

Aplicación de Nanomateriales base Magnetita (Fe_3O_4) en el Tratamiento de Aguas Residuales

Application of Magnetite (Fe_3O_4)-based Nanomaterials in Wastewater Treatment

Carlos Antonio Leyva-Isaac^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-3516-3374>

Enry Guerra-Vera¹ <https://orcid.org/0009-0008-4091-7725>

Yereni Martínez-Galán² <https://orcid.org/0009-0004-4501-047X>

Johan Felipe Aguirrezabal-de la Rosa² <https://orcid.org/0009-0007-2042-8943>

¹Grupo de Investigación de Análisis de Procesos, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE), La Habana, Cuba

*Autor para la correspondencia. Correo electrónico: arb30@nauta.cu

RESUMEN

Las aguas residuales no tratadas se canalizan hacia los cuerpos de aguas naturales, por lo cual son un factor determinante en la contaminación de los recursos hídricos. Las nanopartículas de magnetita se aplican con éxito en la remoción e inmovilización de contaminantes en el agua, debido a sus propiedades estructurales, morfológicas, ópticas, térmicas, y magnéticas. Teniendo en cuenta las fuentes de magnética en los residuos sólidos de las industrias de níquel en Cuba por la tecnología Caron, se realizó esta investigación con vistas a analizar los métodos de síntesis y aplicaciones de nanomateriales base magnetita para el tratamiento de aguas residuales. Se determinó que se presentan notable aplicación en la adsorción de metales (As, Cu, Fe, Ni, Zn, Mn, Pb, Cd) y materia orgánica (colorantes, antibióticos) de aguas residuales, en la fotocatálisis y combinado con coagulantes naturales, como resultado se logra una mejora significativa en la calidad de los efluentes industriales.

Palabras clave: magnetita, nanomateriales, tratamiento de agua residual

ABSTRACT

Untreated wastewater is channeled to natural water bodies, so it is a determining factor in the pollution of water resources. Magnetite nanoparticles are successfully applied in the removal and immobilization of contaminants in water, due to their structural, morphological, optical, thermal, and magnetic properties. Taking into account the sources of magnetic in the solid waste of the nickel industries in Cuba by the Caron technology, this research was carried out with a view to analysing the methods of synthesis and applications of magnetite-based nanomaterials for wastewater treatment. It was determined that there is a remarkable application in the adsorption on metals (As, Cu, Fe, Ni, Zn, Mn, Pb, Cd) and organic matter (dyes, antibiotics) of wastewater, in photocatalysis and combined with natural coagulants, as a result a significant improvement in the quality of industrial effluents is achieved.

Keywords: magnetite; nanomaterials; wastewater treatment.

Introducción

Las aguas residuales no tratadas se canalizan hacia los cuerpos de agua naturales y ocasionan impactos sociales, económicos y ambientales negativos. Las industrias mineras, textiles, petroquímicas, farmacéuticas, así como su combinación con las aguas residuales domésticas, aportan los principales contaminantes sobre los recursos hídricos, debido a las emanaciones de colorantes, aditivos y productos químicos orgánicos e inorgánicos, que aumentan la toxicidad, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la demanda química de oxígeno (DQO) y el carbono orgánico total (COT). ^(1,2,3)

En la actualidad, se conocen numerosos métodos de tratamiento para la remoción de los contaminantes, por ejemplo, la ósmosis inversa, la microfiltración, las técnicas biológicas, la fotocatalisis y la adsorción. Se señalan entre las limitaciones a evaluar: la frecuencia del mantenimiento, el coste de funcionamiento, el tiempo de remoción, el uso de productos químicos caros y la generación de nuevos residuales. ⁽⁴⁾

En el contexto de la cuarta Revolución Industrial, la nanotecnología se ha vuelto cada vez más importante en una amplia gama de campos de investigación, constituyendo la nanoremediación una tecnología novedosa que implica el uso de nanomateriales para la eliminación o estabilización de contaminantes.⁽⁵⁾ Se

debe a las nuevas y mejoradas propiedades de la nanoescala que las hacen preferibles a los métodos de tratamiento convencionales, donde se incluyen: propiedades magnéticas, eléctricas, ópticas, actividad catalítica y alta reactividad. ⁽⁶⁾

Investigaciones previas demostraron que las nanopartículas (NPs) de magnetita tienen aplicación en la eliminación e inmovilización de contaminantes en el agua. ^(7,8,9). En Cuba, las colas del proceso Caron de producción de Ni+Co contienen aproximadamente 43% de hierro, como fases de maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) y magnetita (Fe_3O_4). ⁽¹⁰⁾ Estas fases se forman durante el proceso de reducción y lixiviación del mineral ^(11,12,13). La combinación de las propiedades tamaño de las partículas y susceptibilidad magnética de las colas, las técnicas de tamizado húmedo y tostación, propician concentrados de hierro entre un 55-60%. ^(14,15)

Esta investigación se realiza con el propósito de analizar los métodos de síntesis y aplicaciones de nanomateriales base magnetita para el tratamiento de aguas residuales.

