



Artículo original / Original article

Bioactivación con lacasa para la eliminación de contaminantes farmacéuticos en aguas residuales: nivel de laboratorio, 2025

Bioactivation with laccase for the removal of pharmaceutical contaminants in wastewater: laboratory level, 2025

Grecia del Pilar Chuquival-Fababa ^{1*} ; Llelin Fasabi-Pisco ¹

¹Universidad César Vallejo, Campus Tarapoto, Perú

Recibido: 05/05/2025

Aceptado: 12/07/2025

Publicado: 25/07/2025

*Autor de correspondencia: grchuquivalfa@ucvvirtual.edu.pe

Resumen: El presente estudio contribuye al Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6: "Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos", al investigar la eficiencia de la lacasa inmovilizada en la eliminación de contaminantes farmacéuticos en aguas residuales, con objetivos de analizar la bioactivación con lacasa, determinar las condiciones óptimas de tratamiento y evaluar la eficiencia de la inmovilización de la lacasa, mediante un estudio básico, cuantitativo y experimental puro, con una población en estudio de 24 litros de agua residual con contaminantes farmacéuticos elaborado a nivel de laboratorio, obteniendo resultados de que la aplicación de lacasa inmovilizada en material de soporte silica obtenido a partir de cascara de pepino (biochar) es una tecnología eficaz para la eliminación de estos contaminantes, alcanzando reducciones de hasta 93,8%, lo que sugiere que la lacasa inmovilizada es una tecnología prometedora para la eliminación de contaminantes farmacéuticos en aguas residuales, contribuyendo a la gestión sostenible del agua.

Palabras clave: bioactivación; farmacéutica; inmovilización

Abstract: The present study contributes to Sustainable Development Goal (SDG) 6: "Ensure availability and sustainable management of water and sanitation for all", by investigating the efficiency of immobilized laccase in the removal of pharmaceutical contaminants in wastewater, with objectives to analyze bioactivation with laccase, determine the optimal treatment conditions and evaluate the efficiency of laccase immobilization, through a basic, quantitative and pure experimental study, with a study population of 24 liters of wastewater with pharmaceutical contaminants elaborated at laboratory level, obtaining results that the application of laccase immobilized on silica support material obtained from cucumber peel (biochar) is an effective technology for the removal of these contaminants, reaching reductions of up to 93.8%, suggesting that immobilized laccase is a promising technology for the removal of pharmaceutical contaminants in wastewater, contributing to sustainable water management.

Keywords: bioactivation; pharmaceutical; immobilization

1. Introducción

Buscando contribuir a la eliminación de contaminantes farmacéuticos en aguas residuales mediante la bioactivación con lacasa. El objetivo principal de esta investigación es evaluar la eficacia de la bioactivación con lacasa para la eliminación de contaminantes farmacéuticos en aguas residuales a nivel de laboratorio, esperando que los resultados de esta investigación contribuyan a la identificación de nuevas estrategias para abordar la contaminación de las aguas residuales por compuestos farmacéuticos.

La investigación sobre la eliminación de contaminantes farmacéuticos en aguas residuales mediante la bioactivación con lacasa se justifica por varias razones ambientales, prácticas y sociales. La bioactivación con lacasa es una tecnología prometedora que puede ofrecer una solución más eficiente y sostenible para la eliminación de contaminantes farmacéuticos en aguas residuales.

A nivel internacional, se han desarrollado múltiples estrategias orientadas a la eliminación de contaminantes presentes en aguas residuales mediante el uso de lacasa y materiales compuestos con propiedades catalíticas. Estas estrategias se basan en la bioactivación y encapsulación en marcos metal-orgánicos (MOFs) o materiales zeolíticos, con el propósito de optimizar la estabilidad enzimática, la eficiencia catalítica y la capacidad de remoción de compuestos farmacéuticos y fenólicos.

La encapsulación de lacasa en marcos imidazolato ha mostrado un incremento significativo en la capacidad de adsorción y degradación de contaminantes, al combinar la adsorción selectiva de estos materiales con la acción catalítica de la enzima. Este proceso permite alcanzar niveles de eliminación superiores al 80 %, lo que representa una alternativa sostenible y de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales.

Asimismo, la inmovilización de lacasa sobre materiales zeolíticos o marcos bimetálicos de cobre y zinc proporciona una mayor estabilidad estructural y una capacidad de reutilización prolongada, manteniendo una alta actividad enzimática. Este tipo de sistemas favorece la degradación de tintes y compuestos orgánicos, contribuyendo a la remediación eficiente de efluentes contaminados.

Por otro lado, la formulación de biocatalizadores multicapa y miméticos de lacasa permite mejorar la resistencia frente a condiciones adversas de pH y temperatura, además de potenciar la actividad catalítica y la durabilidad del sistema. En conjunto, estas tecnologías representan soluciones biotecnológicas prometedoras y ecológicamente sostenibles para la degradación de contaminantes emergentes en el tratamiento avanzado de aguas residuales.

2. Materiales y métodos

2.1. Diseño

El estudio se estructuró bajo un diseño experimental puro, orientado a determinar la relación causal entre la bioactivación de la lacasa y la eliminación de contaminantes farmacéuticos en aguas residuales. Este tipo de diseño permitió manipular de manera controlada la variable independiente –bioactivación de la lacasa– y medir su efecto directo sobre la variable dependiente –eficiencia de eliminación de contaminantes farmacéuticos–, minimizando la incidencia de factores externos o variables extrañas que pudieran distorsionar los resultados (Vallejo, 2002, p. 2). La implementación en un entorno de laboratorio controlado garantizó condiciones reproducibles, precisión en las mediciones y validez interna en la evaluación de la respuesta catalítica del sistema bioactivado.

El alcance de la investigación se circunscribió al entorno experimental de laboratorio, con el propósito de aislar las condiciones que pudieran influir en la remoción de los contaminantes. Este control permitió analizar de manera específica la interacción molecular entre la lacasa

bioactivada y los compuestos farmacéuticos, profundizando en la comprensión de los mecanismos catalíticos asociados a su degradación.

2.2. Población y muestra

La población objetivo correspondió a aguas residuales simuladas con contaminantes farmacéuticos preparadas a nivel de laboratorio, por considerarse análogas a los efluentes generados en procesos industriales del sector farmacéutico, los cuales requieren tratamientos avanzados para la reducción de contaminantes persistentes (Hassan et al., 2024, p. 4).

Se trabajó con una muestra de 24 litros de agua residual artificialmente contaminada, seleccionada por su representatividad respecto a la composición y concentración típica de las aguas residuales industriales. La fase experimental comprendió 48 ensayos independientes, cada uno constituido por 500 mL de muestra tratada, asegurando replicabilidad estadística y confiabilidad en los resultados.

La selección muestral respondió a un muestreo fraccionario no probabilístico, que según Balestrini (2006, p. 43) permite obtener unidades experimentales con características homogéneas y controladas, representativas del comportamiento global de la población objetivo. Este enfoque permitió cuantificar con rigor la eficiencia catalítica de la bioactivación de la lacasa en la remoción de contaminantes farmacéuticos bajo condiciones experimentales estandarizadas.

Tabla 1. Proporción a utilizar de la muestra

Concepto	Muestra Blanco de Control (MBC)	Tratamiento 1 (T1)	Tratamiento 2 (T2)	Total
Cantidad de experimentos	12	18	18	48
Cantidad de Agua residual	6 L	9 L	9 L	24 L

La tabla 1 presenta la forma en que la muestra fue fraccionada para cada tratamiento experimental, asegurando la distribución uniforme y el control de las condiciones operativas.

Criterios de inclusión y exclusión de la muestra

El proceso de selección de la muestra siguió criterios técnicos precisos. Se incluyeron únicamente muestras de agua residual con contaminantes farmacéuticos elaboradas a nivel de laboratorio, que presentaron concentraciones dentro de los rangos de referencia previamente establecidos. Por el contrario, se excluyeron aquellas muestras que no cumplieran con los criterios definidos, tales como las no elaboradas en condiciones controladas o las que presentaron concentraciones fuera del rango experimental determinado. Esta delimitación garantizó la homogeneidad de las unidades experimentales y la validez interna de los resultados.

Fases del procedimiento experimental

Fase I – Preparación y gabinete:

Esta etapa comprendió la revisión bibliográfica exhaustiva de los fundamentos teóricos y antecedentes científicos sobre la bioactivación de lacasa, así como la selección de materiales y reactivos con criterios de sostenibilidad y disponibilidad local. Se diseñó el esquema experimental, definiendo las variables de control, los parámetros de medición y los criterios de replicabilidad estadística.

Fase II – Elaboración de la muestra contaminada y selección del organismo productor:

Se elaboró en laboratorio el efluente sintético con contaminantes farmacéuticos, caracterizándose inicialmente sus propiedades fisicoquímicas. Paralelamente, se seleccionó un hongo ligninolítico productor de lacasa, con alta capacidad enzimática y facilidad de cultivo. Posteriormente, se optimizaron las condiciones de crecimiento mediante el ajuste de pH, temperatura y aireación, con el propósito de maximizar la producción de la enzima.

Fase III – Aislamiento, purificación e inmovilización de la lacasa:

Tras el cultivo, la lacasa fue aislada y purificada, seguida de su inmovilización en un soporte sólido, adaptando el método descrito por Hu et al. (2021, p. 3). El soporte de carbón activado se lavó con agua destilada, se secó en horno y se activó químicamente con glutaraldehído para generar grupos funcionales capaces de enlazar la enzima. La lacasa se disolvió en un buffer fosfato y se mezcló con el soporte tratado, incubándose durante 24 horas a 4 °C con agitación suave. Finalmente, se lavó y estabilizó el soporte con la enzima inmovilizada, obteniéndose el biocatalizador funcional.

