



Exploración de la economía circular en la minería de cobre con base en la biosíntesis de partículas a escala nanométrica de óxidos metálicos a partir de cuprita para la degradación de colorante azul de metileno por fotocatalisis

Nora Elizondo-Villarreal*

María Aracelia Alcorta-García*

Rosa María Estrada-Martínez*

<https://doi.org/10.29105/cienciauanl28.130-4>

RESUMEN

Se explora la economía circular en la minería mediante la biosíntesis de nanopartículas de óxidos de cobre a partir de cuprita, promoviendo un desarrollo sostenible. Los nanomateriales obtenidos degradan el contaminante azul de metileno por fotocatalisis, con una eficiencia del 65% en 40 minutos. Las nanopartículas se caracterizaron mediante espectroscopia UV-Vis, difracción de rayos X (XRD), microscopía electrónica (SEM y TEM) y alta resolución (HR-TEM), determinándose su estructura y morfología. Este enfoque fomenta la reutilización de recursos, reduce desechos e impulsa la innovación, integrando prácticas sostenibles y tecnología avanzada en la minería del cobre, generando un impacto positivo.

Palabras clave: economía circular, biosíntesis, nanopartículas, cuprita, sostenibilidad.

ABSTRACT

The circular economy in mining is explored through the biosynthesis of copper oxide nanoparticles from cuprite, promoting sustainable development. The obtained nanomaterials degrade the pollutant methylene blue via photocatalysis, achieving 65% efficiency in 40 minutes. The nanoparticles were characterized using UV-Vis spectroscopy, X-ray diffraction (XRD), and electron microscopy (SEM, TEM, and high-resolution HR-TEM), determining their structure and morphology. This approach fosters resource reutilization, reduces waste and drives innovation; integrating sustainable practices and advanced technology in copper mining, generating a positive impact.

Keyword: circular economy, biosynthesis, nanoparticles, cuprite, sustainability.

La economía circular es clave en el desarrollo sostenible, promoviendo la reutilización, reducción de desechos y eficiencia sobre los recursos (figura 1a). En la minería, especialmente del cobre, se prioriza minimizar impactos, revalorizar

subproductos y optimizar energía y operaciones, fomentando la sostenibilidad (Kirchherr *et al.*, 2018; Subin *et al.*, 2024). Aquí incluimos algunos ejemplos de cómo otras industrias extractivas han implementado este enfoque:

* Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, México.
Contacto: nelizond@yahoo.com, maria.alcortagr@uanl.edu.mx, rmestrada27@gmail.com

