

Artículo original

Oxidación catalítica de fenol en efluentes de la parbolización del arroz: una estrategia hacia la economía circular

Catalytic oxidation of phenol in rice parboiling effluents: a strategy toward a circular economy

Yury M. Peralta^{1,2}, Rafael Molina¹, Sonia Moreno^{1,*}

¹ Estado Sólido y Catálisis Ambiental (ESCA), Departamento de Química, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

² Escuela de ciencias básicas, tecnología e ingeniería, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Yopal, Colombia

Resumen

Los efluentes procedentes de la parbolización del arroz contienen compuestos no biodegradables que resultan tóxicos para los ecosistemas acuáticos. En este estudio, se utilizó un catalizador de Fe altamente disperso sobre sílice obtenida de cascarilla de arroz ($5\text{Fe}@\text{SiO}_2$) para la reacción de oxidación del fenol presente en aguas residuales de la parbolización del arroz. La reacción se hizo a 25 °C y a presión atmosférica. El catalizador alcanzó una reducción de la demanda química de oxígeno (DQO) del 67 ± 3 %, una mineralización del $68,4 \pm 2,2$ % y una conversión de fenol del $81,4 \pm 2$ % después de 36 horas. El rendimiento del catalizador en la oxidación de fenol demuestra el potencial de aplicación del material en el tratamiento de aguas residuales. Dichos sistemas constituyen una estrategia para la conservación de los recursos naturales y la preservación de la biodiversidad en Colombia. Este estudio constituye una contribución a la estrategia de transición hacia la economía circular.

Palabras clave: catalizador; oxidación; agua residual; fenol; economía circular.

Abstract

Rice parboiling effluents contain non-biodegradable compounds that are toxic to aquatic ecosystems. Here, we used a highly dispersed Fe catalyst supported on rice husk-derived silica ($5\text{Fe}@\text{SiO}_2$) to oxidize phenol in rice parboiling wastewater. The reaction was carried out at 25 °C under atmospheric pressure. The catalyst achieved a 67% reduction in chemical oxygen demand (COD), 68.4% mineralization, and 81.4% phenol conversion after 36 hours. These results demonstrate the catalyst's potential for application in wastewater treatment, whose implementation represents a valuable strategy for conserving natural resources and preserving biodiversity in Colombia. Our results contribute to the transition toward a circular economy by promoting the valorization of rice husk-derived silica as a sustainable catalyst support.

Keywords: Catalyst; oxidation; wastewater; phenol; circular economy.

Introducción

El procesamiento del arroz que conserva su cáscara después de la trilla genera una considerable cantidad de residuos sólidos y un gran volumen de aguas residuales tóxicas (Rajesh *et al.*, 1999; Zou & Yang, 2019; FAO, 2026). Durante el primer semestre de 2026 se registró en Colombia una producción nacional de 876.400 toneladas de arroz (DANE, 2026). El aumento de la población y la demanda de este cereal han presionado el desarrollo de muchas técnicas de premolienda para mejorar la calidad nutricional, de cocción y de consumo del arroz. El más utilizado de estos métodos es la parbolización; en esta se aplican temperaturas entre los 70 y los 100 °C al arroz con cáscara y el requerimiento de agua es elevado (Rajesh *et al.*, 1999). Ello significa que esta producción podría generar

Citación: Peralta YM, et al. Oxidación catalítica de fenol en efluentes de la parbolización del arroz: una estrategia hacia la economía circular. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 2026 Oct 19. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.4178>

Editor: Diego Gamba

***Correspondencia:**

Sonia Moreno, smorenog@unal.edu.co

Recibido: 28 de julio de 2026

Aceptado: 6 de octubre de 2026

Publicado en línea: 19 de octubre de 2026



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

un volumen importante de aguas residuales, de cerca de 1,0 a 1,2 litros por kilogramo de arroz procesado, las cuales contienen sustancias contaminantes como la lignina, el fenol y compuestos coloreados que incrementan la demanda química de oxígeno (DQO) (Behera *et al.*, 2010; Kumar *et al.*, 2016). Resulta, entonces, de extrema importancia tratar estas aguas para reducir la carga orgánica antes de su disposición final (Rajesh *et al.*, 1999), ya que si no se tratan adecuadamente, pueden afectar los ecosistemas acuáticos y la salud humana, provocando, entre otras afecciones, asma, bronquitis y enfermedades cutáneas (Behera *et al.*, 2010; Rajesh *et al.*, 1999).

En el tratamiento de aguas residuales se han aplicado tecnologías como la biorremediación con microalgas, la electrocoagulación, las pilas de combustión microbianas, la adsorción y la fitorremediación, con las que se logran remociones de materia orgánica en términos de una DQO de 70 a 95 % y una remoción de fenol de 58,2 a 96 %. Generalmente, estos son procesos biológicos que requieren tiempos prolongados de reacción, la degradación lograda es poco eficiente y los costos de tratamiento son muy elevados (Challa *et al.*, 2024; Kandagatla *et al.*, 2023; Singh & Bajpai, 2025). Los procesos avanzados de oxidación son una alternativa viable en la degradación de los compuestos orgánicos y se han aplicado en aguas residuales con altos contenidos de compuestos recalcitrantes como el fenol (Mazivila *et al.*, 2019; Sable *et al.*, 2018). La Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos de América (United States Environmental Protection Agency, EPA) considera el fenol como contaminante prioritario por su alta toxicidad. En este sentido, la remoción de fenoles de las aguas residuales de los molinos de arroz tiene una gran importancia ambiental.