Materiales y métodos

Se realizó una síntesis bibliográfica de estudios experimentales, revisiones y monografías, acerca de los métodos de síntesis, composición, las propiedades químico-físicas, morfología, y las aplicaciones de nanomateriales base magnetita para el tratamiento de aguas residuales.

Resultados y discusión

La magnetita (Fe_3O_4) se suele deducir como óxido de hierro (III) debido a la presencia de elementos de hierro ferroso Fe(II) y hierro férrico Fe(III) . La proporción estequiométrica Fe(II):Fe(III) es 1:2, donde el hierro divalente puede estar total o parcialmente sustituido por Zn, Mn, Co y otros iones divalentes. La magnetita (Fe_3O_4) pura en polvo y en suspensión coloidal presenta un color negro azabache; bajo la exposición al aire, se oxida a maghemite ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) que presenta una coloración marrón.

El comportamiento de las NPs de magnetita difiere en tres diferentes fases. En el rango de temperatura entre 0-119K (rango de transición de Verwey) pasa de fase semiconductora a la fase metálica. En el rango de temperatura de Curie de 120-840K muestra características ferromagnéticas y la tercera fase por encima

de 840K se comporta como un metal paramagnético. ^(17,18,19) La conductividad térmica disminuye significativamente a una temperatura de 120K debido a que las NPs pasan de una estructura cúbica a una estructura ortorrómbica. ^(16,17,19) La adición de NPs disminuye la conductividad térmica de los fluidos agua y el etilenglicol. ⁽²⁰⁾ A 297 K la saturación de magnetización a un campo magnético de 1,5 T es 88.1 emug. ⁽²¹⁾

Síntesis de nanopartículas de magnetita

La síntesis de nanopartículas (NPs) de magnetita se realiza mediante varios métodos tales como: coprecipitación, hidrotérmico, solvotérmico, sol-gel, vía electroquímica y la biosíntesis (tabla 1).

Tabla 1 – Síntesis de nanopartículas de magnetita.

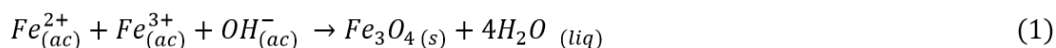
Método	Morfología	Características	Aplicación	Ref.
Biosíntesis	Esférica y globular	D: 46,98 nm Sm: 90 emu/g	Adsorción de arsénico (III)	Balakrishnan (2020) ⁽²⁵⁾
Biosíntesis	Piezas superpuestas	D: 12,5 nm As: 32,66 m ² /g Sm: 24,5 emu/g	Adsorción de Tinte MB	Bassim (2022) ⁽²⁶⁾
Coprecipitación	Esférica	D: 29,2 nm. As: 70,1 m ² /g	Adsorción de azul de metileno	Sohair (2024) ⁽⁸⁾
Coprecipitación	Esférica	As: 6,67 m ² /g	Adsorción de Tinte MB	Bassim (2022) ⁽²⁶⁾
Coprecipitación	Esférica.	As: 34,4 m ² /g	Adsorción de antibiótico Levofloxacin	Denga (2025) ⁽²⁸⁾
Electroquímica	Esférica	D: 10-30 nm Sm: 60-70 emu/g	-	Fajarah (2012) ⁽²⁹⁾
Electroquímica	Esférica	D: 37,9 nm As: 17,20 m ² /g Sm: 62 emu/g	Adsorción de Cr, Cd, Ni, Zn	Manrique (2019) ⁽³⁰⁾

D: Diámetro del cristal. A_s: Área superficial. Sm: Saturación magnética.

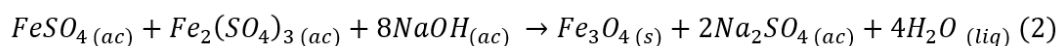
Se ha prestado atención a la biosíntesis (o síntesis verde) mediante la acción de microorganismos como hongos *Aspergillus*, bacterias *Bacillus* y *Aeromonas* ^(22,23,24,25). Además, se aplican extractos de residuos vegetales y agrícolas como hojas de Mango (*Mangifera indica*), Aloe vera (*Aloe barbadensis miller*), Eucalipto (*Eucalyptus globulus*), Moringa (*Moringa oleifera*) y cítricos ⁽²⁶⁾, entre otros; que contienen compuestos que actúan como agentes reductores y de recubrimiento. ^(6, 27).

