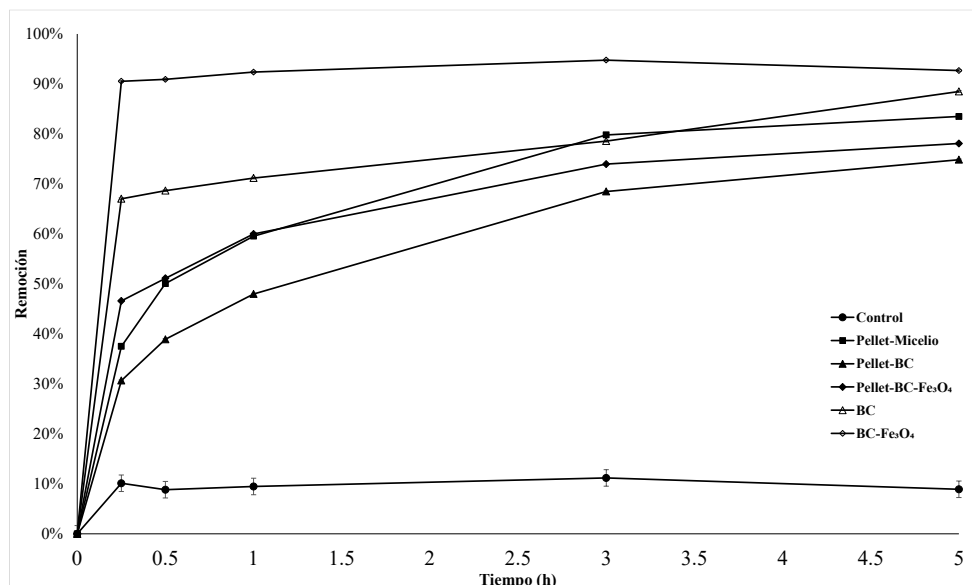


Figura 5. Remoción de RC con 0.5 g de distintos materiales absorbentes en un lapso de 5 horas.

La concentración del RC en el medio líquido se monitoreó durante 5 h, empleando 0.5 g de Pellet-Micelio, Pellet-BC, Pellet-BC-Fe₃O₄, BC, BC-Fe₃O₄ y un blanco, tal como se observa en la Fig. 6.

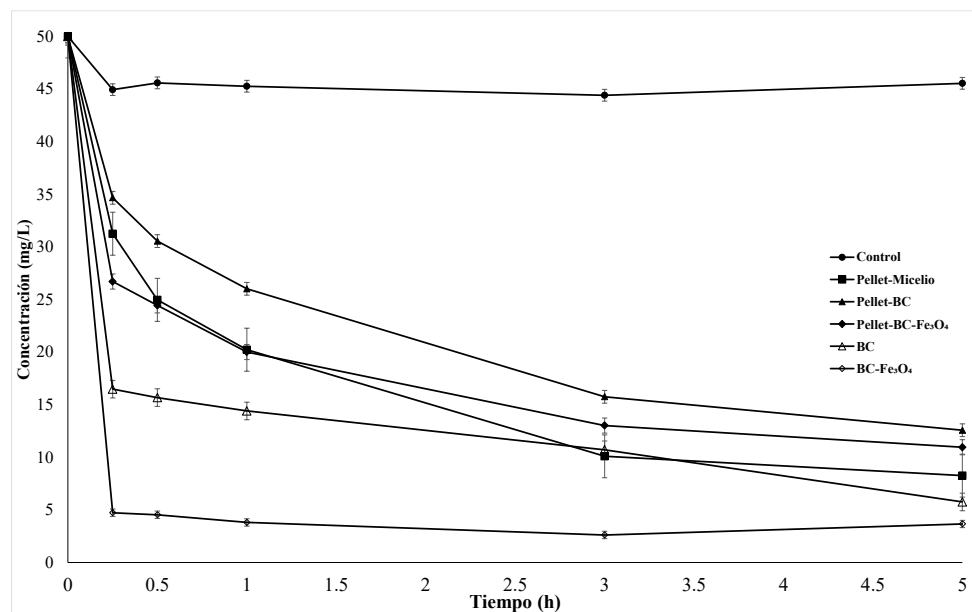


Figura 6. Concentración de RC en un tiempo de 5 horas con 0.5 g de los materiales absorbentes.