Fase IV – Tratamiento experimental y análisis de eficacia:

Durante esta fase, las soluciones de lacasa inmovilizada se mezclaron con muestras de agua residual contaminada y se incubaron bajo condiciones controladas. Se establecieron dos tratamientos: el primero con lacasa inmovilizada en esferas de alginato y el segundo con lacasa inmovilizada en sílica obtenida a partir de cáscara de pepino (biochar). Los experimentos se realizaron en un sistema de jarras con volúmenes de 500 mL por jarra, a una velocidad de agitación de 200 rpm durante 60 minutos.

Cada tratamiento comprendió seis ensayos experimentales, ejecutados por triplicado (R1, R2 y R3) e incluyó una muestra blanca de control. Finalizado el proceso, se tomaron alícuotas de cada ensayo para su análisis cuantitativo, determinándose las concentraciones iniciales y finales de los contaminantes farmacéuticos, a fin de evaluar la eficiencia catalítica y la capacidad de remoción del sistema bioactivado.

Tratamiento 1: Inmovilización de la enzima lacasa en soporte de esferas de alginato

El primer tratamiento consistió en evaluar la eficiencia catalítica de la lacasa inmovilizada en esferas de alginato, bajo diferentes condiciones de concentración enzimática, pH y temperatura. Las variables experimentales se controlaron de manera precisa para determinar el efecto combinado de cada parámetro sobre la remoción de contaminantes farmacéuticos en el agua residual simulada.

- Ensayo 1.1: Se adicionó 1 mL de lacasa inmovilizada en una esfera de alginato (peso neto: 5 g), bajo condiciones de pH 3.0 y 10 °C.
- Ensayo 1.2: Se aplicó la misma proporción de lacasa (1 mL; 5 g de esfera) en condiciones de pH 6.0 y 20 °C.
- Ensayo 1.3: Se emplearon 3 mL de lacasa distribuidos en tres esferas de alginato (peso total: 15 g), a pH 3.0 y 10 °C.
- Ensayo 1.4: Mismas proporciones que el ensayo anterior, con condiciones de pH 6.0 y 20 °C.
- Ensayo 1.5: Se añadieron 5 mL de lacasa inmovilizada en cinco esferas de alginato (peso total: 25 g), a pH 3.0 y 10 °C.
- Ensayo 1.6: Se repitió la dosis anterior bajo condiciones de pH 6.0 y 20 °C.

Este conjunto de ensayos permitió identificar la influencia combinada del pH, la temperatura y la carga enzimática sobre la actividad catalítica de la lacasa inmovilizada en alginato, asegurando la reproducibilidad mediante réplicas controladas.

Tratamiento 2: Inmovilización de la enzima lacasa en soporte de sílica obtenida a partir de cáscara de pepino (biochar)

El segundo tratamiento se centró en el uso de sílica derivada de cáscara de pepino (biochar) como material soporte para la inmovilización de la lacasa, con el propósito de evaluar la eficiencia catalítica y la estabilidad del sistema bajo condiciones experimentales equivalentes al tratamiento 1.

- Ensayo 2.1: Se incorporó 1 mL de lacasa inmovilizada en 5 g de sílica de biochar, a pH 3.0 y 10 °C.

- Ensayo 2.2: Misma proporción de lacasa (1 mL; 5 g de biochar), bajo condiciones de pH 6.0 y 20 °C.
- Ensayo 2.3: Se adicionaron 3 mL de lacasa inmovilizada en 15 g de biochar, a pH 3.0 y 10 °C.
- Ensayo 2.4: Idéntica proporción que el ensayo anterior, con condiciones de pH 6.0 y 20 °C.
- Ensayo 2.5: Se aplicaron 5 mL de lacasa inmovilizada en 25 g de biochar, a pH 3.0 y 10 °C.
- Ensayo 2.6: Se repitió la misma dosis de lacasa bajo condiciones de pH 6.0 y 20 °C.

Este diseño factorial permitió comparar el desempeño de ambos soportes (alginato y sílica de biochar) bajo parámetros controlados, proporcionando información cuantitativa sobre la eficiencia catalítica, la influencia del pH y la temperatura, así como la estabilidad de la lacasa inmovilizada en distintos materiales portadores.

Tabla 2. Diseño experimental

Tratamiento 1						Tratamiento 2					
E 1.1	E 1.2	E 1.3	E 1.4	E 1.5	E 1.6	E 2.1	E 2.2	E 2.3	E 2.4	E 2.5	E 2.6
MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC
R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1	R1
R2	R2	R2	R2	R2	R2	R2	R2	R2	R2	R2	R2
R3	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R3	R3

2.3. Análisis de datos

El procesamiento estadístico de la información se orientó a establecer conclusiones descriptivas e inferenciales sobre la eficacia de la bioactivación con lacasa en la eliminación de contaminantes farmacéuticos presentes en aguas residuales. Para ello, se aplicaron métodos de análisis cuantitativo que permitieron evaluar el comportamiento de las variables experimentales bajo diferentes condiciones de tratamiento, garantizando la validez y precisión de los resultados.

El análisis de datos incluyó la aplicación de pruebas estadísticas paramétricas mediante el uso de análisis de varianza (ANOVA), con el propósito de determinar la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos evaluados. Posteriormente, se empleó la prueba de comparación múltiple de Tukey para identificar los pares de tratamientos que mostraron diferencias estadísticamente relevantes en sus niveles de eficiencia. Asimismo, se aplicaron pruebas t de Student para comparar la eficacia entre los dos tipos de soportes utilizados en la inmovilización enzimática (esferas de alginato y sílica obtenida a partir de cáscara de pepino).

De manera complementaria, se realizaron análisis descriptivos para caracterizar las concentraciones iniciales y finales de los contaminantes farmacéuticos, evaluando parámetros como la media, desviación estándar y porcentaje de remoción.

Los resultados del procesamiento estadístico evidenciaron que la inmovilización de la lacasa en sílica derivada de cáscara de pepino (biochar) presentó una eficiencia superior respecto al soporte de esferas de alginato, demostrando un mejor desempeño catalítico y mayor estabilidad del sistema. La condición experimental óptima se identificó con una proporción de 5 mL de lacasa por 25 g de biochar, bajo pH 6.0 y temperatura de 20 °C, logrando la mayor eficiencia en la degradación de los contaminantes farmacéuticos analizados.

3. Resultados y discusiones

El presente capítulo, se enfoca en denotar y describir los resultados obtenidos en cada uno de los parámetros analizados a medida que se realizó cada tratamiento y ensayo propuesto previamente.

De este modo, y dando respuesta al primer objetivo específico se procedió a realizar un análisis inicial del agua residual elaborada, con el fin de determinar los contaminantes farmacéuticos presentes en las aguas residuales elaboradas en laboratorio, lo cual fue realizado antes de la aplicación de los tratamientos tomando 2 muestras para mayor reafirmación de los valores, las cuales posteriormente serán tomadas como muestras control para cada tratamiento, obteniendo así los siguientes resultados.

Tabla 3. Análisis inicial de agua residual

Muestreo	Potencial de hidrogeno	Demanda Química de Oxígeno	Demanda Bioquímica de Oxígeno	Aceites y Grasas	Solidos Suspendedos Totales	Sulfuro de hidrogeno
	pH	DQO (mg/l)	DBO (mg/l)	AyG (mg/l)	SST (mg/l)	H ₂ S (mg/l)
1°	6.1	1436	714	133	87	41.3
2°	5.9	1434	713	131	89	40.8
Promedio	6.0	1435	714	132	88	41.1

Una vez obtenidos los valores iniciales en cada parámetro analizado, se procedió a desarrollar el segundo objetivo específico, en el cual determinamos las condiciones de tratamiento con aplicación de lacasa que permitieron la eliminación y/o reducción de los contaminantes farmacéuticos presentes en el agua residual.

En las siguientes tablas se muestran los valores obtenidos en cada parámetro, al aplicar el primer tratamiento que consistió en lacasa inmovilizada en material de soporte de esferas de alginato, cada ensayo estuvo determinado por condiciones de proporción (lacasa, material), pH y temperatura, para lo cual se adaptó las muestras en tratamiento, cabe agregar que para el tratamiento 1 se tomó como muestra control (valor inicial) al muestreo 1° analizado previamente.

Tabla 4. Análisis post tratamiento 1 para Demanda Química de Oxígeno

Muestreo	Potencial de hidrogeno	Demanda Química de Oxígeno	Demanda Bioquímica de Oxígeno	Aceites y Grasas	Solidos Suspendedos Totales	Sulfuro de hidrogeno
	pH	DQO (mg/l)	DBO (mg/l)	AyG (mg/l)	SST (mg/l)	H ₂ S (mg/l)
1°	6.1	1436	714	133	87	41.3
2°	5.9	1434	713	131	89	40.8
Promedio	6.0	1435	714	132	88	41.1

Tal como se observa en la tabla 4, el contaminante DQO, disminuye su concentración a medida que la dosis de lacasa/material aumenta, con el primer tratamiento aplicado permitió una disminución de la concentración en el contaminante de hasta un valor mínimo promedio de 185 mg/l (en referencia a 1436 mg/l como valor inicial) con una dosis proporcional de lacasa inmovilizada en material de soporte de esferas de alginato de 5ml/25g, en condiciones de agua residual llevada a un pH 6.0 y 20°C de temperatura.