En Colombia no hay estudios sobre el tratamiento de aguas residuales provenientes de los molinos de arroz mediante procesos avanzados de oxidación. A nivel mundial, en el estudio en el laboratorio de Kumar A *et al.* (2016) se empleó el proceso Fenton y un catalizador de Fe sobre biosílice en el tratamiento de aguas residuales de los molinos de arroz y se logró una DQO inicial de 1.527 mg/l. El ensayo se hizo con una carga de catalizador de 4,12 g/l, 4,2 g/l de H₂O₂, pH 3,0 y una temperatura de 30 °C y se alcanzó una reducción de la DQO de 75,6 % y una estabilidad de tres ciclos de reutilización del catalizador. En el estudio de Adam *et al.* (2010) se empleó un catalizador de Fe sobre biosílice (fase activa de 10 %) a 70 °C, con 30 mg de catalizador, 4,5 g de H₂O₂ y se obtuvieron conversiones del 95 % y una pérdida del 16 % de la actividad catalítica después de cinco ciclos. Hasta donde sabemos, estas son las únicas publicaciones que se reportan sobre este tema específico.

Nuestro estudio es el primero en proponer una solución que resultaría muy eficaz para la degradación de los contaminantes recalcitrantes en las aguas residuales de la parbolización del arroz en el país. Utilizamos para ello un catalizador de Fe altamente disperso obtenido por pirólisis y evaluamos su estabilidad mediante la caracterización por difracción de rayos X (XRD), espectroscopía de resonancia paramagnética (EPR) y adsorción de N₂, y evaluamos el desempeño catalítico antes y después de los ensayos de reutilización.

Materiales y métodos

Síntesis y caracterización del catalizador

La sílice derivada de cascarilla de arroz (RH-SiO₂) se obtuvo siguiendo procedimientos previamente reportados (Díaz-Tovar *et al.*, 2025). Después se la sometió a digestión alcalina con NaOH 2.0 M durante 4 horas para la obtención de los silicatos. A partir de esto, se sintetizó el material P123/RH-SiO₂ mediante un método de encapsulamiento con el polímero pluronic P123, un tratamiento hidrotérmico a 100 °C durante 24 h y la posterior calcinación a 500 °C durante 5 horas en flujo de aire. Posteriormente, el P123/RH-SiO₂ se mezcló con el precursor metálico de Fe durante 30 minutos y se volvió a calcinar a 500 °C durante 5 horas en flujo de aire para obtener el catalizador 5Fe@SiO₂ (Peralta *et al.*, 2025).

El sólido se caracterizó empleando DRX, análisis de adsorción-desorción de N₂ y EPR. La difracción de rayos X – DRX se llevó a cabo en un equipo Maxima_X XRD-7000 (Shimadzu), con radiación Cu K α $\lambda=1.54056\text{\AA}$, tamaño de paso de 0,02 °2 θ y tiempo de paso de 2 segundos. El área superficial y el tamaño de poro se midieron mediante un análisis de adsorción-desorción de N₂ usando un ASAP 2020 a -196 °C previa desgasificación a 150 °C durante 4 horas en el vacío. El análisis de espectroscopía de resonancia paramagnética electrónica (EPR) se hizo en un espectrómetro Bruker ESP 300 (Alemania), en un rango de campo magnético de 500 a 4000 G y una potencia de microondas de 19,8 mW, operando a una frecuencia de 9,44 GHz y a una temperatura de -183,15 °C.

Agua residual de la parbolización del arroz

La muestra de estudio del agua residual de la parbolización del arroz (ARP) se obtuvo del procesamiento del arroz con cáscara para obtener arroz parbolizado. Se recolectó sin tratamiento previo (biológico o químico) en la canaleta de enfriamiento en la planta CATSA Chicoral del molino Florhuila, ubicado en el kilómetro 9 de la vía Espinal-Tolima, Colombia. La caracterización fisicoquímica del ARP se detalla en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos de la parbolización del arroz (ARP)

Parámetro	Incertidumbre	Valor ^a
DQO(mg O ₂ /L)	13	3426
pH (Unid. pH)	0,09	3,4
Fenol (mg/L)	0,08	4,6
COT (mg C/L)	0,17	1332
Cl ⁻ (mg/L)	0,71	253
Nitrógeno total (mgN/L)	3,00	50,5
NO ₃ ⁻ (mg/L)	1,99	13,5
NO ₂ ⁻ (mg/L)	0,02	<0,02

