

# Development, production and characterization of FeO nanoparticles mediated by green synthesis

## Desarrollo, producción y caracterización de nanopartículas de FeO mediado por síntesis verde

D. Asmat-Campos, Dr. <sup>1\*</sup>, E. Murga-Torres, MSc.<sup>2</sup>, N.R. Checca, Dr.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Dirección de Investigación, Innovación & Responsabilidad Social. Universidad Privada del Norte (UPN), Trujillo, Perú,

[\\*david.asmat@upn.edu.pe](mailto:*david.asmat@upn.edu.pe)

<sup>2</sup> Departamento de Ciencias. Universidad Privada del Norte (UPN), Trujillo, Perú

<sup>3</sup> Brazilian Center for Physics Research, R. Dr. Xavier Sigaud 150, Rio de Janeiro 22290-180, Brazil;

[nomifsc@gmail.com](mailto:nomifsc@gmail.com)

**Resumen—** El manejo de la materia a nanoescala ha significado el desarrollo de diversidad de metodologías la que permitan obtener nanoestructuras con potenciales propiedades de alta aplicabilidad, pero a su vez acompañado de procesos contaminantes debido al uso de reactivos químicos inorgánicos. Esta investigación presenta un método sostenible de síntesis verde de nanopartículas de óxido de hierro (FeO NP) usando como reductor orgánico los compuestos metabólicos del extracto acuoso de *Eucalyptus globulus*, el mismo que ha sido ampliamente caracterizado. Los resultados sugieren la excelente propiedad reducida y estabilizante del extracto acuoso de *E. globulus*, esto es comprobado por la presencia del pico de resonancia de plasmón superficial (RPS) en 390 nm típico de la formación de FeO NP, asimismo, el resultado de caracterización estructural muestra la presencia de la fase magnetita, además poseer una morfología de tipo esférica con tamaño promedio 3 nm, el análisis elemental por espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS) también muestra la presencia de fierro, además de un potencial Z de 13.58 mV. El análisis de magnetización evidencia un comportamiento superparamagnético que está en función a la temperatura, con valores de 12.5 emu/g (5 K) y 8.2 emu/g (300 K).

**Palabras Clave:** Spiones, óxido de fierro, superparamagnetismo, síntesis verde, *Eucalyptus globulus*.

**Abstract—** The management of matter at the nanoscale has meant the development of a diversity of methodologies that allow obtaining nanostructures with potential properties of high applicability, but in turn accompanied by polluting processes due to the use of inorganic chemical reagents. This research presents a sustainable method for the green synthesis of iron oxide nanoparticles (FeO NP) using the metabolic compounds of the aqueous extract of *Eucalyptus globulus* as organic reducer, which has been widely characterized. The results suggest the excellent reducing and stabilizing property of the aqueous extract of *E. globulus*, this is confirmed by the presence of the surface plasmon resonance (SPR) peak at 390 nm, typical of the formation of FeO

NP, likewise, the characterization result structural shows the presence of the magnetite phase, in addition to having a spherical morphology with an average size of 3 nm, the elemental analysis by energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) also shows the presence of iron, in addition to a Z potential of 13.58 mV. The magnetization analysis shows a superparamagnetic behavior that is a function of temperature, with values of 12.5 emu/g (5 K) and 8.2 emu/g (300 K).

**Keywords:** Spiones, iron oxide, superparamagnetism, green synthesis, *Eucalyptus globulus*.

### I. INTRODUCCIÓN

La nanotecnología ha venido evolucionando de forma acelerada en las últimas décadas, pues el manejo de la materia a escala nanométrica ha permitido contar con potenciales propiedades y a su vez diversidad de aplicaciones [1]–[4]. Los coloides nanoparticulados son dispersiones con tamaños que están en un rango entre 10 y 100 nm [5], y existen de diferentes tipos, tales como las metálicas, no metálicas y hasta inclusive poliméricas [6]. Para su elaboración, se han adoptado diversidad de métodos, tanto físicos, como químicos, y dentro de ellos métodos como la coprecipitación [7], hidrotermal [8], sonoquímica [9], sin embargo, se tratan de métodos muy complejos, de alto costo, alto consumo energético y en especial altamente tóxicos, promoviendo grandes impactos negativos sobre el medio ambiente y la salud humana, debido al uso de reductores inorgánicos [10] y agentes estabilizantes [11]. En ese sentido, la metodología de síntesis verde de nanopartículas se presenta como un método novedoso, pero a su vez más económico y en especial de mínimo impacto ambiental y baja toxicidad [12], debido a que dentro del proceso de síntesis se utilizan únicamente precursores y el reductor orgánico, específicamente extractos con altos contenidos de compuestos fenólicos [13], los que a su vez actúan como agentes de protección y estabilización evitando procesos de agregación [14]. Diferentes autores han reportado procesos de síntesis verde utilizando té, gardenia y

