

Obtención de materiales a partir de la lixiviación de escorias metálicas para tratamiento de agua contaminada con colorantes

Alondra Martínez-Cruz¹, Carlos Andrés Hernández-Estrada¹, Adriana Benitez-Rico², Arizbeth Amitzin Pérez Martínez²

¹ Universidad La Salle México, Facultad de Ciencias Químicas. Ciudad de México, México

² Universidad La Salle México, Vicerrectoría de Investigación. Ciudad de México, México

am.6@lasallistas.org.mx; chernandez2@lasallistas.org.mx,
adriana.benitez@lasalle.mx, arizbeth.perez@lasalle.mx

Resumen.

Se evaluó el aprovechamiento de escoria de alto horno de la industria metalúrgica como fuente de hierro mediante un proceso de lixiviación con ácido cítrico, con el fin de generar materiales catalíticos aplicables al tratamiento de aguas contaminadas con colorantes. Este enfoque busca valorizar residuos industriales de forma sustentable, alineándose con los principios de la economía circular y la química verde. El material obtenido tras la calcinación presentó características estructurales compatibles con complejos metálico-orgánicos, según el análisis por espectroscopía infrarroja. Su eficacia fue probada en un sistema foto-Fenton, comparando su desempeño con tratamientos de fotooxidación y fotólisis. Los ensayos se realizaron bajo condiciones controladas de pH, radiación UV y concentración de peróxido de hidrógeno, monitoreando la degradación del colorante por espectrofotometría UV-vis en longitudes de onda específicas. Los resultados mostraron que el catalizador derivado de la lixiviación logró una degradación del 99%, muy superior a la obtenida por los otros tratamientos (26% y 13%, respectivamente). Además, se registraron incrementos en el pH, atribuibles al consumo de protones durante la reacción, lo que confirma una transformación química activa. Se concluye que es posible obtener materiales eficientes para el tratamiento de aguas residuales a partir de residuos industriales, aunque se identificó la necesidad de optimizar las condiciones de calcinación y realizar estudios cinéticos para evaluar la estabilidad del catalizador en el tiempo.

Palabras Clave: residuos industriales, lixiviación, tratamiento de agua

1 Descripción de la problemática prioritaria abordada

La industria siderúrgica es una de las principales fuentes de residuos sólidos industriales a nivel global, particularmente por la generación de escorias durante los procesos de fusión y afinado del acero. Estas escorias, compuestas principalmente por óxidos metálicos y silicatos, representan un subproducto que puede alcanzar entre 150 y 200 kilogramos por cada tonelada de acero producida, dependiendo del tipo de horno empleado (World Steel Association, 2024). A nivel mundial, la producción anual de escorias de alto horno y escorias de acero se estima en más de 500 millones de toneladas combinadas (USGS, 2024). En el contexto nacional, México figura como uno de los principales productores de acero en América Latina, y ciudades como Monterrey concentran una parte significativa de esta actividad industrial; se ha estimado que plantas medianas pueden generar entre 20,000 y 30,000 toneladas anuales de escoria (Bautista et al., 2011).

Tradicionalmente, una parte considerable de este residuo ha sido dispuesta en tiraderos o confinamientos, generando riesgos ambientales y desaprovechando su potencial como recurso secundario. En el marco de la economía circular, diversas investigaciones han demostrado que la escoria puede ser aprovechada como materia prima en aplicaciones productivas como la fabricación de

cemento, concreto, pavimentos, estabilización de suelos, e incluso para la obtención de compuestos químicos con valor agregado (Gao, 2023). Este enfoque permite disminuir la demanda de recursos vírgenes y mitigar el impacto ambiental de su disposición. En este proyecto se propuso la valorización de escoria de hierro mediante lixiviación con ácido cítrico, un agente débil y biodegradable, que ofrece una alternativa ambientalmente favorable respecto al uso de ácidos fuertes tradicionalmente empleados.