^a Análisis realizado en el laboratorio Ambitest SAS acreditado por el IDEAM

Reacción catalítica

La actividad del catalizador se evaluó siguiendo las mismas condiciones y empleando el mismo procedimiento que el descrito para la evaluación de la oxidación del fenol (**Peralta et al.**, 2025). Para ello, la reacción se llevó a cabo en un reactor semibatch de 120 mL, abierto a la atmósfera, con agitación constante a una velocidad de 500 rpm durante toda la reacción, con el termostato a 25 °C y empleando 60 mL de las aguas residuales de la ARP sin diluir y 300 mg de catalizador. Se controló el pH en 3,7 mediante la adición de NaOH o 0,1 M de HCl, y se dosificó el 0,1 M de H₂O₂ (0,2 mmol/h) para iniciar la reacción Fenton durante 3,5 horas. En intervalos de tiempo crecientes se tomaron las alícuotas filtradas a través de un filtro de 0,22 μm para el análisis y seguimiento de la reacción. La remoción del carbono orgánico total (COT) se midió en un equipo analizador TOC (Shimadzu) con el método de oxidación catalítica por combustión a 680 °C. La conversión del fenol se siguió por espectrofluorimetría empleando un equipo RF6000 (Shimadzu) en un rango de emisión de 298 nm y uno de excitación de 200 a 350 nm, siguiendo el procedimiento previamente reportado para el fenol como molécula modelo (**Peralta et al.**, 2025; **Peralta et al.**, 2025a).

La conversión de fenol (ecuación 1) y la remoción de COT (ecuación 2) se calcularon así:

$$\text{Conversión de fenol (\%)} = \frac{[\text{fenol}]_i - [\text{fenol}]_f}{[\text{fenol}]_i} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Remoción COT (\%)} = \frac{COT_i - COT_f}{COT_i} \times 100 \quad (2)$$

Los símbolos $[phenol]_i$ y $[phenol]_f$ indican la concentración del fenol inicial y final. TOC_i y TOC_f indican el COT inicial y final en mg/L.

Después de la reacción de oxidación se recolectó el catalizador, se filtró (filtro de 0,45 μm) y se lavó con agua destilada; después se secó a 60 °C durante toda la noche para luego realizar dos ciclos más de reacción y evaluar la reutilización del material. Se realizó, además, un ensayo en el que se continuó la reacción hasta completar 36 horas para evaluar la estabilidad del catalizador. La concentración de hierro lixiviado después de este lapso de reacción se determinó con el método fotométrico a $\lambda=540$ nm empleando un fotómetro (Macherey-Nagel PF-12^{Plus}) de bajo rango entre los 0,04 y los 2,00 mg/L. La DQO se midió por triplicado con el método fotométrico usando un multiparámetro HANNA 183399 (rangos altos entre 0 y 15.000 mg/L y resolución de 1 mg/L).

Resultados y análisis

En este estudio, la estabilidad catalítica del 5Fe@SiO₂ se definió principalmente como la capacidad del catalizador para conservar su actividad durante los ciclos de reutilización y se evaluó mediante la variación de la conversión de fenol y la remoción de COT. De forma complementaria, la estabilidad estructural, química y textural del material se evaluó mediante difracción de rayos X (DRX), espectroscopía de resonancia paramagnética (EPR) y adsorción-desorción de N₂. Asimismo, la lixiviación de Fe se determinó como indicador de la estabilidad de la fase metálica durante la reacción. Para evaluar estos aspectos, el catalizador recuperado después de los tres ciclos de reutilización se filtró (filtro de 0,45 μm), se lavó con agua destilada y se secó a 60 °C durante toda la noche.

En la **Figura 1** se muestran las isotermas de adsorción-desorción de N₂ del catalizador 5Fe@SiO₂ antes y después de los tres ciclos de uso. Ambas isotermas son de tipo IV, características de materiales mesoporosos (Thommes *et al.*, 2015), con un bucle de histéresis de tipo H1, típico de sílices con templete y presencia de mesoporos uniformes (Jaramillo *et al.*, 2019; Thommes *et al.*, 2015). Se evidenció menor adsorción en la isoterma del catalizador después de la reutilización, lo que se tradujo en una disminución importante del área superficial. En contraste, el volumen total de poro permaneció prácticamente constante (0,61 cm³/g), mientras que el diámetro de poro presentó una

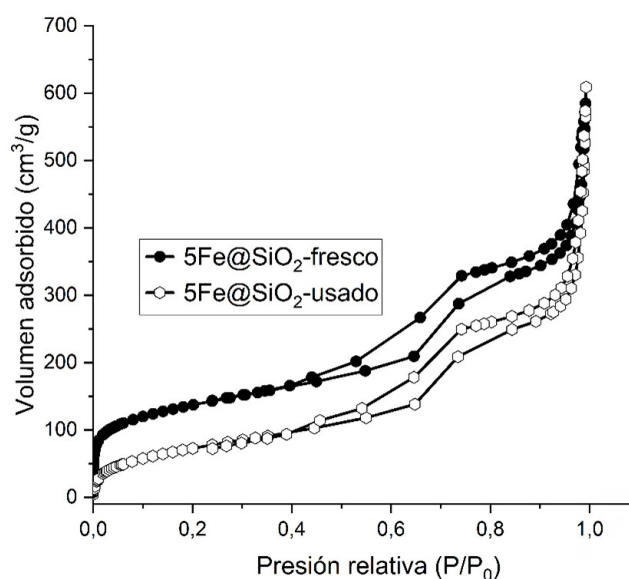


Figura 1. Isotermas de adsorción-desorción del catalizador antes y después de ciclos de reutilización

variación relativamente pequeña. Estos resultados evidencian una modificación de las propiedades texturales después de su utilización, asociada principalmente con la disminución del área superficial en el catalizador usado. Esto podría estar relacionado con cambios en la accesibilidad de la superficie, incluidos posibles fenómenos de agregación de partículas durante la recuperación y secado del catalizador, como se ha reportado para otros sistemas mesoporosos (Wu *et al.*, 2018) (Tabla 2).