Digital Object Identifier (DOI):  
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.52>  
ISBN: 978-628-95207-0-5 ISSN: 2414-6390

aloe vera [15]–[17], también se han usado plantas como algas [18] y hongos. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es de aportar en la mejora metodológica del proceso de síntesis verde de FeO NP usando como reductor el extracto en medio acuoso de *E. globulus*.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó como precursor el nitrato de hierro nonahidratado ( $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) (CAS: 7782-618, Merck, Alemania), las hojas de *E. globulus* fueron procedentes del departamento de Cajamarca, en Perú. Durante el desarrollo experimental se utilizó agua ultrapura (Thermo Scientific Barnstead Smart2Pure, MA, EE.UU.).

### A. Extracto acuoso *E. globulus*

Las hojas de *E. globulus* fueron lavados tres veces con agua ultrapura con el objetivo de eliminar cualquier tipo de impurezas. Posteriormente fueron secados en horno ( $70^\circ\text{C}$ ) durante 12 horas. El material orgánico fue llevado a molienda mecánica, obteniéndose una masa de 16 g. Para la extracción de los compuestos orgánicos reductores, se usó un equipo soxhlet, adaptado a un hotplate-stirring, para ello, la masa seca se diluyó en 160 mL de agua ultrapura, e inicialmente se mantuvo en agitación magnética a 700 RPM durante 10 minutos ( $T=23^\circ\text{C}$ ), para luego activar el hotplate y llevar la mezcla hasta  $100^\circ\text{C}$  durante 30 minutos, el sistema de condensación del equipo soxhlet evitó la reducción del contenido de agua. Finalmente, una vez enfriado el extracto acuoso, se llevó a un sistema de filtrado con bomba de vacío (GAST DOA-P704-AA). El extracto fue cubierto con papel aluminio y almacenado en refrigeración ( $3^\circ\text{C}$ ), para su posterior uso (Figura 1).



**Figura 1.** Sistema Soxhlet para la extracción de metabolitos

### B. Síntesis verde de FeO NP (SPIONES)

Se adoptó una metodología sostenible, de un solo paso, para ello, se preparó en un vaso de precipitación 50 mL de

( $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) a 0.1 M (precursor) el cual se mantuvo en agitación magnética 400 RPM durante 20 minutos ( $23^\circ\text{C}$ ). Paso seguido, se añadió gota a gota 50 mL de extracto acuoso de *E. globulus*, con las mismas condiciones de agitación y temperatura durante 30 minutos, en donde se empezó a notar la presencia de suspensión de color oscuro, lo cual era un indicador de la presencia de nanopartículas. Finalmente, se inició el proceso de evaporación hasta que el líquido haya sido consumido en su totalidad, quedando únicamente nanopartículas sólidas.