Se evaluó la remoción del RC empleando 1.0 g de Pellet-Micelio, Pellet-BC, Pellet-BC-Fe₃O₄, BC, BC-Fe₃O₄ y un blanco, con la intención de determinar el efecto de la carga inicial de material adsorbente, dicho resultado se observa en la Fig. 7.

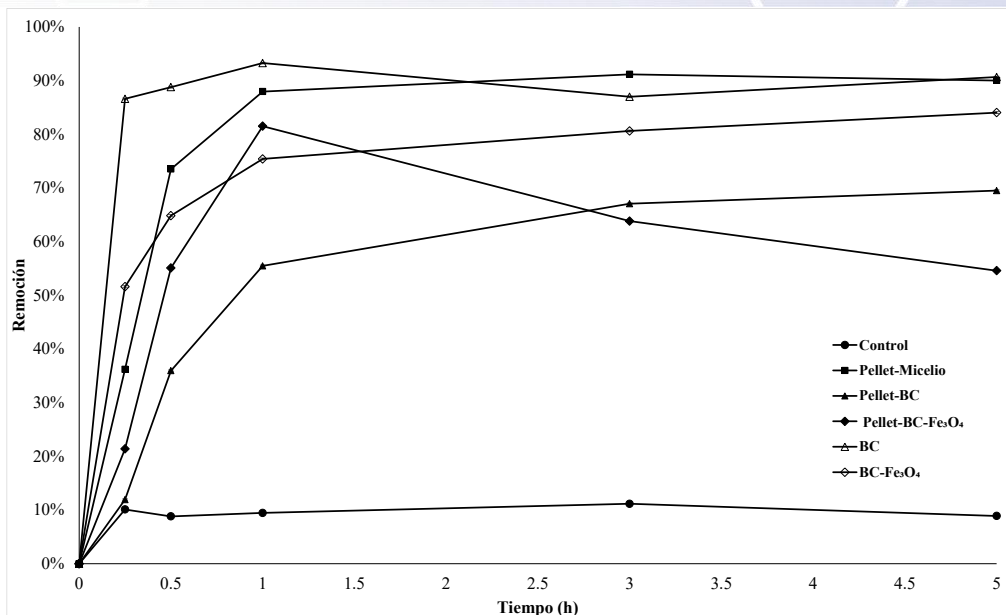


Figura 7. Remoción de RC con 1.0 g de distintos materiales absorbentes en un lapso de 5 horas.

La seguimiento de la concentración de RC a lo largo del tiempo con 1.0 g de Pellet-Micelio, Pellet-BC, Pellet-BC-Fe₃O₄, BC, BC-Fe₃O₄ y control, se muestra en la Fig. 8.

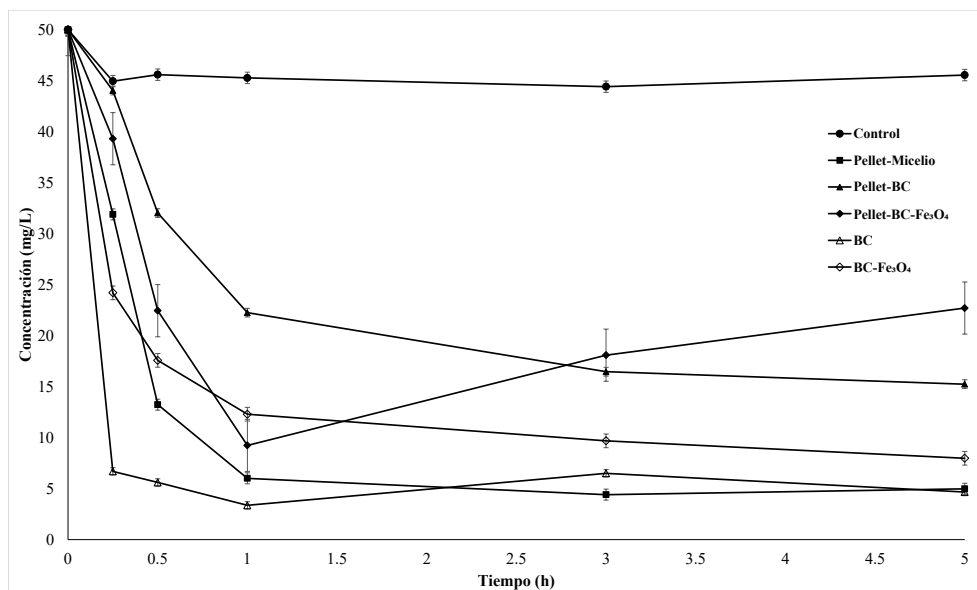


Figura 8. Concentración de RC en un tiempo de 5 horas con 1.0 g de los materiales absorbentes.