Tabla 5. Análisis post tratamiento 1 para Demanda Bioquímica de Oxígeno

Ensayo	Proporción	pH	T °C	DBO	DBO final (mg/l)
--------	------------	----	------	-----	------------------

	lacasa Material			Inicial (mg/l)	Replica. 1	Replica. 2	Replica. 3	Promedio
1.1	1ml/5g	3.0	10	714	598	600	597	598
1.2	1ml/5g	6.0	20	714	461	460	460	460
1.3	3ml/15g	3.0	10	714	445	443	442	443
1.4	3ml/15g	6.0	20	714	308	305	307	307
1.5	5ml/25g	3.0	10	714	285	287	286	286
1.6	5ml/25g	6.0	20	714	87	87	88	87

El análisis del contaminante DQO, también muestra valores en descendencia a medida que la dosis de lacasa/material aumenta, (Ver tabla 5), con el primer tratamiento aplicado logra una disminución en la concentración promedio final de 87 mg/l (en referencia a 714 mg/l como valor inicial) con una dosis proporcional de lacasa inmovilizada en material de soporte de esferas de alginato de 5ml/25g, en condiciones de agua residual llevada a un pH 6.0 y 20°C de temperatura.

Tabla 6. Análisis post tratamiento 1 para Aceites y Grasas

Ensayo	Proporción lacasa Material	pH	T°C	AyG Inicial (mg/l)	AyG final (mg/l)			
					Replica. 1	Replica. 2	Replica. 3	Promedio
1.1	1ml/5g	3.0	10	133	105	105	106	105
1.2	1ml/5g	6.0	20	133	93	92	94	93
1.3	3ml/15g	3.0	10	133	81	80	80	80
1.4	3ml/15g	6.0	20	133	64	63	65	64
1.5	5ml/25g	3.0	10	133	56	54	55	55
1.6	5ml/25g	6.0	20	133	32	31	31	31

La tabla 6, muestra los valores obtenidos en el análisis del contaminante AyG, donde los valores denotados van descendiendo a medida que la dosis de lacasa/material aumenta, este primer tratamiento aplicado logra una disminución en la concentración promedio final de hasta 31 mg/l (en referencia a 133 mg/l como valor inicial) con una dosis proporcional de lacasa inmovilizada en material de soporte de esferas de alginato de 5ml/25g, en condiciones de agua residual llevada a un pH 6.0 y 20°C de temperatura.

Tabla 7. Análisis post tratamiento 1 para Solidos Suspendidos Totales

Ensayo	Proporción lacasa Material	pH	T °C	SST Inicial (mg/l)	SST final (mg/l)			
					Replica. 1	Replica. 2	Replica. 3	Promedio
1.1	1ml/5g	3.0	10	87	71	71	72	71
1.2	1ml/5g	6.0	20	87	65	66	66	66
1.3	3ml/15g	3.0	10	87	58	57	59	58
1.4	3ml/15g	6.0	20	87	45	43	44	44
1.5	5ml/25g	3.0	10	87	40	39	41	40
1.6	5ml/25g	6.0	20	87	23	24	24	24

El parámetro de SST, tal como se visualiza en la tabla 7, al aplicar el primer tratamiento con lacasa inmovilizada en material de soporte de esferas de alginato permitió una disminución en la concentración promedio final de hasta 24 mg/l (en referencia a 87 mg/l como valor inicial) con una dosis proporcional de 5ml/25g, en condiciones de agua residual llevada a un pH 6.0 y 20°C de temperatura.

Tabla 8. Análisis post tratamiento 1 para Sulfuro de Hidrogeno

Ensayo	Proporción lacasa Material	pH	T °C	H2S Inicial (mg/l)	H2S final (mg/l)			
					Replica. 1	Replica. 2	Replica. 3	Promedio
1.1	1ml/5g	3.0	10	41.3	35.5	34.9	35.8	35.4
1.2	1ml/5g	6.0	20	41.3	31.2	31.0	31.4	31.2
1.3	3ml/15g	3.0	10	41.3	27.3	27.0	26.5	26.9
1.4	3ml/15g	6.0	20	41.3	20.4	21.7	20.1	20.7
1.5	5ml/25g	3.0	10	41.3	18.3	18.1	17.9	18.1
1.6	5ml/25g	6.0	20	41.3	9.9	10.2	9.8	10.0

Finalmente, después de la aplicación del primer tratamiento con lacasa inmovilizada en material de soporte de esferas de alginato, se realizó el análisis del contaminante H₂S permitió una disminución en la concentración promedio final de hasta 10.0 mg/l (en referencia a 41.3 mg/l como valor inicial) con una dosis proporcional de 5ml/25g, en condiciones de agua residual llevada a un pH 6.0 y 20°C de temperatura.

Seguidamente, se dio curso a la aplicación del segundo tratamiento que consiste en lacasa inmovilizada en material de soporte silica obtenido a partir de cascara de pepino (biochar), tal como se muestra en las posteriores tablas, cada ensayo estuvo determinado por condiciones de proporción (lacasa, material), pH y temperatura, para lo cual se adaptó las muestras en tratamiento, cabe agregar que para el tratamiento 2 se tomó como muestra control (valor inicial) al muestreo 2° analizado previamente. de tal modo que se obtuvo los siguientes resultados.

Tabla 9. Análisis post tratamiento 2 para Demanda Química de Oxígeno

Ensayo	Proporción lacasa Material	pH	T °C	DQO Inicial (mg/l)	DQO final (mg/l)			
					Replica 1	Replica 2	Replica 3	Promedio
2.1	1ml/5g	3.0	10	1434	1065	1063	1066	1065
2.2	1ml/5g	6.0	20	1434	724	721	722	722
2.3	3ml/15g	3.0	10	1434	893	895	892	893
2.4	3ml/15g	6.0	20	1434	378	375	377	377
2.5	5ml/25g	3.0	10	1434	809	810	811	810
2.6	5ml/25g	6.0	20	1434	88	90	89	89

Se observa en la tabla 9, el contaminante DQO, disminuye su concentración a medida que la dosis de lacasa/material aumenta, con el segundo tratamiento aplicado permitió una disminución de la concentración en el contaminante de hasta un valor mínimo promedio de 89 mg/l (en referencia a 1434 mg/l como valor inicial) con una dosis proporcional de lacasa inmovilizada en material de soporte silica obtenido a partir de cascara de pepino (biochar), de 5ml/25g, en condiciones de agua residual llevada a un pH 6.0 y 20°C de temperatura.

Tabla 10. Análisis post tratamiento 2 para Demanda Bioquímica de Oxígeno

Ensayo	Proporción lacasa Material	pH	T °C	DBO Inicial (mg/l)	DBO final (mg/l)			
					Replica 1	Replica 2	Replica 3	Promedio
2.1	1ml/5g	3.0	10	713	547	550	549	549
2.2	1ml/5g	6.0	20	713	403	405	405	404
2.3	3ml/15g	3.0	10	713	412	410	412	411

2.4	3ml/15g	6.0	20	713	279	278	278	278
2.5	5ml/25g	3.0	10	713	231	230	230	230
2.6	5ml/25g	6.0	20	713	59	60	59	59

El análisis del contaminante DQO, también muestra valores en descendencia a medida que la dosis de lacasa/material aumenta, (Ver tabla 10), el segundo tratamiento aplicado logra una disminución en la concentración promedio final de 59 mg/l (en referencia a 713 mg/l como valor inicial) con una dosis proporcional de lacasa inmovilizada en material de soporte silica obtenido a partir de cascara de pepino (biochar), de 5ml/25g, en condiciones de agua residual llevada a un pH 6.0 y 20°C de temperatura.

Tabla 11. Análisis post tratamiento 2 para Aceites y Grasas

Ensayo	Proporción lacasa Material	pH	T °C	AyG Inicial (mg/l)	AyG final (mg/l)			
					Replica 1	Replica 2	Replica 3	Promedio
2.1	1ml/5g	3.0	10	131	98	97	97	97
2.2	1ml/5g	6.0	20	131	86	86	85	86
2.3	3ml/15g	3.0	10	131	66	65	67	66
2.4	3ml/15g	6.0	20	131	47	48	46	47
2.5	5ml/25g	3.0	10	131	35	37	37	36
2.6	5ml/25g	6.0	20	131	10	10	9	10

La tabla 11, muestra los valores obtenidos en el análisis del contaminante AyG, donde los valores denotados van descendiendo a medida que la dosis de lacasa/material aumenta, este segundo tratamiento aplicado logra una disminución en la concentración promedio final de hasta 10 mg/l (en referencia a 131 mg/l como valor inicial) con una dosis proporcional de lacasa inmovilizada en material de soporte silica obtenido a partir de cascara de pepino (biochar), de 5ml/25g, en condiciones de agua residual llevada a un pH 6.0 y 20°C de temperatura.

Tabla 12. Análisis post tratamiento 2 para Solidos Suspendidos Totales

Ensayo	Proporción lacasa Material	pH	T °C	SST Inicial (mg/l)	SST final (mg/l)			
					Replica 1	Replica 2	Replica 3	Promedio
2.1	1ml/5g	3.0	10	89	67	66	66	66
2.2	1ml/5g	6.0	20	89	61	60	61	61
2.3	3ml/15g	3.0	10	89	42	43	42	42
2.4	3ml/15g	6.0	20	89	38	38	39	38
2.5	5ml/25g	3.0	10	89	28	28	29	28
2.6	5ml/25g	6.0	20	89	8	8	7	8

El parámetro de SST, tal como se visualiza en la tabla 14, al aplicar el segundo tratamiento con lacasa inmovilizada en material de soporte silica obtenido a partir de cascara de pepino (biochar), permitió una disminución en la concentración promedio final de hasta 8 mg/l (en referencia a 89 mg/l como valor inicial) con una dosis proporcional de 5ml/25g, en condiciones de agua residual llevada a un pH 6.0 y 20°C de temperatura.