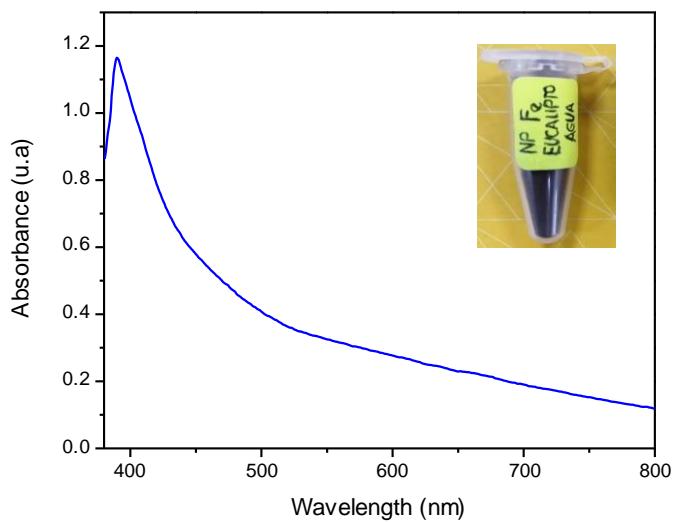
### C. Caracterización FeO NP

El material nanoparticulado de FeO fue ampliamente caracterizado. El espectro de absorbancia fue la caracterización inicial, con el objetivo de poder determinar la presencia del pico de RPS, para ello se usó un espectrofotómetro UV vis (Hewlett Packard, 8452, CA, USA) en el rango de 350-800 nm. La determinación del posible mecanismo de reducción implicado en el proceso de formación de nanoestructura fue evaluada por el espectrofotómetro infrarrojo (FT-IR) (Nicolet iS50 FT-IR, Thermo Fisher Scientific). La caracterización de las características cristalinas se realizó por difracción de rayos X (DRX) (Empyrean Panalytical) usando radiación Cu-K $\alpha$  ( $\lambda = 1.540 \text{ \AA}$ ) a 45 kV y 40 mA, la recolección de datos fue en el rango  $20 = 20^\circ - 80^\circ$  en la geometría de Bragg Brentano, en modo de giro, con un tamaño de paso de  $0.026^\circ$ . Asimismo, para reforzar la presencia del material en estudio, se realizó análisis elemental por espectroscopía de rayos X de dispersión de energía (EDS) (JEOL 2100F) con un voltaje de aceleración 200 kV y 130  $\mu\text{A}$ . La morfología fue caracterizada por microscopía electrónica de transmisión en modo alta resolución (STEM). Para determinar la estabilidad coloidal, se realizó análisis por Potencial Zeta (Zeta Plus, Analyzer, Brookhaven Instrument Corporation). Finalmente, las FeO NP fueron caracterizados para determinar sus propiedades magnéticas, para ello se utilizó un sistema de medición de propiedades físicas (PPMS) (DynaCool, QuantumDesign) del CBPF; la magnetización en función a la temperatura se realizó en condiciones de enfriamiento de campo cero (ZFC) y de campos enfriado (FC) con campo de sonda 200 Oe; además, los bucles de histéresis fueron evaluados en 5 K y 300 K, y con campo de hasta 9 T.

## III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los procesos de síntesis de nanopartículas involucran una serie de procesos, específicamente vinculados a la interacción a nivel de átomos con mecanismos de reducción del ión metálico, para ello es importante el comportamiento del agente reductor, lo que conllevaría a desarrollar un proceso de reducción, estabilización y formación completa [19].

Asimismo, las propiedades de la materia a nanos escala tienden a cambiar totalmente [20], en este caso, las FeO NP poseen propiedades magnéticas diferentes que el material a escala macroscópica. Una de las principales características de las nanopartículas metálicas son las oscilaciones de los electrones, específicamente llamado Resonancia de Plasmón de Superficie (RPS), como resultado ante la interacción con una determinada frecuencia, específicamente una radiación electromagnética. El nanomaterial en estudio posee un rango en donde se da la RPS, el cual coincide con el obtenido en esta investigación, la Figura 2 muestra el espectro de absorbancia ubicado en 391.2 nm, el mismo que coincide con otros trabajos vinculados al mismo tipo de nanomaterial [5], [21].

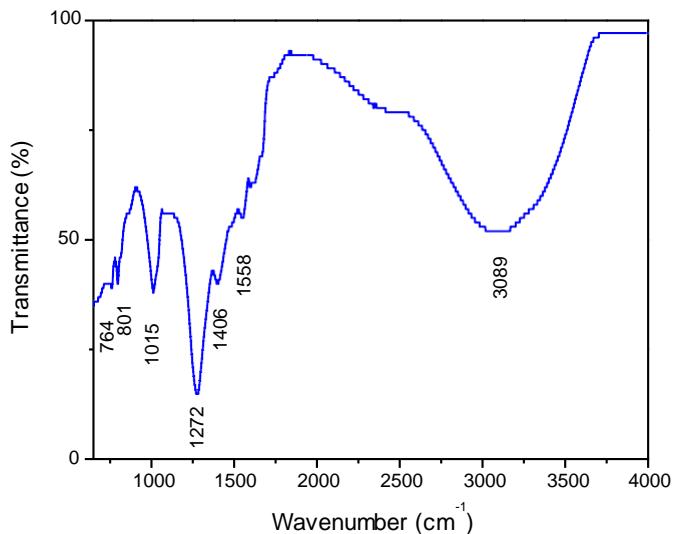


**Figura 2.** Espectrofotometría UV vis de las FeO NP obtenidas por ruta verde (*E. globulus*).

La metodología de síntesis verde implica el uso de extractos orgánicos con contenidos de grupos funcionales que actúen como reductor de sales metálicas, y que conlleven a la formación de nanopartículas con diferentes tipos de morfología. Asimismo, diversos autores han reportado también la influencia del tipo de solvente o metodología usada para la extracción de los compuestos metabólicos [22], [23]. Ante ello, es importante aportar información nueva sobre los mecanismos implicados, y en especial los grupos funcionales presentes en la formación del material nanoparticulado. En el caso de este trabajo de investigación, se aporta información nueva basado en la metodología sostenible y de bajo costo, tal y como es el extracto de *E. globulus* en solvente acuoso. Para tal fin, en la Figura 3 se muestra el resultado de la caracterización por FT-IR de las FeO NP, en donde se pueden mostrar bandas fuertes en 764, 801, 1015, 1272, 1406, 1558, 3089 cm<sup>-1</sup>. De todos ellos, los picos ubicados en el rango 764-1015 cm<sup>-1</sup> corresponden a la vibración de estiramiento del FeO [24], la banda en 1406 cm<sup>-1</sup> está vinculado al estiramiento OH, en modo flexión de hidroxilo y grupo