La coprecipitación consiste en la alcalización de los precursores metálicos. Los precursores 0.75M FeCl₃ y 0.75M Fe₂SO₄ se toman en una proporción de 2:1 y se agitan intensamente durante 15 min a temperatura ambiente y atmosfera inerte, luego se añade hidróxido de sodio a intervalos regulares. La suspensión se vuelve de color negro. Se continúa agitando durante 1 h para dispersar uniformemente las Nps magnéticas. Las Nps se centrifugan y se lavan con agua

desionizada. Luego, el polvo de magnetita se dispersa en agua desionizada (1).
(16, 28, 29)



Otra vía es la mezcla estequiométrica de las sales $Fe_2(SO_4)_3$ y $FeSO_4$, la adición de hidróxido de sodio en agitación continua hasta pH=11, el calentamiento hasta 80°C, filtración, lavado hasta pH=7, y secado a 105°C. (29)



El método hidrotérmico consiste en que solventes y surfactantes reaccionan con materiales sólidos a alta temperatura y presión. Bajo el efecto de aditivos como ácido cítrico o piridina, y mediante el incremento de la temperatura de 160-200°C, varía la morfología del producto y aumenta el tamaño promedio de los cristales debido a la diferente velocidad de nucleación. (26)

Por su parte, el método solvotérmico utiliza compuestos organometálicos, se realiza en autoclaves a temperatura entre 130-250°C y presión entre 0,3-4 MPa. Se aplican los reactivos: precursor cloruro de hierro (II), reductor etilenglicol o dietilamina, solventes urea y acetato de amonio, o 1,2-propanodiol. (32, 33)

El método electroquímico consiste en la electro-oxidación del hierro con el par de electrodos ánodo de sacrificio de hierro y el cátodo, con la aplicación de un electrolito (Cl^{-} , SCN^{-} , SO_4^{2-} , $S_2O_3^{2-}$). Las variables fundamentales del proceso son: pH, densidad de corriente, temperatura y velocidad de agitación. (18, 26, 29, 30)

Aplicación de Nps de magnetita en la adsorción de metales

Las NPs de magnetita exhiben gran estabilidad química y alta relación superficie-volumen, lo que confiere una notable capacidad de adsorción de metales (tabla 2).

Presentan amplia evaluación para la remoción de arsénico (As). A partir de la síntesis por vía verde se obtuvo un 95% de eficiencia de remoción de As(III), a una dosis de 4 g/L y pH 5.5 (25). Las Nps de Fe_3O_4 funcionalizadas con ácido ascórbico, lograron alta dispersabilidad y estabilidad, propiedades superparamagnéticas a temperatura ambiente, y satisfactoria adsorción de As(III) y As (IV). (34)

Tabla 2 - Nanomateriales base magnetita para la adsorción de metales

Adsorbente	Características	Adsorbato	Q_e (mg/g)	Ref.
Magnetita - maghemita	D: 20 - 40 nm pH: 2 C ₀ : 1,5 mg/L	As(III)	3,69	Chowdhury (2010) ⁽⁷⁾
		As(V)	3,71	
Maghemita ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$)	D: 3,8-18,4 nm	As(V)	50,0	Tuutijarvi (2009) ⁽⁸⁾
Fe_3O_4 - Ácido ascórbico	D < 10 As: 179 m ² /g Sm: 40 emu/g ⁻¹	As(V)	16,56	Feng (2012) ⁽³⁴⁾
		As(III)	46,06	
Fe_3O_4 - $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Nanoestructura jerárquica D: 20 nm, L: 300 nm	As(V)	137,5	Mou (2011) ⁽³⁵⁾
Fe_3O_4 - goma arábiga	D: 13-67 nm	Cu(II)	38,5	Benerjee (2007) ⁽³⁶⁾
Fe_3O_4 - Chitosan - α - ketoglutaric acid	D: 30 nm	Cu(II)	96,15	Zhou (2009) ⁽³⁷⁾
Fe_3O_4	D: 8 nm As: 95 m ² /g	Pb(II)	27,8	Giraldo (2013) ⁽⁵²⁾
		Cu(II)	25,6	
		Zn(II)	24,6	
		Mn(II)	22,5	
Fe_3O_4	As: 125 m ² /g	Pb(III)	161,3	Lasheen (2016) ⁽⁵³⁾
		Cu(II)	138,0	
		Cd(II)	121,0	
		Ni(II)	120,0	
Fe_3O_4 -Caolinita	As: 68,2 m ² /g	Pb(III)	106,0	Lasheen (2016) ⁽⁵³⁾
		Cu(II)	98,0	
		Cr(IV)	100,0	
		Cd(II)	97,0	
		Ni(II)	95,2	

D: Diámetro, L: Longitud. As: Área superficial. Sm: Magnetización de saturación. Q_e : Capacidad de adsorción