El uso de ácido cítrico permite solubilizar metales presentes en la matriz de escoria y obtener un lixiviado que contiene especies férricas activas para su uso posterior como catalizador en procesos foto-Fenton, los cuales han demostrado ser altamente eficaces en la degradación de colorantes sintéticos persistentes en aguas residuales (Rodríguez-Chueca et al., 2017). La contaminación por colorantes textiles representa un reto ambiental importante, dado que estos compuestos son altamente visibles, recalcitrantes y tóxicos para los ecosistemas acuáticos. Así, el uso de lixiviados derivados de residuos industriales para activar procesos avanzados de oxidación constituye una estrategia innovadora, sostenible y alineada con los principios de la química verde.

El presente trabajo se inserta dentro de un enfoque sistémico que promueve tanto la gestión integral de residuos industriales como el tratamiento de contaminantes emergentes, contribuyendo directamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030, particularmente al ODS 6 (agua limpia y saneamiento), ODS 9 (industria, innovación e infraestructura), ODS 12 (producción y consumo responsables) y ODS 13 (acción por el clima), al fomentar tecnologías limpias y de bajo impacto.

2 Objetivo

Obtener materiales catalíticos mediante la lixiviación de escoria de alto horno utilizando ácido cítrico como agente ecológico, para aplicación en el tratamiento de aguas contaminadas con colorantes.

3 Propuesta teórico-metodológica

Se realizaron dos disoluciones de ácido cítrico a 0.2 M en 125 ml, donde se colocaron 4.8027 g de C₆H₈O₇. A cada solución se le añadió 5 g de escoria de alto horno y se sometieron a una agitación constante durante 2 horas. Se decantaron las soluciones y se filtraron al vacío. Posteriormente se llevaron a cabo lavados para recuperar el hierro por imantación y se realizó una vaporización a 230°C de la solución restante. Los residuos tras la evaporación se sometieron a un tratamiento térmico al ser secados a 350°C, triturados y calcinados. Obteniendo una fase más pura y con una coloración amarillenta y ligeramente marrón. Se pesaron 13.8360 g de catalizador denominado “Lixiviado” a lo largo de los siguientes procedimientos. La Figura 1, presenta la materia prima y producto de la lixiviación.

Se realizó un análisis por espectroscopía infrarroja (IR) al material obtenido tras la calcinación observable en la Figura 2, se reveló la presencia de compuestos orgánicos, entre ellos posiblemente citratos. En la región comprendida entre 2958 y 2928 cm⁻¹ se observaron bandas atribuibles a vibraciones de estiramiento C–H, características de grupos alquilo; la presencia de un pico notable en 1720 cm⁻¹ sugiere la existencia de un grupo carbonilo, común en ácidos carboxílicos y sales como los citratos. Las señales registradas entre 1407 y 1268 cm⁻¹ corresponden a vibraciones de estiramiento C–O, típicas de estructuras orgánicas; finalmente, las bandas localizadas entre 1100 y 1018 cm⁻¹ pueden asociarse al estiramiento del grupo carboxilato.

En 50 ml de colorante RD-28 a 100 ppm se llevó a cabo una reacción Foto-Fenton al añadir 100 µl de H₂O₂ en un medio ácido con pH 5 asistido por radiación UV de λ=250 nm y con 100 mg del catalizador “Lixiviado” durante 2 horas con agitación constante tomando alícuotas cada 30 minutos. Se realizaron en conjunto con el proceso catalítico una Fotooxidación, colocando 100 µl de H₂O₂; al igual que una Fotólisis con un pH inicial de 5. Se realizó un espectro por fotometría UV-vis de cada alícuota correspondiente a los tiempos establecidos de las 3 soluciones donde se encuentra la absorbancia en función de la concentración en longitudes de onda específicos donde se absorbe el colorante, en 496 y 340 nm. El avance de la reacción se puede apreciar en la figura 5 y en los espectros de UV-Vis de la Figura 4.

4 Discusión de resultados

Durante la lixiviación con ácido cítrico, es común la formación de complejos metálico-orgánicos estables, como los citratos de hierro, aluminio o calcio. Estos compuestos presentan alta resistencia térmica debido a la coordinación entre los iones metálicos y el ácido cítrico, lo cual eleva su temperatura de descomposición. Tras calentar la muestra a 450 °C por dos horas, el análisis infrarrojo reveló la persistencia de señales orgánicas, lo que indica que las condiciones no fueron suficientes para su eliminación completa. Se observaron bandas características de grupos alquilo, carbonilo, C–O y carboxilato, compatibles con residuos de citratos metálicos.