En la Fig. 9 se observa la comparación en el desempeño de remoción tras 5 horas de exposición a concentraciones de carga de los materiales de 0.5 g y 1.0 g de BC, BC-Fe₃O₄, Pellet-BC, Pellet-BC-Fe₃O₄, Pellet-Micelio y el control.

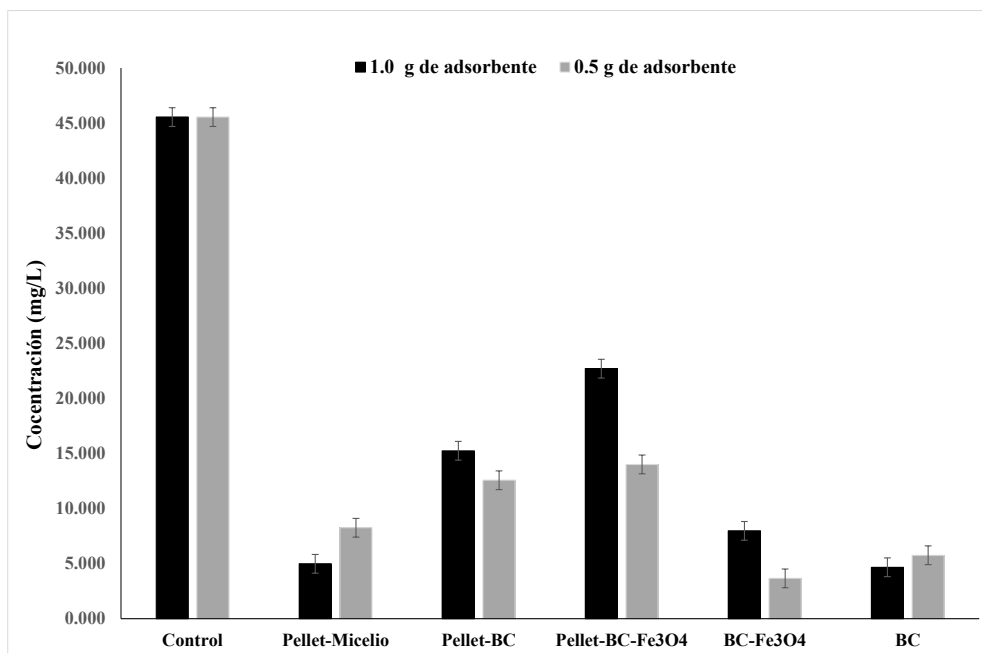


Figura 9. Concentración de RC con 0.5 g y 1.0 g de distintos materiales adsorbentes.

Con la intención de determinar la cantidad de soluto adsorbido por cantidad de adsorbente durante el tiempo de exposición (t), se determinó q_t para 0.5 y 1.0 g de carga inicial de adsorbentes (Fig. 10 y 11).