Además, Nps de magnetita se utilizaron para la eliminación e inmovilización de contaminantes en agua. Se logró una remoción de 44 % As, 65 % Cd, 60 % Cu, 47 % Fe, 40 % Mn, 65 % Pb y 62 % Zn, a una dosis de 25 g/kg e incubación por 45 días ⁽⁵⁾. Los iones de metales pesados Pb, Cd, Cu y Ni, se removieron simultáneamente del agua de río con Nps de magnetita mesoporosa, con eficiencias de remoción del 98%, 87%, 90% y 78% respectivamente. ⁽³⁸⁾ Nps de magnetita y nanocompósito Fe_2O_3 -caolinita se sintetizaron por coprecipitación para la adsorción de metales pesados (cobre, plomo, cadmio, cromo y níquel) y se logró capacidad de adsorción máxima siguiendo la isoterma de Langmuir entre 65,2 y 106 probaron. ⁽⁵³⁾

Aplicación de magnetita en la adsorción de materia orgánica

Nanopartículas y nanocompuestos base magnetita (Fe_2O_3), óxidos metálicos, hidróxidos dobles laminares (LDH) ⁽³⁹⁾ y zeolitas, presentan aplicación en la remoción de materia orgánica de aguas residuales como: pesticidas organofosforados, fármacos (antibióticos, fluoxetina, paroxetina, carbamazepina, diazepam) ⁽⁴⁰⁾, y colorantes. ⁽⁸⁾ (tabla 3).

NPs de magnetita sintetizadas por el método de coprecipitación presentaron eficiencia de remoción de 95% de azul de metileno a pH 6,5, dosis 50 mg/L y concentración de contaminante 10 mg/L ⁽⁸⁾. El antibiótico levofaxín a una concentración de 60 mg/L se removió con el nanocompósito Fe₃O₄@TiO₂@Zeolite a una dosis de 0,4 g para una eficiencia de remoción de 92,4-96,9 % ⁽²⁸⁾. Mediante el método hidrotérmico se sintetizaron nanoesferas huecas de magnetita para la remoción del 92% TNT a pH 6.5, dosis de adsorbato 600 mg/L y 50 min de contacto. ⁽⁴¹⁾

Tabla 3 – Nanomateriales base magnetita para la adsorción de materia orgánica

Adsorbente	A _s (*) (m ² /g)	Adsorbato	Q _e (**) (mg/g)	Ref.
Fe ₃ O ₄ (nanopartículas)	70,10	Azul de metileno	50	Sohair (2024) ⁽⁸⁾
Fe ₃ O ₄ (nanopartículas)	32,66	Azul de metileno	-	Bassim (2022) ⁽²⁸⁾
Fe ₃ O ₄ (nano esferas huecas)	66,06	Trinitrotolueno (TNT)	70	Rehman (2022) ⁽⁴¹⁾
Fe ₃ O ₄ @TiO ₂ @Zeolite (nanocompósito)	33,46	antibiótico Levofaxin	27	Denga (2025) ⁽²⁸⁾
Fe ₃ O ₄ @ Ni/Fe LDH (nanocompósito)	93,90	Azul de metileno	35	Shi (2020) ⁽²⁹⁾

(*)A_s: Área superficial. (**)Q_e: capacidad de adsorción

Por método verde a partir de sustratos de cítricos, la magnetita aportó una eficiencia de remoción de 93,14% del colorante tinte MB, a una concentración de adsorbato de 10,02 g/L, pH 8,98, dosis de adsorbente 998 mg/L y 44 min de contacto. ⁽²⁶⁾

Fotocatálisis

La fotocatalisis es un proceso heterogéneo donde se produce una reacción química fotoinducida en la superficie de los materiales semiconductores (fotocatalizador) tras la exposición a fotones. En la eficiencia del proceso inciden parámetros como las propiedades estructurales, morfológicas, ópticas y magnéticas. Las Nps de magnetita presentan banda prohibida pequeña, elevada estabilidad térmica y biocompatibilidad, por lo cual tienen aplicación como material precursor de fotocatalizador para la remediación de aguas residuales (tabla 4).