Anterior al tratamiento, la escoria de acero presentó distintas tonalidades de gris y al final el material tratado obtuvo una coloración café amarillenta. De manera cuantitativa por UV-Vis se siguió en avance en la reacción Foto-Fenton con el material como catalizador hubo un cambio notorio en la coloración debido al colorante presente en el agua posterior a media hora (Figura 3).

El aumento del pH observado después del proceso foto-Fenton se debe a la consumición de protones (H^+) durante la reacción, en la que se generan radicales hidroxilos ($\cdot OH$) a partir de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) en presencia de hierro. A medida que avanza el proceso, las alícuotas disminuyen de coloración lo que indica que los radicales formados atacan a la molécula del colorante logrando su degradación, prueba de esto es que se reduce la acidez del medio y pueden formarse especies ligeramente básicas, lo que provoca que el pH se eleve gradualmente de valores ácidos (≈ 5) hasta neutros o ligeramente alcalinos ($\approx 7-9$). En la Tabla 1 y en la figura 5, se presentan los porcentajes de degradación después de 120 minutos de tratamiento, el proceso foto-Fenton logra el 99% de degradación en contraste con la fotólisis y la fotooxidación.

5 Conclusiones y perspectivas futuras

Se obtuvo un material catalítico mediante la lixiviación de escoria metalúrgica utilizando ácido cítrico como agente ecológico que por el análisis infrarrojo reveló la presencia de citratos metálicos y otras estructuras orgánicas.

El catalizador obtenido demostró una alta eficiencia en el tratamiento de aguas contaminadas con colorantes, alcanzando una degradación del 99% en la reacción Foto-Fenton, muy superior a los procesos de fotooxidación (26%) y fotólisis (13%). Por lo tanto, es posible obtener materiales con alta eficiencia para el tratamiento de colorantes a partir de la lixiviación de escoria de acero, lo que representa una alternativa sustentable y de valor agregado para residuos industriales.

Además, se observó un cambio significativo en el pH del medio, lo que sugiere una transformación química activa durante el proceso catalítico, con implicaciones importantes para el diseño de sistemas de tratamiento de aguas.

A pesar de los resultados, es necesario optimizar las condiciones de calcinación para eliminar completamente los residuos orgánicos, mejorar la pureza del catalizador, realizar estudios cinéticos y recuperar el catalizador para evaluar su estabilidad y eficiencia a largo plazo.

4 Referencias

1. Bautista, M. A., Hernández, J. R., & Camacho, L. C. (2011). Aprovechamiento de escorias de horno de arco eléctrico para la fabricación de materiales de construcción. Universidad Autónoma de Baja California.
2. Gao, W. (2023). Comprehensive utilization of steel slag: A review. Powder Technology, 428, 117940. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.117940>
3. Rodríguez-Chueca, J., Ormad, M. P., & Ovelleiro, J. L. (2017). Photo-Fenton process as an efficient treatment for the removal of some emerging contaminants in aqueous phase. Environmental Science and Pollution Research, 24(1), 533–544. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7858-0>
4. US Geological Survey. (2024). Mineral commodity summaries 2024 – Iron and steel slag. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024-iron-steel-slag.pdf>

5. World Steel Association. (2024). Steel industry co-products fact sheet [actions/fact-sheets/steel-industry-co-products](#)

Tabla 1. Degradación y pH de las reacciones

Reacción	% DEGRADACIÓN	pH inicial – pH final
Foto-Fenton (con catalizador)	99%	5.3 – 9.5
Fotooxidación	26%	5.3 – 7.6
Fotólisis	13%	5.3 – 7.8