Tabla 13. Análisis post tratamiento 2 para Sulfuro de Hidrogeno

Ensayo	Proporción	pH	T °C	H2S	H2S final (mg/l)
--------	------------	----	------	-----	------------------

	lacasa Material			Inicial (mg/l)	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Promedio
2.1	1ml/5g	3.0	10	40.8	30.3	29.4	29.7	29.8
2.2	1ml/5g	6.0	20	40.8	28.9	29.2	28.7	28.9
2.3	3ml/15g	3.0	10	40.8	22.9	23.5	23.2	23.2
2.4	3ml/15g	6.0	20	40.8	16.2	16.7	17.3	16.7
2.5	5ml/25g	3.0	10	40.8	10.8	11.4	11.8	11.3
2.6	5ml/25g	6.0	20	40.8	3.5	3.0	3.2	3.2

Finalmente, después de la aplicación del segundo tratamiento con lacasa inmovilizada en material de soporte silica obtenido a partir de cascara de pepino (biochar), se realizó el análisis del contaminante H₂S permitió una disminución en la concentración promedio final de hasta 3.2 mg/l (en referencia a 40.8 mg/l como valor inicial) con una dosis proporcional de 5ml/25g, en condiciones de agua residual llevada a un pH 6.0 y 20°C de temperatura.

Finalmente, con la data obtenida anteriormente y para dar solución al tercer objetivo específico, se procedió a calcular los porcentajes de reducción de los contaminantes farmacéuticos después de la aplicación de cada tratamiento.

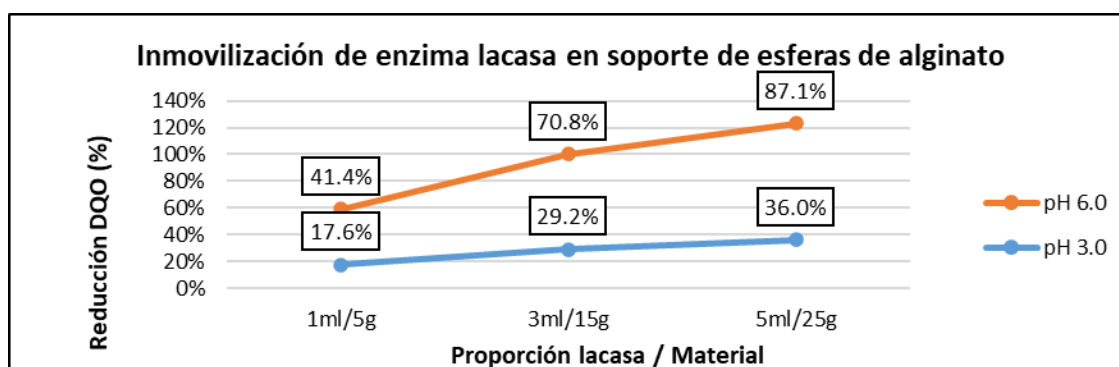


Figura 1. Porcentajes de reducción DQO con tratamiento 1

La figura 1 muestra los porcentajes de reducción del contaminante DQO con el tratamiento 1, del cual se rescata que dicha reducción fue de un máximo de 87.1% en condición de pH 6.0 y con dosis de 5ml de lacasa inmovilizada en 25 gramos de material de soporte de esferas de alginato.

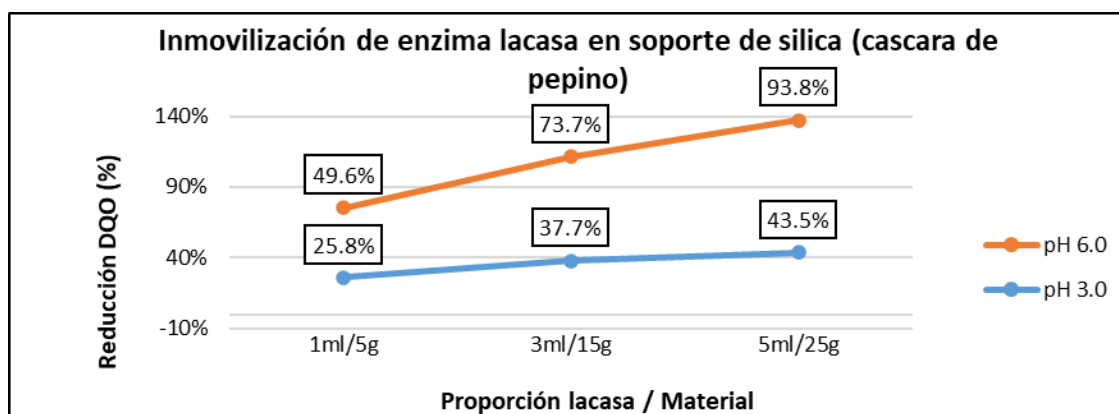


Figura 2. Porcentajes de reducción DQO con tratamiento 2

La figura 2 muestra los porcentajes de reducción del contaminante DQO con el tratamiento 2, del cual se rescata que dicha reducción fue de un máximo de 93.8% en condición de pH 6.0 y con dosis de 5ml de lacasa inmovilizada en 25 gramos de material de soporte silica obtenido a partir de cascara de pepino (biochar).

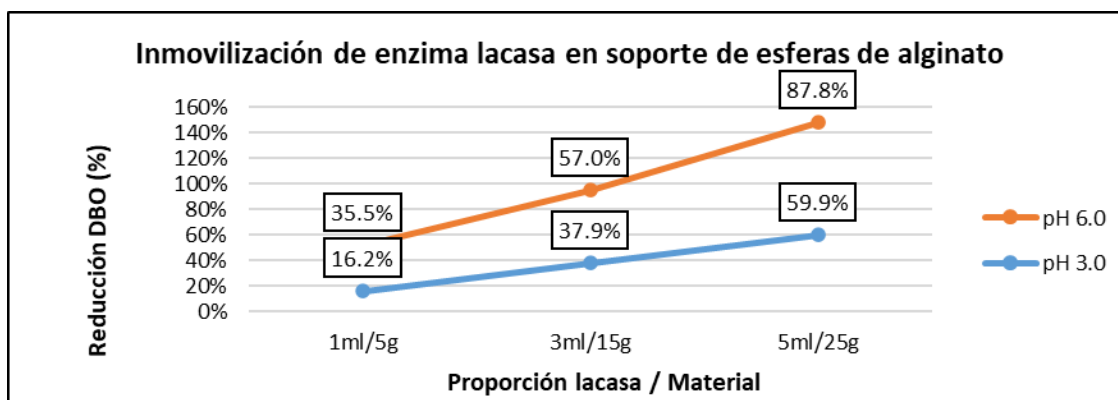


Figura 3. Porcentajes de reducción DBO con tratamiento 1

La figura 3 muestra los porcentajes de reducción del contaminante DBO con el tratamiento 1, del cual se rescata que dicha reducción fue de un máximo de 87.8% en condición de pH 6.0 y con dosis de 5ml de lacasa inmovilizada en 25 gramos de material de soporte de esferas de alginato.

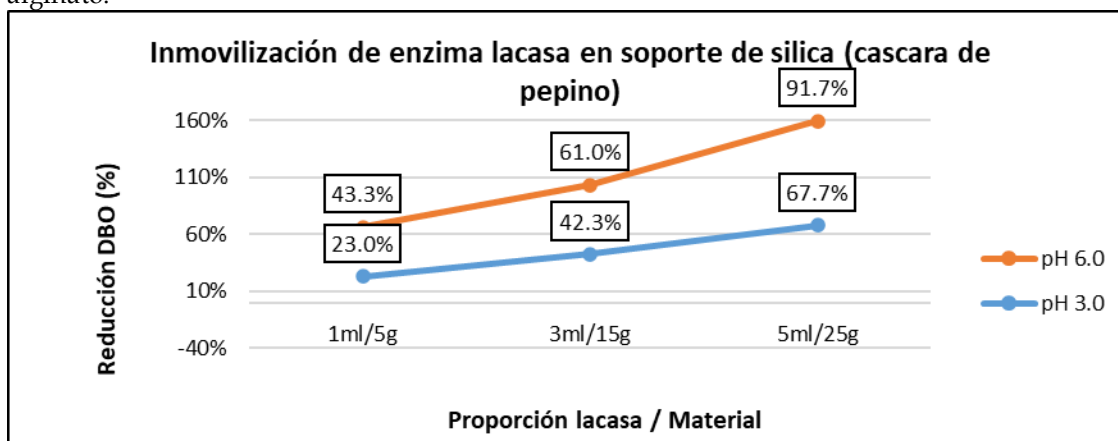


Figura 4. Porcentajes de reducción DBO con tratamiento 2

La figura 4 muestra los porcentajes de reducción del contaminante DBO con el tratamiento 2, del cual se rescata que dicha reducción fue de un máximo de 91.7% en condición de pH 6.0 y con dosis de 5ml de lacasa inmovilizada en 25 gramos de material de soporte silica obtenido a partir de cascara de pepino (biochar).