En la **Figura 2a** se muestran los patrones de difracción de rayos X del catalizador antes y después de las reutilizaciones. En los dos se observó la señal característica de sílice amorfa a $22,2^\circ 2\theta$ y se identificaron dos reflexiones (104) y (100) asignadas a la fase hematita de acuerdo con lo reportado previamente (Peralta *et al.*, 2024; Ni *et al.*, 2018; Vu *et al.*, 2019). La comparación de los difractogramas antes y después de la reutilización no evidenció desplazamientos apreciables en la posición de las dos reflexiones ni cambios evidentes en su anchura. No hay evidencias claras de modificaciones de la fase cristalina del hierro ni cambios apreciables en el tamaño del cristalito a partir de los patrones de DRX obtenidos. Estos resultados indican que las características estructurales detectables del catalizador se mantienen después de los ciclos de reutilización. Por otra parte, en la **Figura 2b** se muestran los espectros EPR del catalizador antes y después de la reutilización. En el catalizador fresco aparece la señal característica de Fe^{3+} aislado en un valor de $g \approx 4,3$ y una señal intensa con un valor del tensor de $g = 2.056$ que indica que las diversas especies de hierro se han transformado en óxidos de hierro (III) en una forma estructural específica

Tabla 2. Propiedades texturales del catalizador antes y después de la reutilización

Sólido	S _{BET} (±10 m ² /g)	Volumen total del poro (cm ³ /g)	Diámetro del poro (nm)
5Fe@SiO ₂ -fresco	455	0.61	7,7
5Fe@SiO ₂ -reutilizado	271	0.61	8,6

SBET: área superficial específica

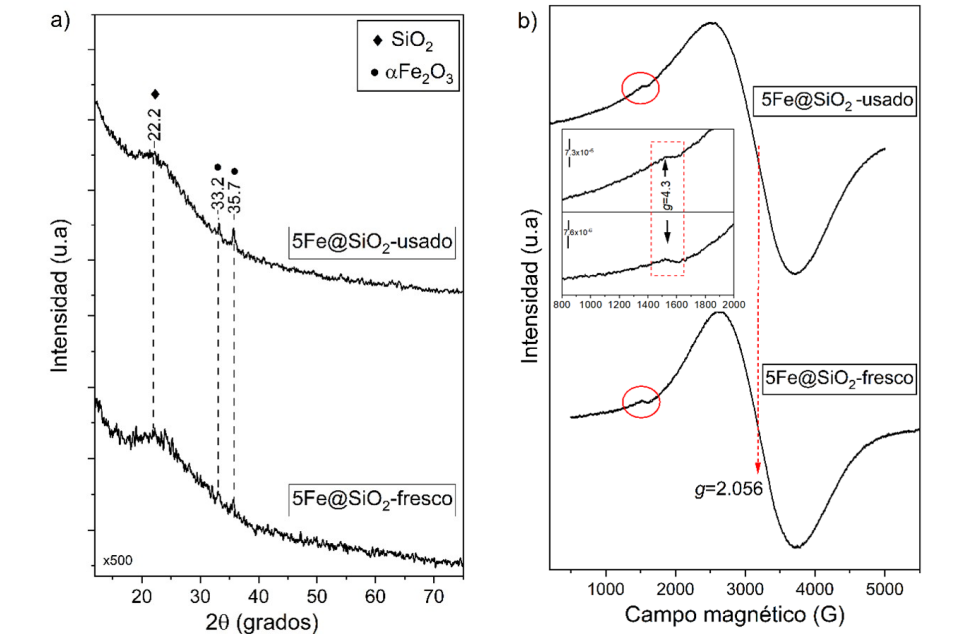


Figura 2. Patrón de DRX (a) y de los espectros EPR (b) del catalizador antes y después de los ciclos de reutilización

(Peralta-Ladino *et al.*, 2025). Después de la reutilización no se observan cambios y la señal de Fe(III) aislado no se modificó, corroborando la estabilidad química del catalizador en la reacción durante los tres ciclos de uso.

En conjunto, los resultados indican que no hubo cambios en la estructura después de la reutilización mediante DRX, lo que es consistente con los resultados obtenidos por EPR, que tampoco evidenciaron modificaciones apreciables en el entorno electrónico de las especies de Fe³⁺.