Tabla 4 – Fotocatálisis base nanopartículas de magnetita para la remediación de agua residuales

Fotocatalizador	Luz incidencia	Características	Adsorbato	Degradación (%)	Ref.
Fe ₃ O ₄ @ZnWO ₄ /CeVO ₄	vis	D:58,7 nm Sm: 1,5 emu/g t: 120 min d: 0,02 g/100 mL	MB	84	Amin (2020) ⁽⁴³⁾
Fe ₃ O ₄ @TiO ₂	UV	D:420 nm t: 50 min d: 0,1 g/100 mL	RhB	25,8	Choi (2013) ⁽⁴⁴⁾
Fe ₃ O ₄ @ZnWO ₄	UV	t: 300 min d: 0,1 g/100 mL	RhB	100	Wang (2024) ⁽⁴⁵⁾
Fe ₃ O ₄ @Bi ₂ WO ₄	vis	t: 180 min	RhB	95,8	Liu (2013) ⁽⁴⁶⁾
Fe ₃ O ₄ @ZnO	UV	t: 60 min d: 0,01 g/100 mL	MB	94	Karunakaran (2014) ⁽⁴⁷⁾
Fe ₃ O ₄ @TiO ₂	vis	D:120 nm t: 23 min	Rojos ácido 73	94	Sun (2022) ⁽⁴⁸⁾

D: tamaño promedio del cristal. MB: Azul de metileno, RhB: Rodamina B

Coagulación-floculación

La introducción de Nps de Fe₃O₄ a los coagulantes naturales favorecen los procesos de coagulación y floculación, incrementan la velocidad de sedimentación y disminuyen la turbidez, el color aparente, la concentración de iones fosfatos y la DQO en aguas residuales. Tal es el caso de la Fe₃O₄ funcionalizada con polímeros como cáscaras de huevo, quitosano, almidón de arroz, cáscaras de plátano y moringa oleífera. (2, 49, 50, 51)

Conclusiones

Se determinó que las nanopartículas de magnetita se pueden sintetizar por varios métodos entre los que se destacan la biosíntesis, la coprecipitación química, y la vía electroquímica. Se determinó que se emplean para la adsorción de metales y materia orgánica de aguas residuales, en la fotocatálisis y combinado con coagulantes naturales, como resultado se logra una mejora significativa en la calidad de los efluentes industriales. Los avances y aplicaciones de los nanomateriales base magnetita, y las fuentes de este material en los residuos sólidos de las industrias del níquel presentan este material como una alternativa técnicamente viable para el tratamiento de residuales.

Referencias bibliográficas

1. THABET, R.H., FOUAD, M.K., ALI, I.A., et al. Magnetite-based nanoparticles as an efficient hybrid heterogeneous adsorption/oxidation process for reactive textile dye removal from wastewater matrix. *IJEAC*. 2021, pp.5-21. <https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1896716>
2. ABU-DALO, M., ABDELNABI, J., AL-RAWASHED, N.A.F., et al. Coupling coagulation-flocculation to volcanic tuff-magnetite nanoparticles adsorption for olive mill wastewater treatment. *ENMM*. 2022, **17**(100626). <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100626>
3. AMO-DUODU, G., TETTEH, E.K., RATHILAL, S., et al. Effect of engineered biomaterials and magnetite on wastewater treatment: Biogas and kinetic evaluation. *Polymers* [en línea]. 2021, **13**(4323). <https://doi.org/10.3390/polym13244323>
4. MADHURA, L., SINGH, S., KANCHI, S., et al. Nanotechnology-based water quality management for wastewater treatment. *ECL*. 2019, <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0778-8>
5. CABALLERO-MEJÍA, B., MOLINER, A., ESCOLÁSTICO, C., et al. Use of magnetite nanoparticles and magnetic separation for the removal of metal (loid)s from contaminated mine soils. *JHM*. 2025, **486**(137081), pp. 4-13. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.137081>
6. SHUKLA, S., KHAN, R., DAVEREY, A. Synthesis and characterization of magnetic nanoparticles, and their applications in wastewater treatment: A review. *ETI*. 2021, **24**(101924), pp. 6-14. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101924>
7. CHOWDHURY, RAHMAN, S., YANFUL. Arsenic and chromium removal by mixed magnetite-maghemite nanoparticles and the effect phosphate on removal. *JEM*. 2010, **91**(11), pp. 2238-2247.
8. SOHAIR T. ALY, AMGAD SAED, ALAA MAHMOUD, MAHMOUD BADR, SHADY S. GARAS, SHEHAB YAHYA, KAREEM H. HAMAD. Preparation of magnetite nanoparticles and their application in the removal of methylene blue dye from wastewater. *Scientific Reports*, 2024, **14**(20100). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-69790-w>
9. TUUTIJÄRVI, LU, J., SILLANPÄÄ, M., CHEN, G. As(V) adsorption on maghemite nanoparticles. *JHM*. 2009, **166**(2-3), pp.1415-1420. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.12.069>