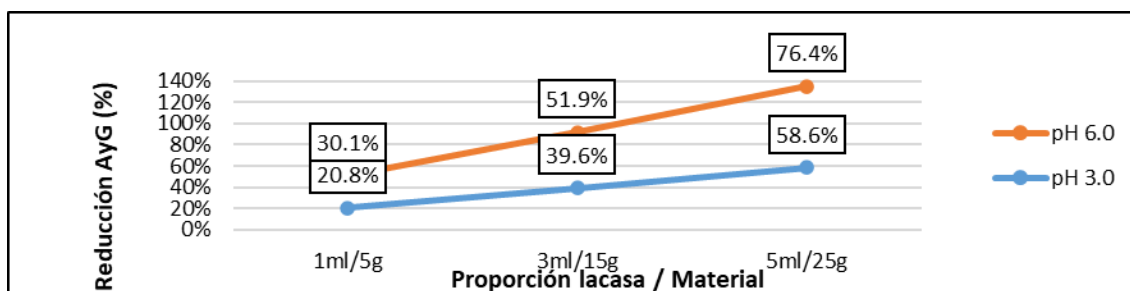


Figura 5. Porcentajes de reducción Aceites y Grasas con tratamiento 1

La figura 5 muestra los porcentajes de reducción del contaminante AyG con el tratamiento 1, del cual se rescata que dicha reducción fue de un máximo de 76.4% en condición de pH 6.0 y con dosis de 5ml de lacasa inmovilizada en 25 gramos de material de soporte de esferas de alginato.

alginato.

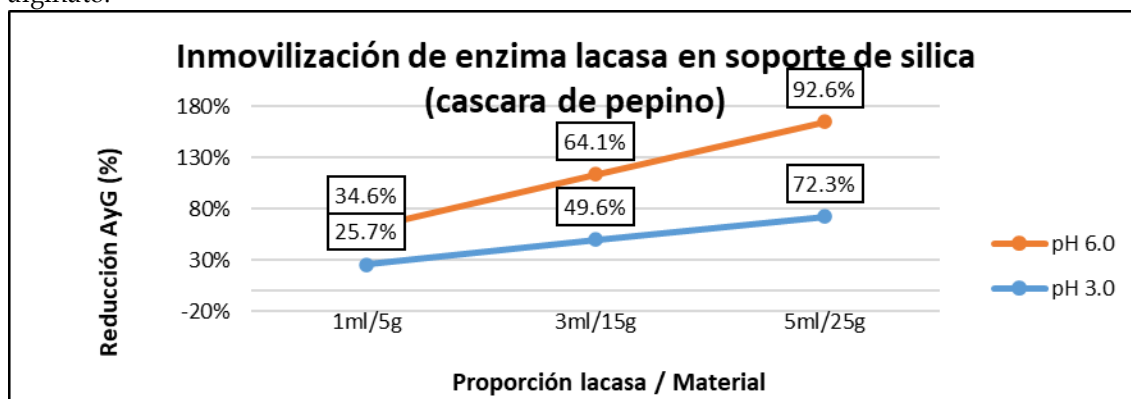


Figura 6. Porcentajes de reducción Aceites y Grasas con tratamiento 2

La figura 6 muestra los porcentajes de reducción del contaminante AyG con el tratamiento 2, del cual se rescata que dicha reducción fue de un máximo de 92.6% en condición de pH 6.0 y con dosis de 5ml de lacasa inmovilizada en 25 gramos de material de soporte silica obtenido a partir de cascara de pepino (biochar).

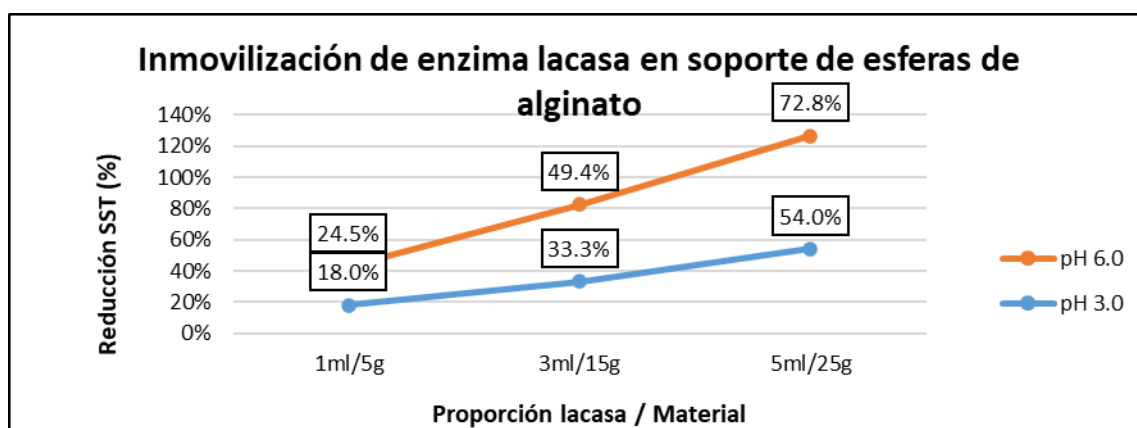


Figura 7. Porcentajes de reducción SST con tratamiento 1

La figura 7 muestra los porcentajes de reducción del contaminante SST con el tratamiento 1, del cual se rescata que dicha reducción fue de un máximo de 72.8% en condición de pH 6.0 y con dosis de 5ml de lacasa inmovilizada en 25 gramos de material de soporte de esferas de alginato.

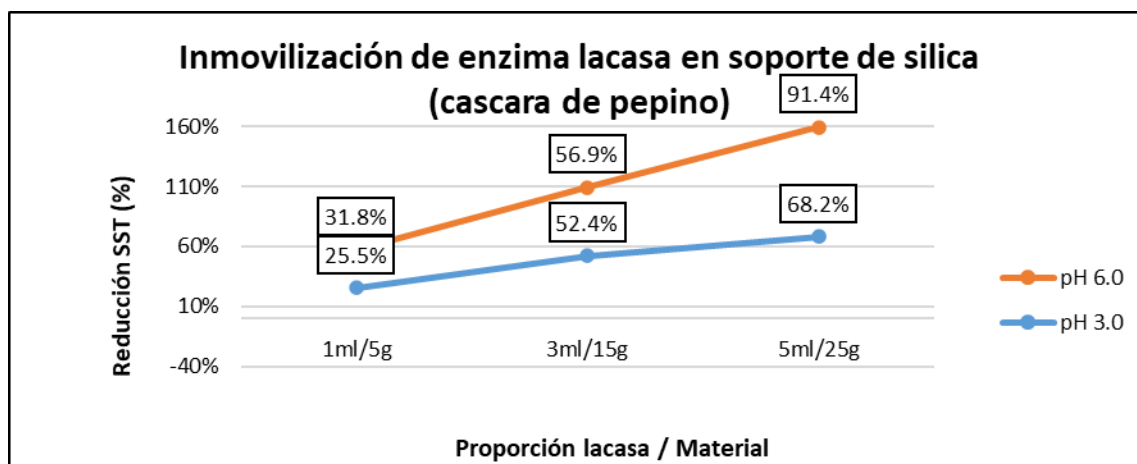


Figura 8. Porcentajes de reducción SST con tratamiento 2

La figura 8 muestra los porcentajes de reducción del contaminante SST con el tratamiento 2, del cual se rescata que dicha reducción fue de un máximo de 91.4% en condición de pH 6.0 y con dosis de 5ml de lacasa inmovilizada en 25 gramos de material de soporte silica obtenido a partir de cascara de pepino (biochar).

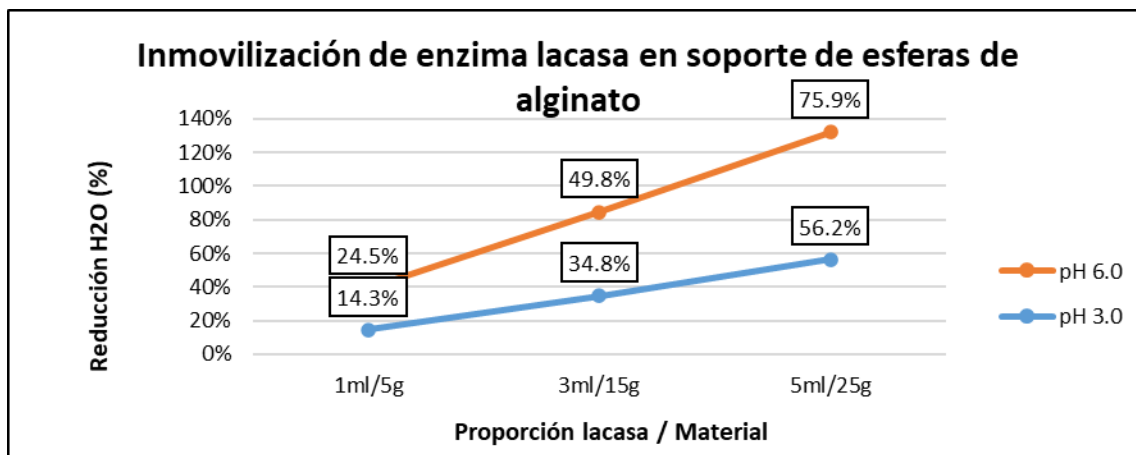


Figura 9. Porcentajes de reducción H₂S con tratamiento 1

La figura 9 muestra los porcentajes de reducción del contaminante H₂S con el tratamiento 1, del cual se rescata que dicha reducción fue de un máximo de 75.9% en condición de pH 6.0 y con dosis de 5ml de lacasa inmovilizada en 25 gramos de material de soporte de esferas de alginato.