En cuanto a la actividad catalítica, después de los tres ciclos de reutilización (**Figura 3a**), el ensayo evidenció una pérdida en la remoción de COT del $6,0 \pm 2,2$ % y en la conversión de fenol del $1,0 \pm 2,0$ %, valor este que está dentro del error medido, por lo que puede considerarse estable. Estos resultados evidencian que el sistema catalítico mantuvo una importante estabilidad y conservó su actividad durante los ciclos de reutilización evaluados. Por otra parte, con el propósito de evaluar la estabilidad del catalizador, se hizo un ensayo consecutivo (36 h de reacción) utilizando el mismo catalizador y una muestra fresca de ARP sin diluir. Este ensayo se realizó por duplicado y su duración se estableció de manera preliminar dentro del diseño experimental del estudio, con el fin de evaluar la evolución de la actividad. Los resultados en términos de remoción de COT y la conversión de fenol se presentan en la **Figura 3b**. Después de 36 horas de reutilización se alcanzó una máxima mineralización de 68,4 %. En cuanto a la conversión de fenol con respecto al valor inicial de 4,6 ppm, se logró una reducción del 81,4 % (0,85 ppm). Este ensayo pone en evidencia dos resultados muy importantes. Por un lado, es necesario un tiempo prolongado (cercano a las 36 h) para alcanzar una conversión casi total del fenol con niveles muy importantes de mineralización del compuesto recalcitrante. Por otro lado, se evidenció que el catalizador de Fe altamente disperso en la sílice biogénica obtenida de la cascarilla de arroz, 5Fe@SiO₂, preservó su actividad catalítica por lo menos durante las 36 horas consecutivas de reacción evaluadas.

Se determinó igualmente la remoción de la carga orgánica en términos de la DQO obteniendo una remoción de 67 ± 3 %, y una concentración de Fe lixiviado de $0,3 \pm 0,025$ mg/L después de 36 horas de reacción.

A pesar de que la DQO se emplea como criterio de la eficiencia del tratamiento en aguas residuales (American Public Health Association - APHA, 2005), su interpretación no es sencilla debido a la gran cantidad de variables que pueden influir en el valor obtenido. Entre ellas se han reportado en la literatura compuestos orgánicos como la piridina y otros relacionados; el amoníaco y la materia orgánica que contiene nitrógeno; los cloruros y otras especies susceptibles o resistentes a la oxidación presentes en el agua residual (APHA, 2005). Aquí, el agua residual de la parbolización del arroz presentó una DQO inicial de

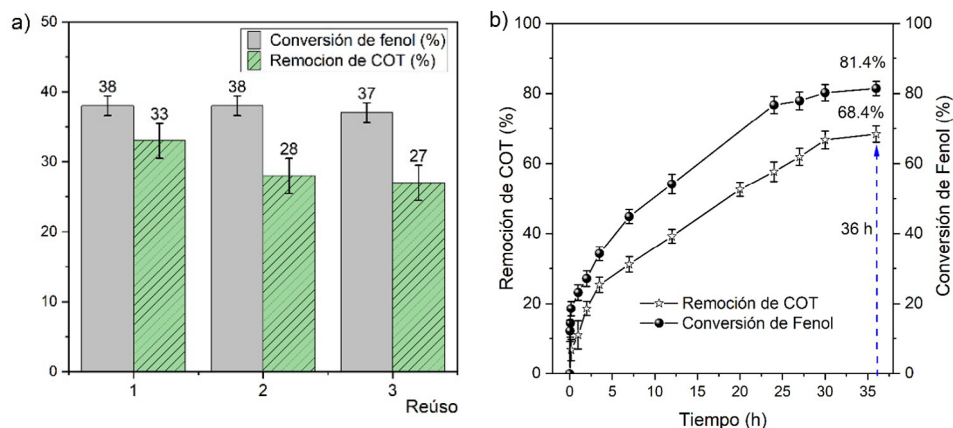


Figura 3. Remoción del COT y conversión del fenol del agua residual de la parbolización del arroz: **a)** ensayo de reúso y **b)** ensayo de estabilidad por 36 horas

3.426 mgO₂/L, un COT de 1.332 mgC/L, concentraciones iniciales de fenol de 4,9 mg/L, de cloruros de 253 mg/L, de nitrógeno total de 50,5 mgN/L, de nitratos de 13,5 mg/L y de nitritos de <0,02 mg/L. Después de las 36 h se logró una remoción de DQO de 67±3 %, lo que indica una reducción significativa de la carga global de sustancias susceptibles de oxidación. No obstante, este resultado no permite atribuir la remoción exclusivamente a la oxidación de fenol, por lo que la DQO se consideró como un indicador complementario del comportamiento del sistema catalítico, en conjunto con la remoción de COT, la conversión de fenol y la lixiviación de Fe.

Además, aunque se observaron cambios en las propiedades texturales después de los ciclos de reutilización, dicha variación no estuvo acompañada de una disminución en la actividad catalítica, dada la poca pérdida de la conversión de fenol y de la remoción de COT. Por lo tanto, los resultados sugieren que la disminución del área determinada por la adsorción con N₂ no constituye, por sí sola, un indicador directo de pérdida de actividad en las condiciones de reacción evaluadas. La conservación de la actividad, así como la ausencia de cambios apreciables en los patrones DRX y los espectros EPR y la baja lixiviación de Fe, son evidencia complementaria de la estabilidad del sistema catalítico durante los ciclos de reutilización estudiados. En general, estos resultados demuestran el potencial del material 5Fe@SiO₂ como sistema catalítico para el tratamiento de aguas resultantes de la parbolización del arroz.

En la **Tabla 3** se compara el desempeño del sistema catalítico desarrollado frente a diferentes alternativas reportadas para el tratamiento de aguas residuales de la parbolización del arroz. Dichos valores constituyen un marco cuantitativo para contextualizar el tiempo de tratamiento y los niveles de remoción alcanzados, teniendo en cuenta que los estudios presentan variaciones en los microorganismos empleados y las condiciones de operación.