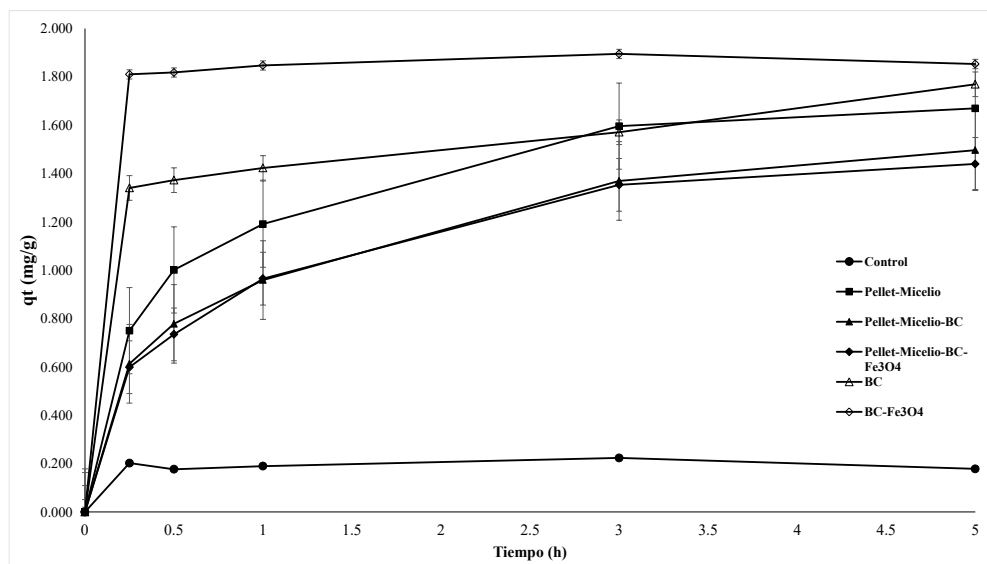


Figura 10. Capacidad de absorción (q_t) con 0.5 g: BC, BC-Fe₃O₄, Pellet-BC, Pellet-BC-Fe₃O₄, Pellet-Micelio y control.

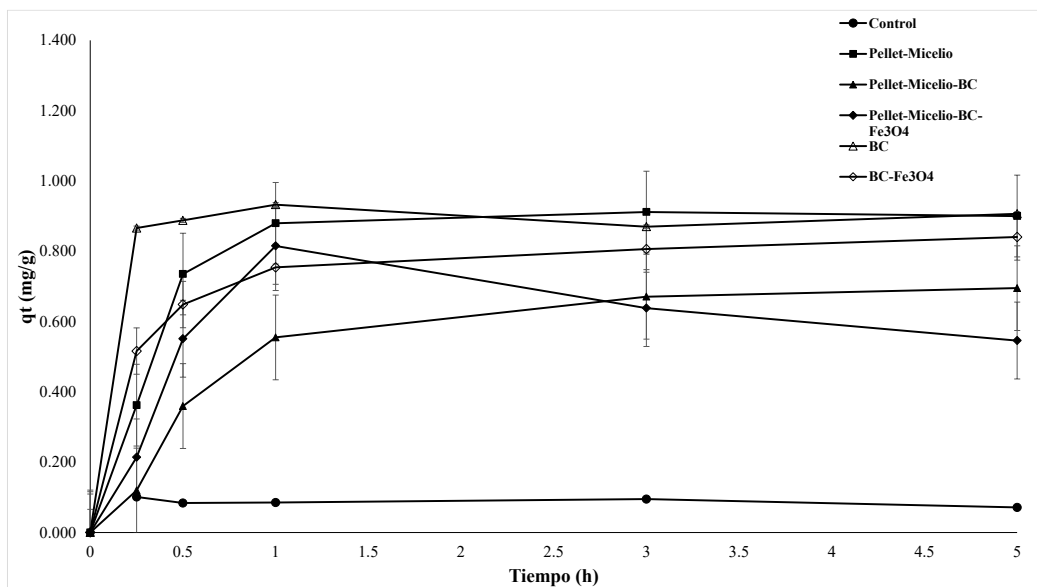


Figura 11. Capacidad de absorción (q_t) con 1.0 g: BC, BC-Fe₃O₄, Pellet-BC, Pellet-BC-Fe₃O₄, Pellet-Micelio y control.

A continuación, en la Fig. 12, se muestra la evolución de la coloración de la mezcla en presencia de los diferentes materiales adsorbentes pasadas cinco horas.