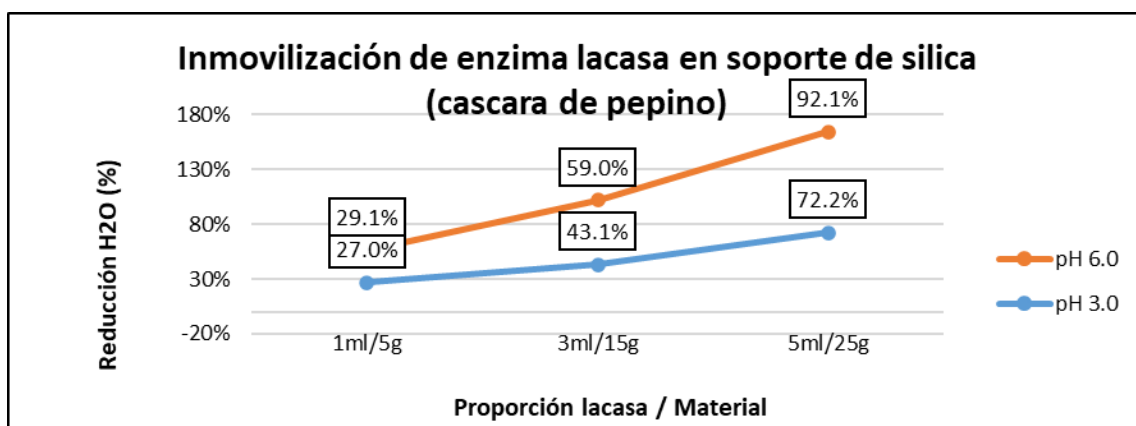


Figura 10. Porcentajes de reducción H₂S con tratamiento 2

La figura 10 muestra los porcentajes de reducción del contaminante H₂S con el tratamiento 2, del cual se rescata que dicha reducción fue de un máximo de 91.4% en condición de pH 6.0 y con dosis de 5ml de lacasa inmovilizada en 25 gramos de material de soporte silica obtenido a partir de cascara de pepino (biochar).

Análisis estadístico

El estudio abordó tres problemas específicos relacionados con la eficacia de la bioactivación de la lacasa en la eliminación de contaminantes farmacéuticos en aguas residuales a nivel de laboratorio.

En primer lugar, se identificaron los contaminantes farmacéuticos más relevantes presentes en el agua residual sintética. Este análisis tuvo un enfoque descriptivo, representado en la Figura 11, que muestra las concentraciones iniciales de cada compuesto, sin aplicación de pruebas inferenciales debido a la naturaleza exploratoria del objetivo.

En segundo lugar, se evaluaron las condiciones de tratamiento que optimizan la eliminación de contaminantes mediante la aplicación de lacasa, considerando variaciones de pH, temperatura y

proporción enzima/soporte. Finalmente, se determinó el porcentaje de reducción de los contaminantes farmacéuticos, comparando las concentraciones iniciales y finales tras el tratamiento enzimático.

Los resultados inferenciales se presentan en la Tabla 16, correspondiente a la prueba ANOVA aplicada para comparar los niveles de eficiencia en la eliminación de la demanda química de oxígeno (DQO). El análisis mostró una diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos ($F = 140207,97$; $p = 0,000$), lo que indica que las condiciones experimentales influyeron de manera determinante en la eficiencia del proceso. En conclusión, la bioactivación con lacasa demostró un efecto significativo en la reducción de los contaminantes farmacéuticos en el agua residual bajo las condiciones óptimas establecidas.

Tabla 14. Prueba ANOVA para comparar los niveles de eficiencia para eliminación de DQO en agua residual

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	10515,598	5	2103,120	140207,970	0,000
Dentro de grupos	,180	12	,015		
Total	10515,778	17			

Sobre la base de la prueba ANOVA se determinó que los niveles de eficiencia son estadísticamente diferentes para el tratamiento de DQO en agua residual (Sig=0.000 menor que 0.05).

Tabla 15. Prueba de Tukey para comparar los niveles de eficiencia para eliminación de DQO en agua residual

HSD Tukey ^a	N	Subconjunto para alfa = 0.05					
grupos		1	2	3	4	5	6
1 ml/5g, PH=3, temp= 10	3	17.63					
3 ml/15g, PH=3, temp= 10	3		29.20				
5 ml/25g, PH=3, temp= 10	3			35.97			
1 ml/5g, PH=6, temp= 20	3				41.40		
3 ml/15g, PH=6, temp= 20	3					70.77	
5 ml/25g, PH=6, temp= 20	3						87.10

Sobre la base de la prueba de Tukey se concluye a 5ml/25g, PH=6 y temperatura de 20 la eficiencia media es significativamente mayor (87.10%) con respecto a las otras condiciones analizadas.

Tabla 16. Prueba ANOVA para comparar los niveles de eficiencia para eliminación de DBO en agua residual

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	9201,283	5	1840,257	66249,236	0,000
Dentro de grupos	,333	12	,028		
Total	9201,616	17			

Sobre la base de la prueba ANOVA se determinó que los niveles de eficiencia son estadísticamente diferentes para el tratamiento de DBO en agua residual (Sig=0.000 menor que 0.05).

Tabla 17. Prueba de Tukey para comparar los niveles de eficiencia para eliminación de DBO en agua residual

HSD Tukey ^a	N	Subconjunto para alfa = 0.05					
grupos		1	2	3	4	5	6
1 ml/5g, PH=3, temp= 10	3	16.20					
3 ml/15g, PH=3, temp= 10	3		35.53				
5 ml/25g, PH=3, temp= 10	3			37.93			
1 ml/5g, PH=6, temp= 20	3				57.07		

3 ml/15g, PH=6, temp= 20	3					59.93	
5 ml/25g, PH=6, temp= 20	3						87.77

Sobre la base de la prueba de Tukey y para el tratamiento de DBO en agua residual, se concluye a 5ml/25g, PH=6 y temperatura de 20 la eficiencia media es significativamente mayor (87.77%) con respecto a las otras condiciones analizadas.

Tabla 18. Prueba ANOVA para comparar los niveles de eficiencia para eliminación de Aceites y Grasas en agua residual

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	6145,500	5	1229,100	3234,474	0.000
Dentro de grupos	4,560	12	,380		
Total	6150,060	17			

Sobre la base de la prueba ANOVA se determinó que los niveles de eficiencia son estadísticamente diferentes para el tratamiento de aceites y grasas en agua residual (Sig=0.000 menor que 0.05).

Tabla 19. Prueba de Tukey para comparar los niveles de eficiencia para eliminación de Aceites y Grasas en agua residual

HSD Tukey ^a	N	Subconjunto para alfa = 0.05					
grupos		1	2	3	4	5	6
1 ml/5g, PH=3, temp= 10	3	20.83					
1 ml/5g, PH=6, temp= 20	3		30.07				
3 ml/15g, PH=3, temp= 10	3			39.57			
3 ml/15g, PH=6, temp= 20	3				51.87		
5 ml/25g, PH=3, temp= 10	3					58.63	
5 ml/25g, PH=6, temp= 20	3						76.43

Sobre la base de la prueba de Tukey y para el tratamiento de Aceites y Grasas en agua residual, se concluye a 5ml/25g, PH=6 y temperatura de 20 la eficiencia media es significativamente mayor (76.43%) con respecto a las otras condiciones analizadas.

Tabla 20. Prueba ANOVA para comparar los niveles de eficiencia para eliminación de Solidos Suspendidos Totales en agua residual

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	6318,165	5	1263,633	1401,441	0.000
Dentro de grupos	10,820	12	,902		
Total	6328,985	17			

Sobre la base de la prueba ANOVA se determinó que los niveles de eficiencia son estadísticamente diferentes para el tratamiento de Solidos Suspendidos Totales en agua residual (Sig=0.000 menor que 0.05).

Tabla 21. Prueba de Tukey para comparar los niveles de eficiencia para eliminación de Solidos Suspendidos Totales en agua residual

HSD Tukey ^a	N	Subconjunto para alfa = 0.05					
grupos		1	2	3	4	5	6
1 ml/5g, PH=3, temp= 10	3	18.00					
1 ml/5g, PH=6, temp= 20	3		24.50				
3 ml/15g, PH=3, temp= 10	3			33.33			
3 ml/15g, PH=6, temp= 20	3				49.43		
5 ml/25g, PH=3, temp= 10	3					54.03	
5 ml/25g, PH=6, temp= 20	3						72.80

Sobre la base de la prueba de Tukey y para el tratamiento de Sólidos Suspendedos Totales en agua residual, se concluye que a 5ml/25g, PH=6 y temperatura de 20 la eficiencia media es significativamente mayor (72.80%) con respecto a las otras condiciones analizadas.

Tabla 22. Prueba ANOVA para comparar los niveles de eficiencia para eliminación de Sulfuro de Hidrogeno en agua residual

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	7609,256	5	1521,851	1305,687	0.000
Dentro de grupos	13,987	12	1,166		
Total	7623,243	17			

Sobre la base de la prueba ANOVA se determinó que los niveles de eficiencia son estadísticamente diferentes para el tratamiento de Sulfuro de Hidrogeno en agua residual (Sig=0.000 menor que 0.05).

Tabla 23. Prueba de Tukey para comparar los niveles de eficiencia para eliminación de Sulfuro de Hidrogeno en agua residual

HSD Tukey ^a	N	Subconjunto para alfa = 0.05					
grupos		1	2	3	4	5	6
1 ml/5g, PH=3, temp= 10	3	14.27					
1 ml/5g, PH=6, temp= 20	3		24.47				
3 ml/15g, PH=3, temp= 10	3			34.77			
3 ml/15g, PH=6, temp= 20	3				49.80		
5 ml/25g, PH=3, temp= 10	3					56.20	
5 ml/25g, PH=6, temp= 20	3						75.87

Sobre la base de la prueba de Tukey y para el tratamiento de Sulfuro de Hidrogeno en agua residual, se concluye que a 5ml/25g, PH=6 y temperatura de 20 la eficiencia media es significativamente mayor (75.87%) con respecto a las otras condiciones analizadas.