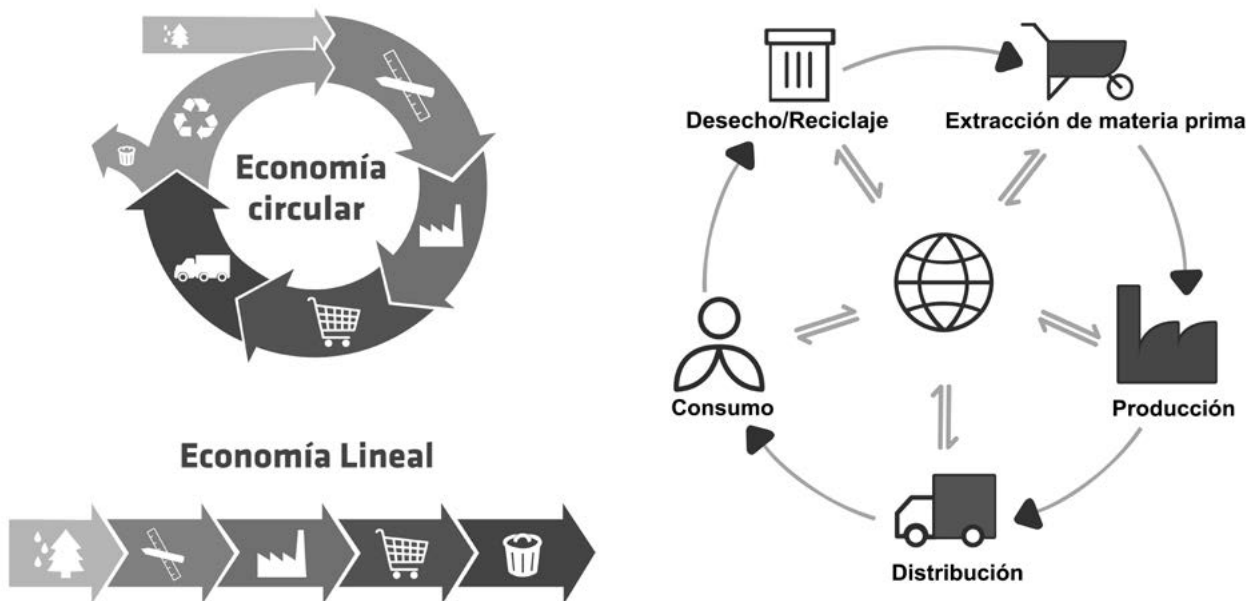


Figura 1. a) Economía circular incluye el reciclaje en comparación con la economía lineal, y b) análisis de ciclo de vida de un producto.

Minería de cobre en Chile: algunas empresas mineras han implementado programas de reciclaje de agua y reutilización de relaves. Por ejemplo, la empresa Codelco ha desarrollado tecnologías para tratar y reutilizar el agua en sus procesos, reduciendo así el consumo de recursos hídricos (Codeco Sustainability Report, 2020).

Reciclaje de metales en la industria del aluminio: se han adoptado prácticas de economía circular mediante el reciclaje de chatarra de aluminio. Empresas como Alcoa han establecido procesos de reciclaje, lo que reduce la necesidad de extracción de bauxita y disminuye las emisiones de carbono (Alcoa Sustainability Report, 2020).

El análisis de ciclo de vida (LCA) (figura 1b) proporciona una visión detallada de los impactos ambientales asociados con cada etapa del proceso, desde la extracción de la mena de cuprita hasta la producción y aplicación de los nanomateriales.

En este trabajo exploramos la economía circular mediante la obtención de precursores de cobre directamente del mineral cuprita, lo que representa un ahorro significativo en comparación con la compra de precursores puros a empresas químicas. Utilizamos química verde al emplear desechos agrícolas para sintetizar nanopartículas de cobre, lo que no sólo promueve el reciclaje, también reduce el impacto ambiental al evitar el uso de reactivos químicos. Además, investigamos una aplicación ambientalmente beneficiosa: la degradación de colorantes en aguas residuales generadas por la industria textil.

La biosíntesis de nanopartículas y nanocompuestos de cobre mediante química verde se ha convertido en una alternativa sostenible, reduciendo el uso de químicos tóxicos y aprovechando residuos agrícolas que ayudan a la reducción de iones metálicos (Su *et al.*, 2024; Vincent *et al.*, 2022). Los nanomateriales obtenidos tienen aplicaciones en fotocatalisis para degradar contami-