10. ROJAS, P.A., TURRO, B.A. Composición mineralógica de las colas del proceso Caron en Moa, Holguín, Cuba. *Minería y Geología*, 2003, pp.3-4. ISSN 0258-5979
11. CHANG-CARDONA, A.R., ROJAS, V.A. La lixiviación del Proceso CARON: síntesis del conocimiento para su perfeccionamiento industrial. Parte 1. *Tecnología Química*. 2009, **29**(1), pp. 98-107. e-ISSN: 2224-6185.
12. CHANG-CARDONA, A.R., ROJAS, V.A. Comportamiento cinético de los iones de hierro durante la lixiviación estándar QT de minerales reducidos en el proceso "caron" con diferentes aireaciones. *Tecnología Química*. 2013, **33**(2), pp. 157-165. e-ISSN: 2224-6185.
13. ROJAS, V.A., SÁNCHEZ, C.G, MAGAÑA, M.E.A., HERNÁNDEZ, C.A. Extracción potencial de níquel y cobalto con mineral laterítico de mina "Pinares de Mayarí" en la tecnología Caron. Parte I. *Tecnología Química*. 2021, **41**(3), pp. 519-531 e-ISSN: 2224-6185.
14. FERREIRO, Y., LEYVA, O., SÁNCHEZ, A., FIGUEREDO, O. Obtención de un concentrado de hierro a partir de los escombros lateríticos del yacimiento Pinares de Mayarí. *Ciencias Holguín*, 2007, **13**(3).
15. LOYOLA BREFFE, O, BEYRIS-MAZAR, P.E., PALACIOS-RODRÍGUEZ, A, CORREA-CALA, Y. Enriquecimiento de metales en las colas del proceso Caron aplicando intensidad variable del campo magnético. *Minería y Geología*, 2002, **38**(4), pp.331-345. ISSN 1993 8012
16. GANAPATHE, L.S., MOHAMED, M.A., YUNUS, R.M., BERHANUDDIN, D. D. Magnetite (Fe₃O₄) Nanoparticles in Biomedical Application: From Synthesis to Surface Functionalisation. *Magnetochemistry*, 2020, **6**, p.68; <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry6040068>
17. LIU, H., DI VALENTIN, C. Band Gap in Magnetite above Verwey Temperature Induced by Symmetry Breaking. *J. Phys. Chem. C*. 2017, **121**, pp.25736–25742.
18. SETYAWAN, H., & WIDIYASTUTI, W. Progress in the preparation of magnetite nanoparticles through the electrochemical method. *Kona: Powder Science and Technology in Japan*, 2019, **36**(0), pp.145–155. <https://doi.org/10.14356/kona.2019011>
19. WRIGHT, J.P., ATTFIELD, J.P., RADAELLI, P.G. Charge ordered structure of magnetite Fe₃O₄ below the Verwey transition. *Phys. Rev. B*, 2002, **66**, 214422. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.66.214422>

20. ALTAN, C. L., GURTEN, B., SOMMERDIJK, N. A. J. M., BUCAK, S. Deterioration in effective thermal conductivity of aqueous magnetic nanofluids. *Journal of Applied Physics*, 2014, **116**(22), 224904. <https://doi.org/10.1063/1.4902441>
21. DAOUSH, W.M. Co-Precipitation and Magnetic Properties of Magnetite Nanoparticles for Potential Biomedical Applications. *J. Nanomed. Res.* 2017, **5**, pp.1–6.
22. CHEN, R.-H., CHENG, Y.Y., WANG, P., LIU, Z.M., WANG, Y.G., WANG, Y.Y. High efficient removal and mineralization of Cr(VI) from water by functionalized magnetic fungus nanocomposites. *J. Cent. South Univ.* 2020, **27**, pp.1503–1514.
23. OZDEMIR, S., KILINC, E., YALCIN, M.S., SOYLAK, M., SEN, F. A new magnetized thermophilic bacteria to preconcentrate uranium and thorium from environmental samples through magnetic solid-phase extraction. *J. Pharm. Biomed. Anal.* 2020, **186**, 113315.
24. SHI, Z., SHEN, W., YANG, K., ZHENG, N., JIANG, X., LIU, L., YANG, D., ZHANG, L., AI, Z.; XIE, B. Hexavalent chromium removal by a new composite system of dissimilatory iron reduction bacteria *Aeromonas hydrophila* and nanoscale zero-valent iron. *Chem. Eng. J.* 2019, **362**, pp.63–70.
25. BALAKRISHNAN, G.S., RAJENDRAN, K., KALIRAJAN, J. Microbial synthesis of magnetite nanoparticles for arsenic removal. *Journal of Applied Biology & Biotechnology*, 2020 **8**(03), pp.70-75, <https://doi.org/10.7324/JABB.2020.803013>
26. BASSIM, S., MAGEED, A.K., ABDULRAZAK, A.A., MAJDI, H.S. Green Synthesis of Fe₃O₄ Nanoparticles and Its Applications in Wastewater Treatment. *Inorganics*. 2022, **10**, p.260. <https://doi.org/10.3390/inorganics10120260>
27. ALVARADO-NOGUEZ, M.L., MATÍAS-REYES, A.E., PÉREZ-GONZÁLEZ, M., et al. Processing and Physicochemical Properties of Magnetite Nanoparticles Coated with Curcuma longa L. Extract. *Materials*. 2023, **16**(3020), pp. 3-18. <https://doi.org/10.3390/ma16083020>
28. DENG R.M., MAPULA L.M., JEFREY, B., RICHARD, M. Synthesis and characterization of Fe₃O₄@TiO₂@Zeolite nanocomposite adsorbent for the removal of Levofloxacin antibiotic from environmental water matrices. *Journal of the Iranian Chemical Society*, 2025, **22**, pp. 113–128. <https://doi.org/10.1007/s13738-024-03135-2>