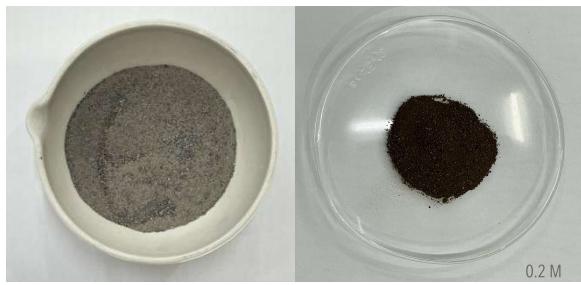


Figura 1. Escoria de alto horno antes y después del tratamiento

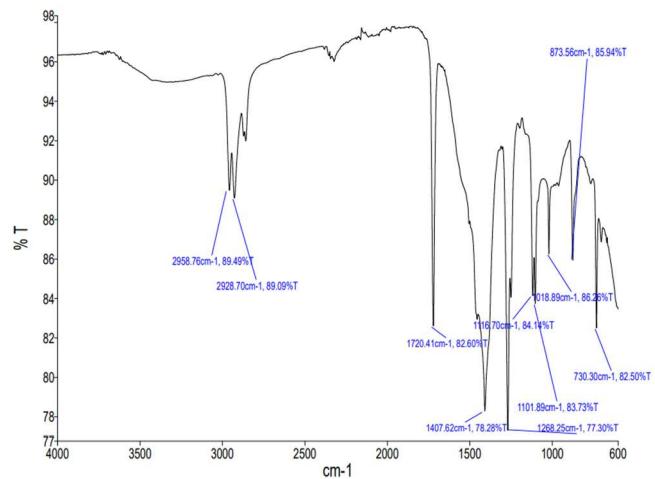


Figura 2. Gráfica de la espectroscopía infrarroja (IR) del material calcinado

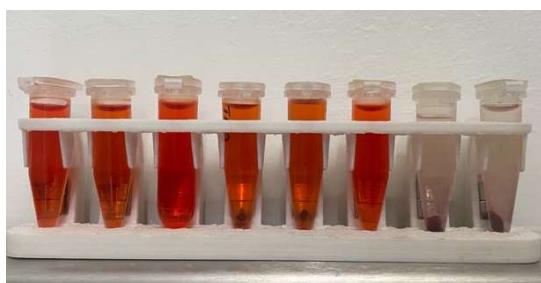


Figura 3. Alícuotas tomadas cada hora antes y después de agregar el catalizador

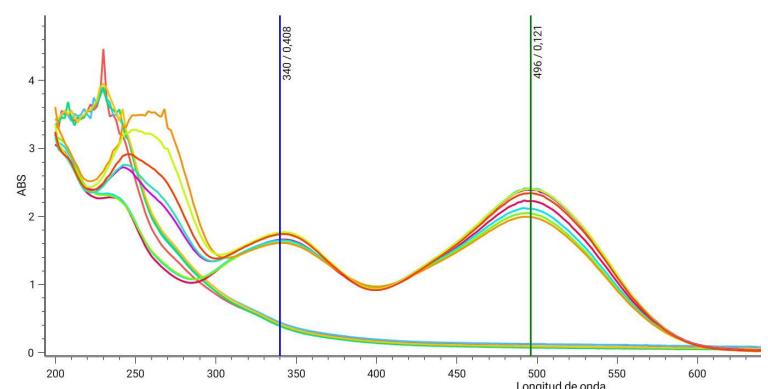


Figura 4. Gráfica del espectro UV-vis de las alícuotas sometidas a foto-Fenton

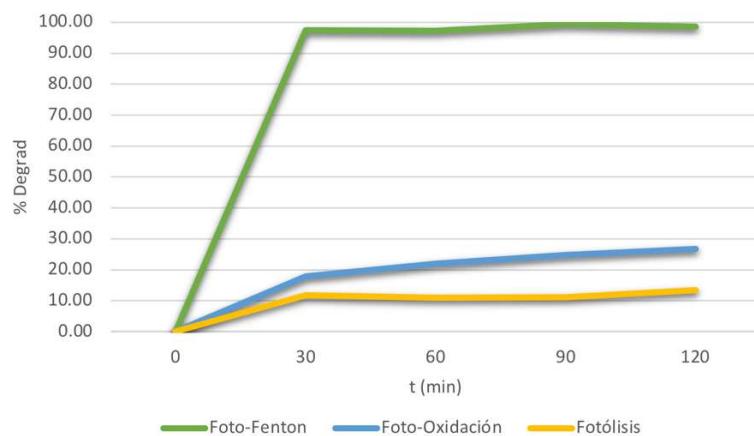


Figura 5. Gráfica de comparación del porcentaje de degradación en cada proceso