Para tratamiento 2

Tabla 24. Prueba ANOVA para comparar los niveles de eficiencia para eliminación de DQO en agua residual

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	9492.772	5	1898.554	170869.890	0.000
Dentro de grupos	0.133	12	0.011		
Total	9492.905	17			

Sobre la base de la prueba ANOVA se determinó que los niveles de eficiencia son estadísticamente diferentes para el tratamiento de DQO en agua residual (Sig=0.000 menor que 0.05).

Tabla 25. Prueba de Tukey para comparar los niveles de eficiencia para eliminación de DQO en agua residual

HSD Tukey ^a	N	Subconjunto para alfa = 0.05					
grupos		1	2	3	4	5	6
1 ml/5g, PH=3, temp= 10	3	25.77					
3 ml/15g, PH=3, temp= 10	3		37.70				
5 ml/25g, PH=3, temp= 10	3			43.50			
1 ml/5g, PH=6, temp= 20	3				49.63		
3 ml/15g, PH=6, temp= 20	3					73.70	
5 ml/25g, PH=6, temp= 20	3						93.80

Sobre la base de la prueba de Tukey y para el tratamiento de DQO en agua residual, se concluye que a 5ml/25g, PH=6 y temperatura de 20 la eficiencia media es significativamente mayor (93.80%) con respecto a las otras condiciones analizadas.

Tabla 26. Prueba ANOVA para comparar los niveles de eficiencia para eliminación de DBO en agua residual

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	8574.689	5	1714.938	90790.829	0.000
Dentro de grupos	0.227	12	0.019		
Total	8574.916	17			

Sobre la base de la prueba ANOVA se determinó que los niveles de eficiencia son estadísticamente diferentes para el tratamiento de DBO en agua residual (Sig=0.000 menor que 0.05).

Tabla 27. Prueba de Tukey para comparar los niveles de eficiencia para eliminación de DBO en agua residual

HSD Tukey ^a	N	Subconjunto para alfa = 0.05					
grupos		1	2	3	4	5	6
1 ml/5g, PH=3, temp= 10	3	23.07					
3 ml/15g, PH=3, temp= 10	3		42.30				
5 ml/25g, PH=3, temp= 10	3			43.30			
1 ml/5g, PH=6, temp= 20	3				60.97		
3 ml/15g, PH=6, temp= 20	3					67.67	
5 ml/25g, PH=6, temp= 20	3						91.67

Sobre la base de la prueba de Tukey y para el tratamiento de DBO en agua residual, se concluye que a 5ml/25g, PH=6 y temperatura de 20 la eficiencia media es significativamente mayor (91.67%) con respecto a las otras condiciones analizadas.

Tabla 28. Prueba ANOVA para comparar los niveles de eficiencia para eliminación de Aceites y Grasas en agua residual

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	9256.244	5	1851.249	4596.204	0.000
Dentro de grupos	4.833	12	0.403		
Total	9261.078	17			

Sobre la base de la prueba ANOVA se determinó que los niveles de eficiencia son estadísticamente diferentes para el tratamiento de aceites y grasas en agua residual (Sig=0.000 menor que 0.05).

Tabla 29. Prueba de Tukey para comparar los niveles de eficiencia para eliminación de aceites y grasas en agua residual

HSD Tukey ^a	N	Subconjunto para alfa = 0.05					
grupos		1	2	3	4	5	6
1 ml/5g, PH=3, temp= 10	3	25.73					
1 ml/5g, PH=6, temp= 20	3		34.63				
3 ml/15g, PH=3, temp= 10	3			49.63			
3 ml/15g, PH=6, temp= 20	3				64.13		
5 ml/25g, PH=3, temp= 10	3					72.30	
5 ml/25g, PH=6, temp= 20	3						92.63

Sobre la base de la prueba de Tukey y para el tratamiento de aceites y grasas en agua residual, se concluye que a 5ml/25g, PH=6 y temperatura de 20 la eficiencia media es significativamente mayor (92.63%) con respecto a las otras condiciones analizadas.

Tabla 30. Prueba ANOVA para comparar los niveles de eficiencia para eliminación de Sólidos Suspendidos Totales en agua residual

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	8736.703	5	1747.341	4332.249	0.000
Dentro de grupos	4.840	12	0.403		
Total	8741.543	17			

Sobre la base de la prueba ANOVA se determinó que los niveles de eficiencia son estadísticamente diferentes para el tratamiento de Sólidos Suspendidos Totales en agua residual (Sig=0.000 menor que 0.05).

Tabla 31. Prueba de Tukey para comparar los niveles de eficiencia para eliminación de Sólidos Suspendidos Totales en agua residual

HSD Tukey ^a	N	Subconjunto para alfa = 0.05					
grupos		1	2	3	4	5	6
1 ml/5g, PH=3, temp= 10	3	25.43					
1 ml/5g, PH=6, temp= 20	3		31.87				
3 ml/15g, PH=3, temp= 10	3			52.43			
3 ml/15g, PH=6, temp= 20	3				56.93		
5 ml/25g, PH=3, temp= 10	3					68.13	
5 ml/25g, PH=6, temp= 20	3						91.37

Sobre la base de la prueba de Tukey y para el tratamiento de Sólidos Suspendidos Totales en agua residual, se concluye que a 5ml/25g, PH=6 y temperatura de 20 la eficiencia media es significativamente mayor (91.37%) con respecto a las otras condiciones analizadas.

Tabla 32. Prueba ANOVA para comparar los niveles de eficiencia para eliminación de Sulfuro de Hidrogeno en agua residual

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	9830.498	5	1966.100	1994.915	0.000
Dentro de grupos	11.827	12	0.986		
Total	9842.324	17			

Sobre la base de la prueba ANOVA se determinó que los niveles de eficiencia son estadísticamente diferentes para el tratamiento de Sulfuro de Hidrogeno en agua residual (Sig=0.000 menor que 0.05).

Tabla 33. Prueba de Tukey para comparar los niveles de eficiencia para eliminación de Sulfuro de Hidrogeno en agua residual

HSD Tukey ^a	N	Subconjunto para alfa = 0.05				
grupos		1	2	3	4	5
1 ml/5g, PH=3, temp= 10	3	26.93				
1 ml/5g, PH=6, temp= 20	3	29.10				
3 ml/15g, PH=3, temp= 10	3		43.13			
3 ml/15g, PH=6, temp= 20	3			59.00		
5 ml/25g, PH=3, temp= 10	3				72.23	
5 ml/25g, PH=6, temp= 20	3					92.07

Sobre la base de la prueba de Tukey y para el tratamiento de Sulfuro de Hidrogeno en agua residual, se concluye que a 5ml/25g, PH=6 y temperatura de 20 la eficiencia media es significativamente mayor (92.07%) con respecto a las otras condiciones analizadas.

Tabla 34. Comparación de valores para tratamientos analizados a 5ml/25g, PH=6 y temperatura de 20° C

	Tratamiento 1: Inmovilización de enzima lacasa en soporte de esferas de alginato	Tratamiento 2: Inmovilización de enzima lacasa en soporte de silica obtenido a partir de cascara de pepino (biochar):	P-valor entre tratamientos	P-valor de tratamiento 2 con 90% (*)
DQO final (mg/l)	87.10	93.80	0.000	0.000
DBO final (mg/l)	87.77	91.67	0.000	0.000
Aceites y Grasas	76.43	92.63	0.000	0.004
Sólidos Suspendidos Totales	72.80	91.37	0.000	0.033
Sulfuro de Hidrogeno	75.87	92.07	0.000	0.014
* prueba unilateral mayor que				

Sobre la base de la prueba T de Student se concluye que en todos los casos la eficiencia del tratamiento 2 es significativamente mayor que la eficiencia del tratamiento 1 (todos los valores de Sig son menores que 0.05). Sobre la afirmación de que la eficiencia es superior al 90% se realizó una prueba T de Student entre los resultados del tratamiento 2 y se comparó con el 90%, el resultado indica que esta afirmación es real, ya que todos los pvalor resultaron menores que 0.05 (pvalor =0.000 para DQO, Pvalor=0.000 para DBO, pvalor =0.004 para aceites y grasas, pvalor =0.033 para Sólidos Suspendidos Totales y pvalor=0.014 para Sulfuro de Hidrogeno).

4. Conclusiones

Como conclusión general de mi objetivo de estudio se analizó la bioactivación con lacasa para la eliminación de contaminantes farmacéuticos en aguas residuales, determinando que las condiciones óptimas de tratamiento involucran una dosis proporcional de lacasa inmovilizada en material de soporte de 5ml/25g, un pH de 6.0 y una temperatura de 20°C, utilizando lacasa inmovilizada en material de soporte silica obtenido a partir de cascara de pepino (biochar), lo que permite una reducción de hasta 93.8% de los contaminantes farmacéuticos presentes en las aguas residuales, demostrando la eficacia de la lacasa en la eliminación de estos contaminantes

Como primera conclusión, se determinó que los contaminantes farmacéuticos más relevantes presentes en las aguas residuales a nivel laboratorio son la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), los Aceites y Grasas (AyG), los Sólidos Suspendidos Totales (SST) y el Sulfuro de Hidrógeno (H₂S), lo que indica la necesidad de implementar tratamientos efectivos para eliminar estos contaminantes y mejorar la calidad del agua residual.

Se determinaron las condiciones de tratamiento con aplicación de lacasa que permiten la eliminación de contaminantes farmacéuticos en aguas residuales, las cuales consisten en una dosis proporcional de lacasa inmovilizada en material de soporte de 5ml/25g, un pH de 6.0 y una temperatura de 20°C, utilizando lacasa inmovilizada en material de soporte silica obtenido a partir de cascara de pepino (biochar), lo que permitió una disminución significativa en la concentración de los contaminantes analizados.