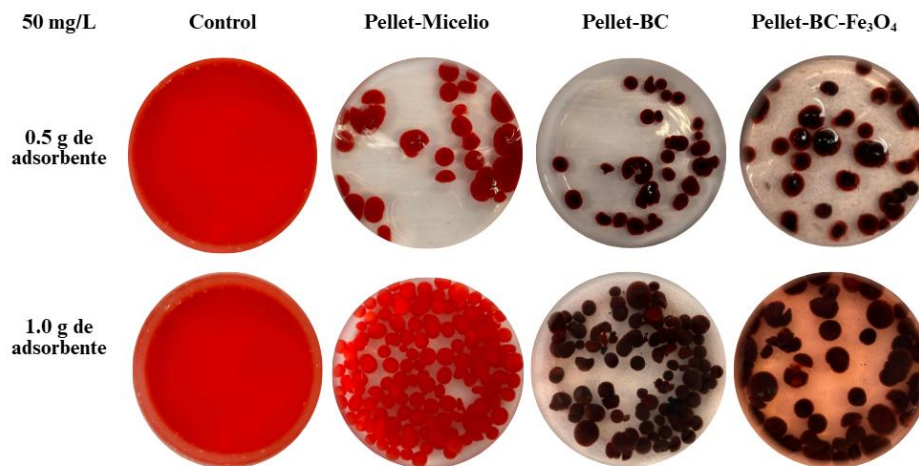


Figura 12. Evolución de la coloración de la solución RC 50 mg/L transcurridas 5 horas en presencia de 0.5 g de material adsorbente (hilera superior) y 1.0 g de material adsorbente (hilera inferior).

Finalmente, en la Fig. 13, se presenta las imágenes obtenidas después de someter los pellets con micelio a un análisis bajo microscopio, los pellets analizados fueron obtenidos de una muestra después de cinco horas de contacto con la solución de 50 mg/L de RC, y un blanco para evaluar las diferencias.

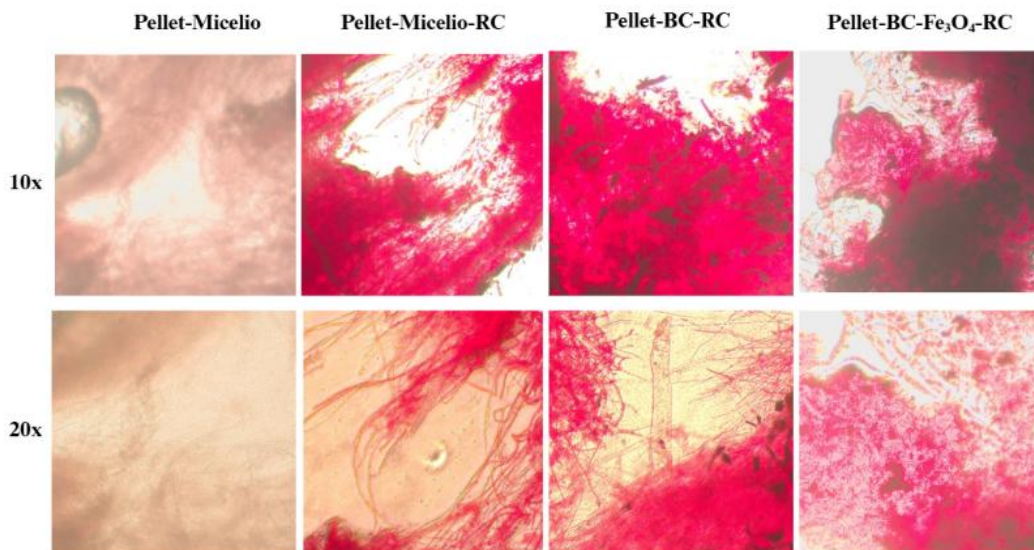


Figura 13. Imágenes de Pellet-Micelio, Pellet-Micelio-RC, Pellet-BC-RC, Pellet-BC-Fe₃O₄-RC, bajo objetivos 10x y 20x.

Discusiones

Acondicionamiento de *P. djamor* y crecimiento en cajas Petri suplementadas con rojo congo

El análisis del crecimiento radial de *Pleurotus djamor* en medio PDA suplementado con RC permitió evaluar la tolerancia del hongo frente a diferentes concentraciones del colorante. Tal como se observa en las Figuras 1 y 2, el micelio presentó un desarrollo progresivo en todos los tratamientos, aunque con variaciones evidentes en la velocidad de expansión radial.

El seguimiento del crecimiento (Figura 3) mostró que, si bien el hongo fue capaz de desarrollarse incluso en presencia de concentraciones elevadas de RC (100 mg/L), la tasa de crecimiento disminuyó en comparación con el control, evidenciando un efecto inhibitorio del colorante. Este efecto se refleja en el índice de inhibición calculado, el cual incrementa conforme aumenta la concentración de RC, lo que sugiere una relación dosis-respuesta típica en presencia de compuestos tóxicos o estresantes (Kalia *et al.*, 2024).