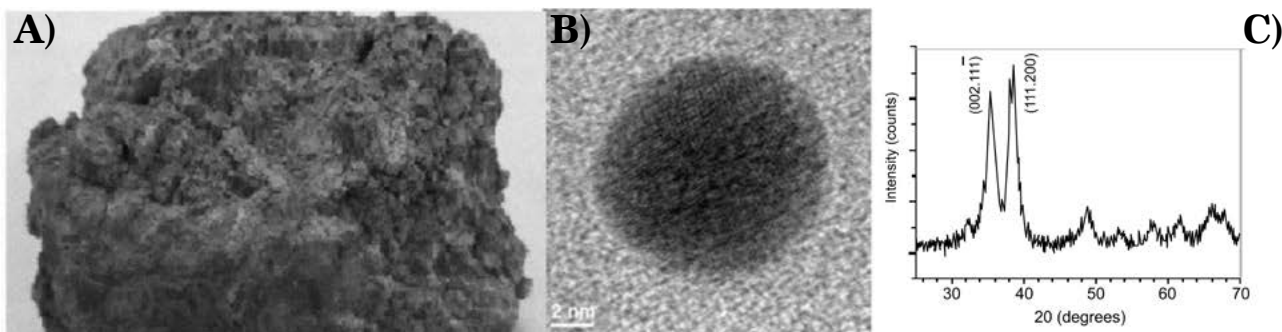


Figura 2. Caracterización de nanopartículas de óxido de cobre obtenidas directamente del *a)* mineral de cobre cuprita, *b)* imagen HRTEM de una nanopartícula esférica de 6 nm de diámetro con alta cristalinidad, y *c)* difractograma de rayos X correspondiente a las nanopartículas de óxido de cobre obtenidas mediante el método de polvos.

nantes en agua y aire (Priya *et al.*, 2021; Bonthula *et al.*, 2023); en microelectrónica mejoran la eficiencia de dispositivos (Fen y Zhu *et al.*, 2019; Bonthula *et al.*, 2023) y en agricultura como fertilizantes inteligentes y agentes antimicrobianos (Su *et al.*, 2024).

En salud, las nanopartículas de cobre destacan por sus propiedades antimicrobianas, utilizadas en apósitos y dispositivos biomédicos (Ermini y Voliani, 2021). Métodos del tipo espectroscopia UV-Vis, XRD y SEM permiten analizar estructuras y optimizar su desempeño en diversas aplicaciones (Baraiya *et al.*, 2020).

El desarrollo de un proceso sostenible que utilice residuos de la minería del cobre, como la mena de cuprita, para producir nanomateriales representa un avance clave hacia la economía circular. Este enfoque reduciría los impactos ambientales y generaría nuevas oportunidades de aprovechamiento más eficiente de recursos, promoviendo la sostenibilidad ambiental y económica.

METODOLOGÍAS AVANZADAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE NANOMATERIALES DE COBRE

Difracción de Rayos X (XRD): estructura cristalina. Esta técnica nos permite identificar la estructura cristalina y las fases de los nanomateriales, permitiendo

verificar su composición y estructura atómica, clave para aplicaciones como la fotocatalisis y la electrónica, que influyen en la conductividad y reactividad química.

Microscopía electrónica: morfología nanométrica. El SEM y TEM permiten analizar la morfología y la estructura interna de los nanocompuestos, revelando detalles sobre la forma, distribución y defectos esenciales en aplicaciones médicas y microelectrónicas.

Espectroscopia UV-Vis: propiedades ópticas. La espectroscopia UV-Vis evalúa las propiedades de los nanomateriales, como el *gap* de energía y la absorción óptica, fundamentales en las aplicaciones fotocatalíticas y la purificación de agua.

Las técnicas mencionadas permiten un análisis integral de los nanocompuestos de cobre, desde su estructura cristalina hasta su comportamiento óptico, asegurando la calidad del material y guiando su optimización para aplicaciones específicas. Además, promueven soluciones más eficientes y sostenibles. En la figura 2, el mineral de cobre cuprita (*a*, *b*) muestra una imagen HRTEM de una nanopartícula esférica de 6 nm con alta cristalinidad, y se presenta el difractograma de rayos X (*c*) por el método de polvos de nanopartículas de óxido de cobre.