Se logró determinar el porcentaje de reducción de los contaminantes farmacéuticos después de la aplicación de lacasa en aguas residuales, obteniendo valores que oscilan entre 75.9% y 93.8%, lo que confirma la eficacia de la lacasa en la eliminación de estos contaminantes en aguas residuales.

Financiamiento

Ninguno.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Contribución de autoría

G. P. C-F & L. F-P.: Conceptualización, análisis formal, investigación, metodología, curación y tratamiento de datos, recopilación de datos, escritura (preparación del borrador final) y supervisión.

Referencias bibliográficas

- Agustin, Melissa B., et al. Laccase as a tool in building advanced lignin-based materials. *ChemSusChem*, 2021, vol. 14, no 21, p. 4615-4635. <https://doi.org/10.1002/cssc.202101169>
- Ahmad, Imran, et al. Catalytic insights into laccase for sustainable remediation of multifaceted pharmaceutically active micropollutants from water matrices: A state-of-art review. *Journal of Water Process Engineering*, 2025, vol. 70, p. 106901. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106901>
- Al-Sareji, Osamah J., et al. Efficient removal of pharmaceutical contaminants from water and wastewater using immobilized laccase on activated carbon derived from pomegranate peels. *Scientific Reports*, 2023, vol. 13, no 1, p. 11933. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38821-3>
- Almufarij, Rasmiah S.; Abdulkhair, Babiker Y.; Salih, M. Fast-simplistic fabrication of MoO₃@Al₂O₃-MgO triple nanocomposites for efficient elimination of pharmaceutical contaminants. *Results in Chemistry*, 2024, vol. 7, p. 101281. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2023.101281>
- Alokpa, Komla; Vaidyanathan, Vinoth Kumar; Cabana, Hubert. Immobilization of laccase for industrial wastewater treatment: Current challenges and future perspectives. En *Laccase and Polyphenol Oxidase*. Academic Press, 2025. p. 187-246. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13301-5.00008-1>
- Alokpa, Komla; Lafortune, François; Cabana, Hubert. Application of laccase and hydrolases for trace organic contaminants removal from contaminated water. *Environmental Advances*, 2022, vol. 8, p. 100243. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100243>
- Aza, Pablo; Camarero, Susana. Fungal laccases: Fundamentals, engineering and classification update. *Biomolecules*, 2023, vol. 13, no 12, p. 1716. <https://doi.org/10.3390/biom13121716>
- Bai, Yongsheng, et al. Characterization of plant laccase genes and their functions. *Gene*, 2023, vol. 852, p. 147060. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2022.147060>
- Barber-Zucker, Shiran, et al. Designed high-redox potential laccases exhibit high functional diversity. *ACS catalysis*, 2022, vol. 12, no 21, p. 13164-13173. <https://doi.org/10.1021/acscatal.2c03006>
- Boni, M. R., et al. A novel treatment for Cd-contaminated solution through adsorption on beech charcoal: The effect of bioactivation. *Desalination and water treatment*, 2018, vol. 127, p. 104-110. <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22664>
- Chandra, Muni Ramanna Gari Subhosh; MADAKKA, Mekapogu. Comparative biochemistry

- and kinetics of microbial lignocellulolytic enzymes. En *Recent developments in applied microbiology and biochemistry*. Academic Press, 2019. p. 147-159.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816328-3.00011-8>
- Ghose, Anamika, et al. Micropollutants (ciprofloxacin and norfloxacin) remediation from wastewater through laccase derived from spent mushroom waste: Fate, toxicity, and degradation. *Journal of Environmental Management*, 2024, vol. 366, p. 121857.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121857>
- Gome, A.; Upadhyay, K. Removal of persistent chemical oxygen demand from pharmaceutical wastewater by ozonation at different pH. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2023, vol. 20, no 2, p. 2087-2098. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-03915-4>
- González Martínez, Constancio. La Investigación básica. La investigación en ciencias fisiológicas: bioquímica, biología molecular y fisiología. Cuestiones previas. *Educación médica*, 2004, vol. 7, p. 41-50. ISSN 1575-1813
- Gu, Haolun, et al. Bioinspired bimetallic metal-organic framework nanozyme with laccase-mimicking activity for detection and removal of phenolic contaminants. *Microchemical Journal*, 2024, vol. 201, p. 110568. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.110568>
- Han, Meina, et al. Cytoprotective alginate microcapsule serves as a shield for microalgal encapsulation defending sulfamethoxazole threats and safeguarding nutrient recovery. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, vol. 465, p. 133454.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133454>
- Hassan, Ayat, et al. Bio-activation and mathematical modeling of ZIF-L encapsulated with laccase for enhanced ibuprofen removal from wastewater. *Cleaner Engineering and Technology*, 2024, p. 100875. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100875>
- Hashempour, Yalda, et al. Co-immobilization of laccase and zinc oxide nanoparticles onto bacterial cellulose to achieve synergistic effect of photo and enzymatic catalysis for biodegradation of favipiravir. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, p. 139288. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.139288>
- Hu, Yingli, et al. Lipase immobilization on macroporous ZIF-8 for enhanced enzymatic biodiesel production. *ACS omega*, 2021, vol. 6, no 3, p. 2143-2148.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05225>
- Hu, Xiaolei, et al. MIL-100-Fe self-assembled cellulose nanofibers sponge for Diclofenac cascade encapsulation. *Carbohydrate Polymers*, 2024, p. 123182.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.123182>
- Iñiguez, Pedro Cadena, et al. Métodos cuantitativos, métodos cualitativos o su combinación en la investigación: un acercamiento en las ciencias sociales. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2017, vol. 8, no 7, p. 1603-1617. ISSN 2007-0934
- Janusz, Grzegorz, et al. Laccase properties, physiological functions, and evolution. *International journal of molecular sciences*, 2020, vol. 21, no 3, p. 966.
<https://doi.org/10.3390/ijms21030966>
- Kinga Skalska-Tuomi, et al. Efficient removal of pharmaceuticals from wastewater: Comparative study of three advanced oxidation processes. Volume 375, February 2025, 124276. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124276>
- Kumar, Ramesh, et al. Advancing pharmaceutical wastewater treatment: A comprehensive review on application of catalytic membrane reactor-based hybrid approaches. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, vol. 58, p. 104838.
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.104838>
- Majumder, Abhradeep; GUPTA, Bramha; GUPTA, Ashok Kumar. Pharmaceutically active compounds in aqueous environment: A status, toxicity and insights of

- remediation. *Environmental research*, 2019, vol. 176, p. 108542. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108542>
- Mehra, Rukmankesh, et al. A structural-chemical explanation of fungal laccase activity. *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, no 1, p. 17285. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35633-8>
- Nguyen, Minh-Ky, et al. Occurrence and fate of pharmaceutical pollutants in wastewater: Insights on ecotoxicity, health risk, and state-of-the-art removal. *Chemosphere*, 2024, p. 141678. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141678>
- Nguyen D. et al. Microplastics and pharmaceuticals from water and wastewater: Occurrence, impacts, and membrane bioreactor-based removal. *Separation and Purification Technology*. 2025, p. 131489. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.131489>
- Peng, Quancai, et al. Pharmaceutically active compounds (PhACs) in surface sediments of the Jiaozhou Bay, north China. *Environmental Pollution*, 2020, vol. 266, p. 115245. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115245>
- Peña-Guzmán, Carlos, et al. Emerging pollutants in the urban water cycle in Latin America: A review of the current literature. *Journal of environmental management*, 2019, vol. 237, p. 408-423. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.100>
- Pinheiro, Bruna B., et al. Genipin and glutaraldehyde based laccase two-layers immobilization with improved properties: New biocatalysts with high potential for enzymatic removal of trace organic contaminants. *Enzyme and Microbial Technology*, 2023, vol. 169, p. 110261. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2023.110261>
- Salgado Costa, Carolina, et al. Linking environmental exposure and effects of pharmaceuticals on aquatic biota: state of knowledge in Latin America. 2023. <https://doi.org/10.20517/wecn.2023.08>
- Singh, Anil Kumar, et al. Laccase-based biocatalytic systems application in sustainable degradation of pharmaceutically active contaminants. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, p. 136803. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136803>
- Valdez-Carrillo, Melissa, et al. Pharmaceuticals as emerging contaminants in the aquatic environment of Latin America: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 27, p. 44863-44891. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10842-9>
- Vallejo Maite. El diseño de investigación: una breve revisión metodológica. *Archivos de cardiología de México*, 2002, vol. 72, no 1, p. 8-12. ISSN 1405-9940
- Wang, Hao, et al. Laccase immobilization and its degradation of emerging pollutants: A comprehensive review. *Journal of Environmental Management*, 2024, vol. 359, p. 120984. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120984>
- Wang, Zhaobo, et al. Study on improving the stability of adsorption-encapsulation immobilized Laccase@ ZIF-67. *Biotechnology Reports*, 2020, vol. 28, p. e00553. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00553>
- Yang, Xue, et al. Encapsulated laccase in bimetallic Cu/Zn ZIFs as stable and reusable biocatalyst for decolorization of dye wastewater. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, vol. 233, p. 123410. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123410>
- Zhu, Mengzhen, et al. The electron shuttle of aloe-emodin promotes the Cu-FeOOH solid solution photocatalytic membrane to activate hydrogen peroxide for the degradation of tannic in traditional Chinese medicine wastewater. *Applied Catalysis B: Environment and Energy*, 2025, vol. 361, p. 124566. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2024.124566>