29. SHI, S., ZHANG, W., WU, H.; LI, Y., REN, X., LI, M., LIU, J., SUN, J., YUE, T., WANG, J. In Situ Cascade Derivation toward a Hierarchical Layered Double Hydroxide Magnetic Absorbent for High-Performance Protein Separation. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2020, **8**, pp.4966–4974.
30. FAJAROH, F., SETYAWAN, H., WIDIYASTUTI, W., WINARDI, S. Synthesis of magnetite nanoparticles by surfactant-free electrochemical method in an aqueous system. *Advanced Powder Technology*, 2012, **23**(3), pp. 328–333. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2011.04.007>
31. MANRIQUE, J.J., MARRIAGA, C., N., HERNÁNDEZ, R., A., MACHUCA, M. F. Data on the removal of metals (Cr_3^+ , Cr_6^+ , Cd_2^+ , Cu_2^+ , Ni_2^+ , Zn_2^+) from aqueous solution by adsorption using magnetite particles from electrochemical synthesis. *Data in Brief*, 2019, **24**(103956), <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.103956>
32. SURESHKUMAR, V., DANIEL, K., RUCKMANI, K., SIVAKUMAR, M. Fabrication of chitosan-magnetite nanocomposite strip for chromium removal. *AN*. 2015, <https://doi.org/https://doi.org/10.007/s13204-015-0429-3>
33. LIN, X., JI, G.; LIU, Y., HUANG, Q., YANG, Z., DU, Y. Formation mechanism and magnetic properties of hollow Fe_3O_4 nanospheres synthesized without any surfactant. *CrystEngComm*. 2012, **14**, pp. 8658–8663.
34. STOIA, M.; PĂCURARIU, C.; ISTRATIE, R.; NIŢĂNANSKÝ, D. Solvothermal synthesis of magnetic $\text{Fe}_x\text{O}_y/\text{C}$ nanocomposites used as adsorbents for the removal of methylene blue from wastewater. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2015, **121**, pp. 989–1001.
35. FENG, L., CAO, SHU, X. Superparamagnetic high-surface-area Fe_3O_4 nanoparticles as adsorbents for arsenic removal. *JHM*. 2012, 217, pp. 439-446. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.03.073>
36. MOU, F., GUAN, J., XIAO, X., et al. Solvent-mediated synthesis of magnetic Fe_2O_3 chestnut-like amorphous-core/Y-phase-shell hierarchical nanostructures with strong As (V) removal capability. *JMC*. [en línea]. 2011, **21**(14), pp. 5414-5421
37. BANERJEE, S., CHEN, D. Fast removal of copper ions by gum arabic modified magnetic nano-adsorbent. *JHM*. 2007, **147**(3), pp. 792-799. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.079>