Sinergia de las técnicas de caracterización. La combinación de estas metodologías permite un análisis integral de los nanocompuestos de cobre, cubriendo aspectos estructurales, morfológicos y funcionales, lo cual es clave al desarrollar materiales avanzados que cumplan con los requisitos de sostenibilidad y rendimiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

El proceso de síntesis de $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ se realiza a partir de polvos de piedra de mina. Este proceso incluye la disolución de los polvos en ácido clorhídrico y agua desionizada, seguido de ultrasonido, lavado por centrifugación con agua y alcohol, y repetidos ciclos de dispersión y centrifugación para eliminar impurezas. El precipitado final se seca en una estufa y se caracteriza. La solución resultante se trata con etanol y se calienta en un horno a 90°C durante tres horas con el objetivo de obtener el producto final.

Como ejemplo integrado: desarrollo de un catalizador fotocatalítico. Las industrias, en especial la textil, liberan grandes cantidades de colorantes en fuentes de agua naturales, lo que representa una amenaza para la salud humana. El azul de metileno, en particular, es tóxico y puede ser cancerígeno con el contacto regular. Su eliminación es crucial, ya que su ingesta puede provocar diversos problemas de salud, entre otros dificultad respiratoria, trastornos abdominales, digestivos y mentales, náuseas, diarrea, vómitos e irritaciones en la piel y los ojos. Incluso el contacto directo con la piel puede causar enrojecimiento y picazón.

Este tinte textil es tóxico, cancerígeno y no biodegradable, lo que lo convierte en un contaminante peligroso para el agua potable y la vida marina. Es esencial eliminarlo del agua residual antes de su vertido. Los nanomateriales, nanopartículas y nanotubos son efectivos al absorber colorantes debido a su gran área de superficie y sitios activos. Estructuras como los nanotubos de ZnO han

demostrado una fuerte capacidad de absorción de contaminantes, lo que los hace prometedores en la degradación de tintes.

La nanotecnología ofrece un gran potencial al crear nanomateriales capaces de eliminar contaminantes del tipo azul de metileno de aguas residuales. Estos materiales innovadores, desarrollados a escala nanométrica, ayudan a purificar el agua y promueven la sostenibilidad ambiental. Es crucial seguir investigando en este campo si se desea encontrar soluciones efectivas y accesibles, especialmente en México y países similares, y combatir la creciente contaminación del agua a nivel global.

La adsorción es el método más sencillo para eliminar colorantes como el azul de metileno (MB). Utilizando materiales modernos y naturales, especialmente bioabsorbentes vegetales, se busca mejorar la eficiencia y reducir costos. Un estudio reciente demostró que las cáscaras de habas pueden eliminar hasta el 90% del MB a una concentración de 50mg/l , destacando su potencial absorbente (Khan *et al.*, 2022).

En el diseño de un fotocatalizador contra la degradación de contaminantes en aguas residuales:

1. XRD, confirmaría la estructura cristalina adecuada en las reacciones catalíticas.
2. SEM/TEM detallarían la morfología y tamaño de las partículas para maximizar la superficie activa y la cristalinidad de las muestras.
3. UV-Vis analizaría el comportamiento óptico, optimizando el *gap* de energía que activa el material con luz visible.

ACTIVIDAD FOTOCATALÍTICA

La eficiencia de degradación (%) se calculó utilizando la ecuación 2:

$$D = (C1 - C2) \times 100 / C1$$

donde D es la eficiencia de degradación (%) y $C1$ y $C2$ son las cantidades inicial y final del colorante en el líquido (mg/l). Usando esta ecuación, las nanopartículas de CuO mostraron una buena eficiencia en la degradación de metileno, logrando hasta un 24% de remoción en cinco minutos y un 65% en 40 minutos al utilizar 10 mg de nanopartículas de CuO en 60 ml de azul de metileno (MB) a 10 mg/l (figura 3).

En la figura 3 se observa el fotocatalizador con óxido de grafeno y partículas de óxido de cobre, eficaz en la degradación del azul de metileno bajo luz ultravioleta, el grado de degradación y los espectros UV del azul de metileno a diferentes tiempos.