A pesar de esta inhibición parcial, la capacidad del micelio para mantener su crecimiento en condiciones adversas resalta su potencial como agente biotecnológico tolerante a contaminantes (Dinakarkumar *et al.*, 2024). Estos resultados respaldan su uso en sistemas de biorremediación, en especial cuando se considera su posterior inmovilización sobre soportes sólidos para aplicaciones en medio líquido.

Pruebas de remoción de RC en mediión líquido

Los ensayos de remoción RC en medio líquido, utilizando diferentes tipos de materiales adsorbentes, permitieron comparar el comportamiento de sistemas puramente fisicoquímicos (biocarbón y biocarbón magnetizado) con sistemas biohíbridos compuestos por micelio de *Pleurotus djamor* inmovilizado sobre dichos soportes. Como se observa en las Figuras 5 a 8, todos los materiales presentaron cierta capacidad de remoción, aunque con eficiencias diferenciadas tanto en función del tipo de adsorbente como de la masa utilizada (0.5 y 1.0 g).

En general, los sistemas individuales biocarbón, biocarbón magnetizado (BC-Fe₃O₄) y Pellet-Micelio presentaron un desempeño superior en comparación con los otros materiales evaluados. Esta tendencia se mantiene tanto en términos de la concentración remanente de RC (Figuras 6 y 8) como en la cantidad adsorbida por unidad de masa (q_t , Figuras 10 y 11).

La remoción de RC en los sistemas que emplean biocarbón fue considerablemente más eficiente, debido a la estructura porosa de este material, que facilita la adsorción del colorante en su superficie. Esta característica permite que el colorante quede retenido en las partículas, las cuales pueden ser posteriormente recuperadas mediante métodos físicos como la centrifugación. Además, el biocarbón cuenta con una alta superficie específica, lo que incrementa aún más su capacidad de adsorción.

La presencia de *Pleurotus djamor* en los pellets, incluso sin soporte (Pellet-Micelio), también mostró cierto grado de remoción, lo que evidencia su potencial como agente micorremediador. Esta remoción puede atribuirse tanto a mecanismos de biosorción —interacciones físicas y químicas entre las hifas del hongo y las moléculas del colorante— como a procesos metabólicos inducidos, en los cuales enzimas ligninolíticas como lacasas y peroxidasas oxidan los enlaces azo del RC, promoviendo su degradación (Dhir, 2021).

El efecto de la masa del adsorbente fue también determinante. Al comparar los resultados con 0.5 g y 1.0 g (Figura 9), se observa un aumento generalizado en la eficiencia de remoción con mayor cantidad de material, como era esperable. Sin embargo, el incremento en la masa no siempre resultó en un aumento proporcional de la capacidad de adsorción específica (q_t), lo que podría deberse a una posible saturación superficial o a una menor eficiencia de uso del material adicional cuando la concentración del contaminante se mantiene constante (Mohamed Nasser *et al.*, 2024). Estos hallazgos subrayan la importancia de optimizar la relación masa/volumen para maximizar el rendimiento en aplicaciones reales.

Los resultados obtenidos demuestran que la eficiencia de los compuestos es mejor si estos trabajan por separado, para así obtener una mejor remoción de colorante RC. Sin embargo, el desempeño de los sistemas híbridos representa una alternativa viable para la remoción de colorantes, ya que logran eliminar más de la mitad del contaminante presente en el medio, como se observa en las Figuras 5 y 7. Esta eficiencia varía según la masa del adsorbente empleada, y puede explicarse por la doble acción de los compuestos, por un lado, la adsorción pasiva del soporte carbonoso, caracterizado por su elevada área superficial y porosidad; y por otro, la capacidad biocatalítica del hongo, que puede participar activamente en la transformación o descomposición parcial del colorante mediante enzimas extracelulares (Espinosa-Ortiz *et al.*, 2022).

Microscopía de material adsorbente

En la figura 12 se presenta la evolución visual de la solución tras cinco horas de contacto con 0.5 g (hilera superior) y 1.0 g (hilera inferior) de los diferentes materiales adsorbentes. Es evidente que el cambio en la intensidad del color residual está correlacionado con la eficacia del material, observándose una mayor decoloración al incrementar la masa del adsorbente, especialmente en los sistemas que contienen micelio inmovilizado (Pellet-Micelio).