Los tratamientos biológicos logran remociones de DQO entre 71,8 y 94,4 %, pero con tiempos de operación que varían entre 60 horas y 40 días. Por otro lado, el sistema 5Fe@SiO₂ alcanzó una conversión significativa de fenol y una reducción de la carga orgánica en un tiempo de tratamiento inferior al reportado para varios sistemas biológicos.

Tabla 3. Comparación de tratamientos reportados para la remoción de contaminantes en aguas residuales de la parbolización del arroz

Tratamiento	Condiciones óptimas del ensayo	Remoción/ conversión	Referencia
Tratamiento con bacterias	<i>E. aerogenes</i> , pH 7, T: 33 °C Tiempo operación: 60 h	DQO: 71,8 %	Ramprakash & Muthukumar, 2014
Biorremediación con microalgas y cianobacterias	Incubación a 28 °C, 12 h de luz (intensidad de 250 µmol de fotones m ⁻² /s) y 12 h de oscuridad, pH ajustado: 7,5 Tiempo de operación: 36 días	DQO: 91,6 %	Mukherjee et al., 2016
Tratamiento con bacterias	Incubación a 35 °C, pH: 7 Bacteria usada <i>Bacillus flexus</i> RMWW II, Tiempo de operación: 70 h	DQO: 84 %	Kumar et al., 2019
Tecnología CW y vermifiltración	Tres reactores Acondicionamiento de la planta <i>Canna indica</i> y de lombrices <i>Eisenia fetida</i> EWs Tiempo de operación: 40 días	DQO: 94,4 % *Conversión de fenol: 96 %	Mishra et al., 2024
Digestión anaeróbica	Dos reactores semibatch Tratamiento alcalino con NaOH y Ca(OH) ₂ Tiempo de operación: 40 días	DQO: 92 % Conversión de fenol: 82 %	Singh & Bajpai, 2025
Proceso Fenton heterogéneo	Reactor semibatch Temperatura: 25 °C, pH: 3,5 Oxidante: 0,1 M de H ₂ O ₂ (0,2 mmol/h) Tiempo de operación: 36 h	DQO: 67±3 % Conversión de fenol: 81,4±2 % COT: 68,4±2,2 %	Este trabajo

Valorización de la cascarilla de arroz y su aplicación

La **Figura 4** presenta un esquema de la valorización de la cascarilla de arroz para la obtención de biosilíce, su posterior utilización como soporte en la síntesis del catalizador $5\text{Fe}@\text{SiO}_2$ y la aplicación del material en el tratamiento de agua residual de la parbolización del arroz. La estrategia integra la valorización de residuos y presenta elementos asociados con los principios de la economía circular, pues se valoriza la cascarilla de arroz, un residuo abundante de la agroindustria arrocera, para obtener biosilíce empleada como soporte en la síntesis de un catalizador heterogéneo destinado al tratamiento de otros residuos de la misma cadena productiva.

A partir de 1 kg de arroz con cáscara, se generaron 250 g de cascarilla de arroz y de este residuo se obtuvieron alrededor de 37,5 g de biosilíce mediante un proceso de lixiviación ácida en condiciones suaves, temperatura de 70 °C, agitación de 30 rpm, HCl de 0,0032 M, tiempo de 2,5 horas y calcinación a 550 °C. Este método fue desarrollado y puesto a punto en el grupo ESCA (Díaz-Tovar *et al.*, 2025). Con esta biosilíce se lograron cerca de 19 g de catalizador para tratar alrededor de 3,8 L de agua residual resultante de la parbolización del arroz en un ciclo de reacción de 3,5 horas.

Por otro lado, el proceso de síntesis del catalizador requiere pocos reactivos químicos (2 a 3), emplea bajas cantidades de un precursor metálico de bajo costo. En este sentido, el catalizador diseñado y sintetizado en nuestro grupo de investigación puede emplearse en el tratamiento del agua residual de la parbolización del arroz, integrando así la valorización de residuos (cascarilla de arroz), la producción de biosilíce, la síntesis de un catalizador, el tratamiento de aguas residuales y la recuperación de recursos dentro de la misma cadena productiva. Además, la estabilidad del catalizador durante los tres ciclos de reutilización constituye un aspecto relevante para el aprovechamiento del material y una menor necesidad de producir catalizador nuevo para cada ciclo.

Nuestro estudio debe entenderse como un acercamiento preliminar y no constituye por sí mismo una evaluación integral de la sostenibilidad o la viabilidad del proceso. Se requieren estudios posteriores para ampliar la propuesta a escala industrial. En este contexto, los resultados obtenidos constituyen una aproximación experimental a la integración de la valorización de la cascarilla de arroz y el tratamiento catalítico del agua residual, más que una demostración de su viabilidad.