Este enfoque asegura un catalizador eficiente y viable con miras a aplicaciones industriales, entre ellos la degradación de colorantes en la industria textil. El análisis UV del azul de metileno (MB) es esencial en estudios de fotodegradación, basándose en su espectro UV-Visible. La absorción máxima a 664 nm disminuye gradualmente durante el proceso, como se observa en la figura 3 (Verástegui *et al.*, 2022).

CONCLUSIONES

El estudio confirma la viabilidad de la exploración de la economía circular en la minería del cobre mediante la biosíntesis de nanopartículas de óxidos de cobre a partir de cuprita. Se destaca la reducción del impacto ambiental y el uso de química verde para fomentar la sostenibilidad.

Los nanomateriales obtenidos demostraron alta eficiencia en la degradación de contami-

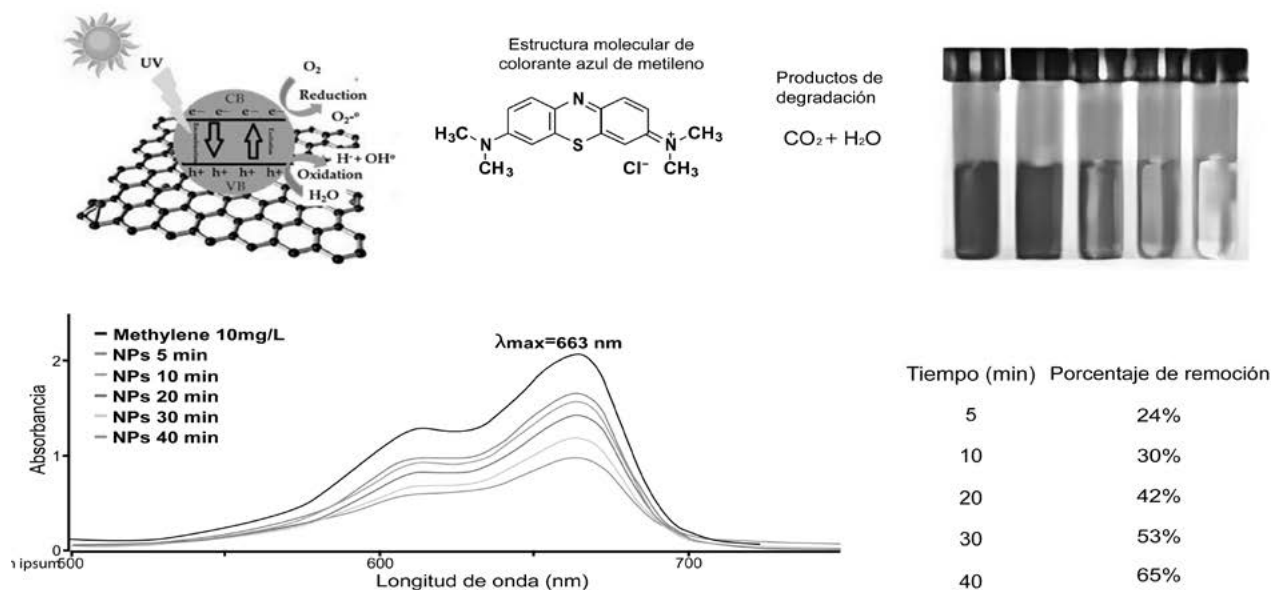


Figura 3. Fotocatalizador compuesto de óxido de grafeno y óxido de cobre a escala nanométrica, eficaz para degradar azul de metileno bajo luz UV. UV muestran la actividad catalítica en porcentajes de remoción de MB contra el tiempo en minutos.

nantes, logrando un 65% de remoción de azul de metileno en 40 minutos mediante fotocatalisis, lo que evidencia su potencial en la purificación del agua.

Las caracterizaciones mediante UV-Vis, XRD, SEM y TEM validaron la estructura y propiedades ópticas de los materiales, asegurando su idoneidad en aplicaciones tecnológicas y ambientales.