Este cambio visual respalda los datos cuantitativos presentados anteriormente, para los sistemas de biocarbón, mostrando un desempeño superior frente a los sistemas con micelio e híbridos. Además, la combinación con el hongo sugiere mecanismos adicionales como la biosorción activa y posibles transformaciones enzimáticas del colorante.

En la figura 13 presenta un análisis microscópico de los pellets tras la exposición al RC. Se observan diferencias morfológicas evidentes entre los pellets expuestos y el control, donde pueden distinguirse depósitos superficiales y cambios en la textura estructural, posiblemente asociados a la adsorción del colorante o a modificaciones inducidas por la interacción con compuestos del medio (Mekpan *et al.*, 2024). Estas observaciones respaldan la hipótesis de que la presencia de micelio favorece la interacción con el contaminante no solo por adsorción pasiva, sino también por la participación de componentes fúngicos activos (Bhatnagar *et al.*, 2021).

Desde el enfoque de la biotecnología ambiental, estos resultados demuestran que la alternativa de integrar materiales carbonosos fusionados con micelio fúngico es una solución sostenible para la remediación de aguas contaminadas con colorantes sintéticos. El uso de residuos lignocelulósicos como precursor del biocarbón añade un valor agregado al sistema, al incorporar principios de economía circular y aprovechamiento de residuos agroindustriales (Sant'Ana *et al.*, 2024).

En el contexto de la micorremediación, este estudio resalta el papel versátil de *Pleurotus djamor* no solo como agente degradador, sino también como componente estructural activo dentro de un sistema multifuncional. Su adaptación a entornos contaminados, junto con su facilidad de cultivo e inmovilización, permite su aplicación en sistemas continuos o de recirculación, abriendo oportunidades para su implementación a mayor escala en el tratamiento de efluentes industriales.

Perspectivas

Más allá de los resultados obtenidos, este estudio abre nuevas oportunidades de investigación y aplicación. A continuación, se plantean tres líneas que pueden guiar futuros desarrollos y consolidar la viabilidad de estos sistemas:

- Pruebas a mayor escala: Será necesario llevar estos sistemas a plantas piloto para confirmar que mantienen su eficiencia en condiciones reales y que resultan viables en términos de costo y operación.
- Aplicación en más contaminantes: Además de colorantes, estos materiales podrían usarse para atrapar otros contaminantes comunes en el agua, como pesticidas, metales o restos de medicamentos, lo que aumentaría su utilidad práctica.
- Aprovechamiento de residuos locales: Integrar la producción de biocarbón a partir de desechos agrícolas de la región permitirá darles un valor agregado y, al mismo tiempo, ofrecer soluciones económicas y sostenibles a problemas ambientales locales.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio evidencian que los sistemas de biocarbón tienen una mejor respuesta de adsorción del colorante RC, no obstante, los sistemas con *Pleurotus djamor* inmovilizado presentan una buena adsorción y un cambio estructural del contaminante RC. La mayor eficiencia observada se debe a la alta porosidad del biocarbón y su afinidad superficial, mientras que el buen desempeño del Pellet-Micelio se debe a los mecanismos biocatalíticos del hongo, los cuales incluyen procesos de biosorción y posible biodegradación enzimática del colorante. La incorporación de magnetita no solo mejora la capacidad de remoción, sino que también permite una recuperación sencilla del material mediante separación magnética, lo que representa una ventaja significativa en términos de aplicabilidad operativa.

Estos resultados confirman el potencial de los sistemas micofuncionalizados como alternativas biotecnológicas sostenibles, eficientes y escalables para el tratamiento de aguas contaminadas con colorantes sintéticos persistentes, reforzando el valor de integrar residuos agroindustriales, micología aplicada y tecnologías de remediación avanzadas.