38. ZHOU, Y., NIE, H., BRANDFORD-WHITE, C. Removal of Cu_2^+ from aqueous solution by chitosan-coated magnetic nanoparticles modified with α -ketoglutaric acid. *JCIS*. 2009, **330** (1), pp. 29-37. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2008.10.026>
39. FATO, F.P., LI, D.W., ZHAO, L.J., QIU, K.; LONG, Y.T. Simultaneous Removal of Multiple Heavy Metal Ions from River Water Using Ultrafine Mesoporous Magnetite Nanoparticles. *ACS Omega*, 2019, **4**, pp. 7543–7549
40. ROJAS, V., A., PENEDO M.M., VIVES, G. A. NOUREDDINE BARKA, RICARDO, R.A. Nickel removing by electrocoagulation of $\text{Ni(II)-NH}_3\text{-CO}_2\text{-SO}_2\text{-H}_2\text{O}$ system. Kinetics, isothermal, mechanism and estimated cost of operation. *Acta Chimica Slovenica*. 2022, **69**. e-ISSN: 1580-3155. <https://doi.org/10.17344/acsi.2022.7408>
41. AYDIN, S., BEDUK, F., ULVI, A., AYDIN, M.E. Simple and effective removal of psychiatric pharmaceuticals from wastewater treatment plant effluents by magnetite red mud nanoparticles. *STE*. 2021, **784** (147174). pp. 3-8. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147174>
42. REHMAN, S.U., JAVAID, S., SHAHID, M., BAIG, M.M., RASHID, B., SZCZEPANSKI, C.R., CURLEY, S.J. Synthesis of Magnetic Fe_3O_4 Nano Hollow Spheres for Industrial TNT Wastewater Treatment. *Nanomaterials* 2022, **12**, p.881. <https://doi.org/10.3390/nano12050881>
43. AMIN M. M., RAHIMI N. M., FASIHI R., M. Synthesis of magnetic $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ZnWO}_4$ and $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ZnWO}_4/\text{CeVO}_4$ nanoparticles: The photocatalytic effects on organic pollutants upon irradiation with UV-Vis light. *Catalysts (Basel, Switzerland)*, 2020, **10**(5), p.494. <https://doi.org/10.3390/catal10050494>
44. CHOI, K.-H., OH, S.-L., KIM, D.-Y., & JUNG, J.-S. Size dependent photocatalytic activity of photofunctional magnetic core-shell ($\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{TiO}_2$) particles. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2013, **13**(10), pp.7134–7137. <https://doi.org/10.1166/jnn.2013.7676>
45. WANG, H., YANG, D., XU, L. Magnetic photocatalyst $\text{Bi}_3\text{O}_4\text{Cl}/\text{MnxZn}1\text{-xFe}_2\text{O}_4$: Facile synthesis and its photocatalytic activity. *Arab. J. Chem.*, 2024, **17**(4), p.105699. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2024.105699>
46. LIU, Z., CHEN, F., GAO, Y., LIU, Y., FANG, P., WANG, S. A novel synthetic route for magnetically retrievable Bi_2WO_6 hierarchical microspheres with enhanced visible photocatalytic performance. *J. Mater. Chem. A*, 2013, **1**, pp. 7027.

47. KARUNAKARAN, C.; VINAYAGAMOORTHY, P.; JAYABHARATHI, J. Nonquenching of Charge Carriers by Fe₃O₄ Core in Fe₃O₄/ZnO *Nanosheet Photocatalyst*. *Langmuir* 2014, **30**, pp.15031–15039.
48. SUN, L., ZHOU, Q., MAO, J., OUYANG, X., YUAN, Z., SONG, X., GONG, W., MEI, S., XU, W. Study on Photocatalytic Degradation of AcidRed 73 by Fe₃O₄@TiO₂ Exposed (001) Facets. *Appl. Sci.* 2022, **12**, pp.3574. <https://doi.org/10.3390/app12073574>
49. RIBEIRO, T., JANZ, F.J.L., VIZIBELLI, D., et al. Magnetic natural coagulants for plastic recycling industry wastewater treatability. *Water*. 2023, **15**(1276), pp.1-15. <https://doi.org/10.3390/w15071276>
50. SIBIYA, N.P., AMO-DUODU, G., TETTEH, E.K., RATHILAL, S. Effect of magnetized coagulants on wastewater treatment: rice starch and chitosan ratios evaluation. *Polymers*. 2022, **14**(4342), pp. 1-13. <https://doi.org/10.3390/polym14204342>
51. MATEUS, G.A.P., DOS SANTOS, T.R.T., SANCHES, I.S. Evaluation of a magnetic coagulant based on Fe₃O₄ nanoparticles and Moringa oleifera extract on tartrazine removal: Coagulation-adsorption and kinetics studies. *Environ. Technol.* 2018, **41**, pp.1648–1663.
52. GIRALDO, L., ERTO, A., MORENO-PIRAJA, J.C. Magnetite nanoparticles for removal of heavy metals from aqueous solutions: synthesis and characterization. *Adsorption*, 2013, **19**, pp.465–474. <https://doi.org/10.1007/s10450-012-9468-1>
53. LASHEEN, M. R., EL-SHERIF, I. Y., SABRY, D. Y., EL-WAKEEL, S. T., EL-SHAHAT, M. F. Adsorption of heavy metals from aqueous solution by magnetite nanoparticles and magnetite-kaolinite nanocomposite: equilibrium, isotherm and kinetic study. *Desalin. Water Treat*, 2026, **57**(37), pp.17421–17429. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1085446>

Conflictos de Interés

Los autores declaran que no hay conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Carlos Antonio Leyva Isaac: conceptualización, metodología, investigación, escritura, edición y corrección.

Enry Guerra Vera: conceptualización, metodología, investigación, escritura.

Yereni Martínez Galán: cnceptualización, metodología, investigación, escritura.

Johan Felipe Aguirrezabal de la Rosa: conceptualización, metodología, investigación, escritura.