Este enfoque permite reducir el uso de químicos tóxicos y transformar desechos mineros en materiales funcionales de alto valor agregado, impulsando una minería más sustentable. Además, el desarrollo de estos nanomateriales abre oportunidades en sectores como la electrónica, la agricultura y la salud, fortaleciendo la nanotecnología en la economía circular.

Sin embargo, si se desea evaluar la economía circular es necesario un análisis más detallado del impacto ambiental LCA y la optimización de los procesos involucrados en este estudio. Esto proporcionará una visión más completa del impacto ambiental y ayudará a comparar la sostenibilidad de diferentes métodos de síntesis.

REFERENCIAS

- Alcoa. (2020). *Sustainability Report 2020*, <https://www.alcoa.com/sustainability/en/home.page>
- Bonthula, Sumalatha, Bonthula, Srinivasa R., Ramyakrishna, Pothu, *et al.* (2023). Recent advances in copper-based materials for sustainable environmental applications, *Sustain. Chem.*, 4(3), 246-271, <https://doi.org/10.3390/suschem4030019>
- Codelco. (2020). *Sustainability Report 2020*, <https://www.codelco.com/sustainability-report-2020>
- Ermini, María L., y Voliani, Valerio. (2021). Antimicrobial nano-agents: The copper age, *ACS Nano*, 15(7), 6008-6029, <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c10756>
- Feng, Yang, y Zhu, Jian. (2019). Copper-based nanomaterials for flexible and stretchable electronics: Synthesis, properties, and applications, *Science China Materials*, 62, 1679-1708, <https://doi.org/10.1007/s40843-019-94685>
- Harishchandra, Baraiya D., Pappuswamy, Manikantan, Antony, P.U., *et al.* (2020). Copper nanoparticles: A review on synthesis, characterization and applications, *Asian Pacific Journal of Cancer Biology*, 5(4), 201-210, <https://doi.org/10.31557/apjcb.2020.54.201>
- Khan, Idrees, Saeed, Khalid, Zekker, Ivar, *et al.* (2022). Review on methylene blue: Its properties, uses, toxicity and photodegradation, *Water*, 14(2), 242. <https://doi.org/10.3390/w14020242>
- Kirchherr, Julian, Piscicelli, Laura, Bour, Ruben, *et al.* (2018). Barriers to the circular economy: Evidence from the European Union (EU). *Ecological Economics* 150 (2018), 264-272 <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.04.028>
- Priya, S. Chandhini, Vijayalakshmi, S., Raghavendra, S. Gokul, *et al.* (2021). A critical review on efficient photocatalytic degradation of organic compounds using copper-based nanoparticles, *Materials Today: Proceedings*, 80, 30753081. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.169>
- Su, Chengpeng, Chen, Anqi, Liang, Weiyu, *et al.* (2024). Copper-based nanomaterials: Opportunities for sustainable agriculture, *Science of The Total Environment*, 926, 171948, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171948>
- Subin, Antony J., Calhoun, Joy, Renteria, Otoniel B., *et al.* (2024). Promoting a circular economy in mining practices, *Sustainability*, 16(24), 11016, <https://doi.org/10.3390/su162411016>

Verástegui-Domínguez, Luz H., Elizondo-Villareal, Nora, Martínez-Delgado, Dora I., *et al.* (2022). Eco-friendly reduction of graphene oxide by aqueous extracts for photocatalysis applications, *Nanomaterials*, 12(21), 3882, <https://doi.org/10.3390/nano12213882>

Vincent, Jei, Lau, Kam S., ChiaYan Evyan, Yang, *et al.* (2022). Biogenic synthesis of copper-based nanomaterials using plant extracts and their applications: Current and future directions, *Nanomaterials*, 12(19), 3312, <https://doi.org/10.3390/nano12193312>

Recibido: 13/12/2025
Aceptado: 10/02/2025

Descarga aquí nuestra versión digital.