Referencias

- Aragaw, T. A., Bogale, F. M., & Tesfaye, E. L. (2024). Oxidative ligninolytic enzymes and their role in textile dye biodegradation: A comprehensive review. *Water Practice & Technology*, 19(9), 3598-3630.
- Bhatnagar, A., Tamboli, E., & Mishra, A. (2021). *Wastewater treatment and Mycoremediation by P. ostreatus mycelium*. 775(1), 012003.
- Dhir, B. (2021). Degradation of dyes using filamentous fungi. En *Dye biodegradation, mechanisms and techniques: Recent advances* (pp. 51-66). Springer.
- Dinakarkumar, Y., Ramakrishnan, G., Gujjula, K. R., Vasu, V., Balamurugan, P., & Murali, G. (2024). Fungal bioremediation: An overview of the mechanisms, applications and future perspectives. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 6, 293-302.
- Espinosa-Ortiz, E. J., Rene, E. R., & Gerlach, R. (2022). Potential use of fungal-bacterial co-cultures for the removal of organic pollutants. *Critical reviews in biotechnology*, 42(3), 361-383.
- Guel-Nájar, N. A., Rios-Hurtado, J. C., Muzquiz-Ramos, E. M., Dávila-Pulido, G. I., Gonzalez-Ibarra, A. A., & Pat-Espadas, A. M. (2023). Magnetic biochar obtained by chemical coprecipitation and pyrolysis of corn cob residues: Characterization and methylene blue adsorption. *Materials*, 16(8), 3127.
- Kalia, S., Samuchiwal, S., Dalvi, V., & Malik, A. (2024). Exploring fungal-mediated solutions and its molecular mechanistic insights for textile dye decolorization. *Chemosphere*, 360, 142370.
- Kryczyk-Poprawa, A., Baran, W., Sułkowska-Ziaja, K., Kała, K., Adamek, E., Król, M., Sánchez-Hidalgo, A., & Muszyńska, B. (2025). Bioremediation of Persistent Organic Pollutant—Oxybenzone with *Pleurotus djamor*. *Applied Sciences*, 15(9), 4707.
- Lata, K., Singh, R. P., Ambade, B., & Kumar, A. (2024). *Biodecolorization of Reactive Red 120 Azo Dye by Metal-Ion Tolerant Lysinibacillus capsici PB300 (T) Bacteria Bacteria and its Application Potential in Textile Effluents Treatment*.

- Lin, J., Ye, W., Xie, M., Seo, D. H., Luo, J., Wan, Y., & Van der Bruggen, B. (2023). Environmental impacts and remediation of dye-containing wastewater. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(11), 785-803.
- Mekpan, W., Cheirsilp, B., Maneechote, W., & Srinuanpan, S. (2024). Microalgae-fungal pellets as novel dual-bioadsorbents for dye and their practical applications in bioremediation of palm oil mill effluent. *Bioresource Technology*, 413, 131519.
- Mohamed Nasser, S., Abbas, M., & Trari, M. (2024). Understanding the rate-limiting step adsorption kinetics onto biomaterials for mechanism adsorption control. *Progress in Reaction Kinetics and Mechanism*, 49, 14686783241226858.
- Najim, A. A., Radeef, A. Y., al-Doori, I., & Jabbar, Z. H. (2024). Immobilization: The promising technique to protect and increase the efficiency of microorganisms to remove contaminants. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 99(8), 1707-1733.
- Ogawa, M., Moreno-García, J., & Barzee, T. J. (2024). Filamentous fungal pellets as versatile platforms for cell immobilization: Developments to date and future perspectives. *Microbial Cell Factories*, 23(1), 280.
- Oladoye, P. O., Kadhon, M., Khan, I., Aziz, K. H. H., & Alli, Y. A. (2024). Advancements in adsorption and photodegradation technologies for Rhodamine B dye wastewater treatment: Fundamentals, applications, and future directions. *Green Chemical Engineering*, 5(4), 440-460.
- Pawłowicz, T., Gabrysiak, K. A., & Wilamowski, K. (2024). Investigating the potential of polypore fungi as eco-friendly materials in food industry applications. *Forests*, 15(7), 1230.
- Ramamurthy, K., Priya, P. S., Murugan, R., & Arockiaraj, J. (2024). Hues of risk: Investigating genotoxicity and environmental impacts of azo textile dyes. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(23), 33190-33211.
- Sahoo, P. P., Kumar, V., Pallavi, P., Sahoo, A. A., Sen, S. K., & Raut, S. (2025). Exploration of Basidiomycetes for Anthraquinone Dyes Decolorization in Textile Wastewater. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, e2763.
- Sant'Ana, L. H., Oliveira, J. R., Gonçalves, G., Tusset, A. M., & Lenzi, G. G. (2024). Circular economics in agricultural waste biomass management. *Biomass*, 4(2), 543-554.