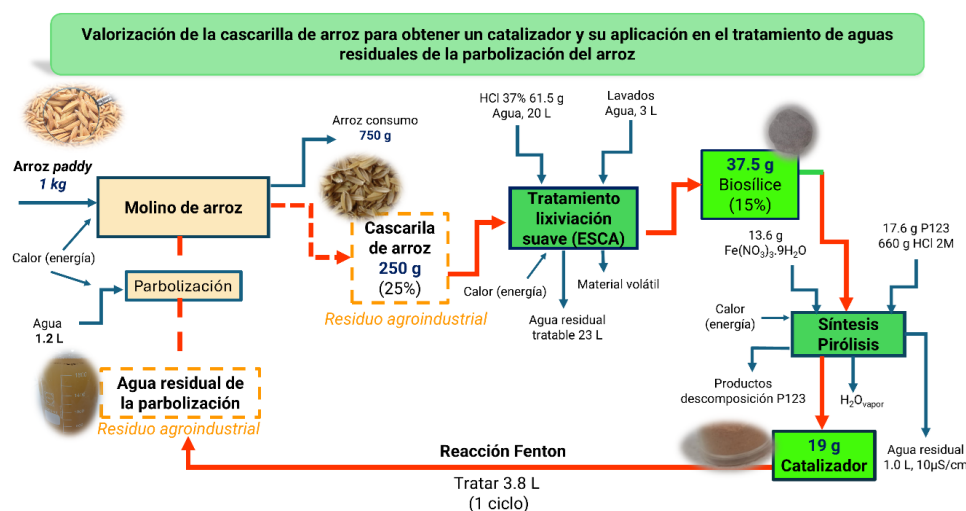


Figura 4. Diagrama preliminar de material asociado a la valorización de la cascarilla de arroz mediante la producción de biosilíce, la síntesis de un catalizador $5\text{Fe}@\text{SiO}_2$ y su aplicación en la oxidación catalítica de efluentes de la parbolización del arroz

Conclusiones

El catalizador 5Fe@SiO₂ mostró actividad catalítica para la oxidación del fenol y la reducción de la carga orgánica en aguas residuales de la parbolización del arroz en condiciones moderadas de temperatura y presión. Se logró una reducción de la DQO del 67±3 %, una mineralización del 68,4 % y una conversión de fenol del 81,4 %, con una baja lixiviación de Fe después de 36 horas de reacción, así como la valorización de residuos agroindustriales mediante la transformación de subproductos (cascarilla de arroz) en materias primas (sílice) para la generación de catalizadores activos en el tratamiento de aguas residuales de la parbolización del arroz. Esta propuesta presenta elementos compatibles con los principios de la economía circular. En ese contexto, nuestros resultados contribuyen al conocimiento y al desarrollo de alternativas para la gestión de efluentes y la reducción de los impactos ambientales asociados a la actividad agroindustrial del arroz.

Agradecimientos

Los autores agradecen al molino de arroz Florhuila en Espinal-Tolima, Colombia, por el suministro de las aguas residuales del molino de arroz, y al proyecto de investigación con código BPIN 2021000100003 Formación de Capital Humano de Alto Nivel – Universidad Nacional de Colombia Corte II Nacional.

Contribución de los autores

YP: aporte sustancial a la concepción de la investigación y la interpretación de los datos para el estudio; participación en la redacción del manuscrito y contribución a su contenido intelectual; RM: aporte sustancial a la concepción de la investigación, responsabilidad por todos los aspectos del estudio, asegurando que se investigarán y resolverán apropiadamente las preguntas que pudieran surgir en relación con la investigación; SM: aporte sustancial a la concepción de la investigación, responsabilidad por todos los aspectos del estudio, asegurando que se investigarán y resolverán apropiadamente las preguntas que pudieran surgir en relación con la investigación. Revisión y aprobación de la versión final del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés que pueda influir en la transparencia u objetividad del proceso de revisión por pares y de la publicación.

Referencias

- Adam, F., Andas, J., Rahman, I. A. (2010). A study on the oxidation of phenol by heterogeneous iron silica catalyst. *Chemical Engineering Journal*, 165(2), 658-667. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.09.054>
- American Public Health Association - APHA. (2005). *Standard Methods for the examination of water and waste-water*. American Public Health Association.
- Behera, M., Jana, P. S., More, T. T., Ghangrekar, M. M. (2010). Rice mill wastewater treatment in microbial fuel cells fabricated using proton exchange membrane and earthen pot at different pH. *Bioelectrochemistry*, 79(2), 228-233. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2010.06.002>
- Challa, M., Dash, R. R., Behera, M. (2024). *A review on treatment of rice mill wastewater with emphasis on biological technologies*. International Biodeterioration and Biodegradation (Vol. 195). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2024.105895>
- DANE. (2026). *Encuesta nacional de arroz mecanizado (ENAM)*. Información primer semestre 2026. <https://www.dane.gov.co/>
- Díaz-Tovar, D., Molina, R., Moreno, S. (2025). Effect of leaching and catalytic decomposition on the kinetics and thermodynamics of rice husk pyrolysis. *Biomass and Bioenergy*, 193, 107564. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107564>
- Environmental Protection Agency - EPA. (2016) *Phenol*. <https://nepis.epa.gov/>

- Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO.** (2026). *CODEX STAN 198-1995*. FAO. <https://www.fao.org/>
- Jaramillo, L. Y., Arango-Benítez, K., Henao, W., Vargas, E., Recio-Sánchez, G., Romero-Sáez, M.** (2019). Synthesis of ordered mesoporous silicas from rice husk with tunable textural properties. *Materials Letters*, 257, 126749. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.126749>
- Kandagatla, N., Kunnoth, B., Sridhar, P., Tyagi, V., Rao, P. V., Tyagi, R. D.** (2023). Rice mill wastewater management in the era of circular economy. *Environmental Management*, 348, 119248. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119248>
- Kumar, A., Priyadarshinee, R., Singha, S., Sengupta, B., Roy, A., Dasgupta, D., Mandal, T.** (2019). Biodegradation of alkali lignin by *Bacillus flexus* RMWW II: Analyzing performance for abatement of rice mill wastewater. *Water Science and Technology*, 80(9), 1623-1632. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.005>
- Kumar, A., Singha, S., Sengupta, B., Dasgupta, D., Datta, S., Mandal, T.** (2016). Intensive insight into the enhanced utilization of rice husk ash: Abatement of rice mill wastewater and recovery of silica as a value added product. *Ecological Engineering*, 91, 270-281. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.02.034>
- Mazivila, S. J., Ricardo, I. A., Leitão, J. M. M., Esteves da Silva, J. C. G.** (2019). A review on advanced oxidation processes: From classical to new perspectives coupled to two- and multi-way calibration strategies to monitor degradation of contaminants in environmental samples. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 24, e00072. <https://doi.org/10.1016/j.teac.2019.e00072>
- Mishra, S. K., Bhunia, P., Sarkar, A.** (2024). An innovative combination of constructed wetland and vermifiltration system: Treatment of synthetic rice mill effluent in relation to phenol concentration and length of the wetland. *Journal of Water Process Engineering*, 67, 106256. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106256>
- Mukherjee, C., Chowdhury, R., Sutradhar, T., Begam, M., Ghosh, S. M., Basak, S. K., Ray, K.** (2016). Parboiled rice effluent: A wastewater niche for microalgae and cyanobacteria with growth coupled to comprehensive remediation and phosphorus biofertilization. *Algal Research*, 19, 225-236. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.09.009>
- Ni, Z., Qin, H., Kang, S., Bai, J., Wang, Z., Li, Y., Zheng, Z., Li, X.** (2018). Effect of graphitic carbon modification on the catalytic performance of Fe@SiO₂ -GC catalysts for forming lower olefins via Fischer-Tropsch synthesis. *Journal of Colloid and Interface Science*, 516, 16-22. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.01.017>
- Peralta, Y. M., Molina, R., Moreno, S.** (2024). Chemical and structural properties of silica obtained from rice husk and its potential as a catalytic support. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(2), 112370. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112370>
- Peralta, Y. M., Molina, R., Moreno, S.** (2025). Rice husk silica as a platform for iron biocatalysts via silanol group confinement. *Water Process Engineering*, 80, 109144. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.109144>
- Peralta, Y. M., Molina, R., Pérez, A., Moreno, S.** (2025). Eco-innovation in action: Using rice husk-derived silica for highly dispersed iron catalysts in the oxidation of phenol. *Bioresources Technology Reports*, 31, 102202–102212. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2025.102202>
- Peralta-Ladino, Y. M., Molina, R., Moreno, S.** (2025). Novel synthesis of iron-based catalysts stabilized by oxygen defects on silica derived rice husk. *Surfaces and Interfaces*, 77, 108035. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2025.108035>
- Rajesh, G., Bandyopadhyay, M., Das, D.** (1999). Some studies on UASB bioreactors for the stabilization of low strength industrial effluents. *Bioprocess Engineering*, 21, 113-116. <https://doi.org/10.1007/s004490050649>
- Ramprakash, B. & Muthukumar, K.** (2014). Comparative study on the production of biohydrogen from rice mill wastewater. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(27), 14613-14621. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.06.029>
- Sable, S. S., Shah, K. J., Chiang, P. C., Lo, S. L.** (2018). Catalytic oxidative degradation of phenol using iron oxide promoted sulfonated-ZrO₂ by Advanced Oxidation Processes (AOPs). *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 91, 434-440. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.06.030>
- Singh, R. K. & Bajpai, S.** (2025). Study of Biological Treatment of Rice Mill Wastewater Using Anaerobic Semicontinuous Reactors (ASCR). *Nature Environment and Pollution Technology*, 24(1), B4197. <https://doi.org/10.46488/NEPT.2025.v24i01.B4197>

- Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., Sing, K.** (2015). Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 87(9-10), 1051-1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>
- Vu, A. T., Xuan, T. N., & Lee, C. H.** (2019). Preparation of mesoporous Fe₂O₃ · SiO₂ composite from rice husk as an efficient heterogeneous Fenton-like catalyst for degradation of organic dyes. *Journal of Water Process Engineering*, 28, 169-180. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.01.019>
- Wu, L., Ye, F., Lei, D., Miao, G., Liu, B., Li, Z., Xiao, J.** (2018). Regeneration of AgXO@SBA-15 for reactive adsorptive desulfurization of fuel. *Petroleum Science*, 15(4), 857–869. <https://doi.org/10.1007/s12182-018-0264-8>
- Zou, Y. & Yang, T.** (2019). Chapter 9 - Rice Husk, Rice Husk Ash and Their Applications. In L.Z. Cheong & X. Xu (Eds.), *Rice Bran and Rice Bran Oil* (pp. 207-246). Elsevier Inc.