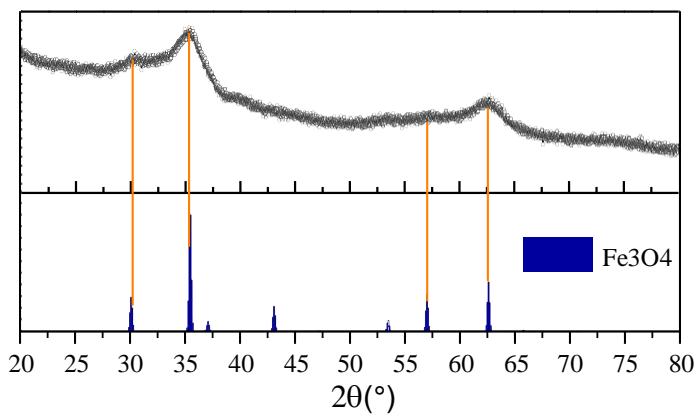
funcional alcohol [25], las bandas de 1558 y 3089 cm<sup>-1</sup> están asignados a la vibración de estiramiento OH [26].

Los sólidos en estado cristalino poseen la particularidad de que gracias a su estructura pueden dispersar elásticamente haces de rayos X emitidos por un difractómetro de rayos X (DRX), los que a su vez los amplifican por una interferencia de tipo constructiva, generando el llamado patrón de difracción. La Figura 4 determina la naturaleza cristalina de los SPIONS. No se encontró fase adicional en las nanopartículas. Se muestra el resultado del espectro evaluado a las FeO NP, con picos ubicados en  $2\theta = 30^\circ$ ,  $36^\circ$ ,  $57^\circ$  y  $62.7^\circ$ , los cuales se indexan a los planos (220), (311), (511) y (440) respectivamente, con estructura de tipo cúbica centrada en las caras (Fd-3m, No. 227) y correspondiente a la fase



**Figura 3.** Espectro FT-IR de las FeO NP sintetizados usando extracto en solvente acuoso de *E. globulus*.

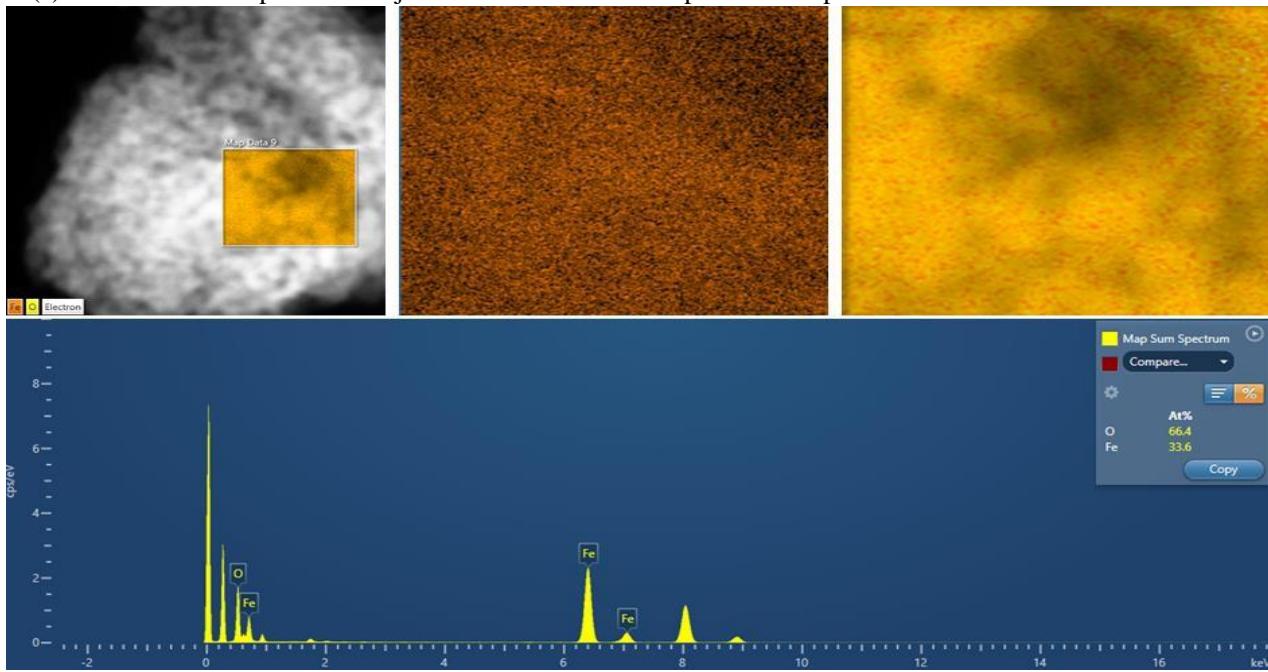
magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). El patrón de referencia corresponde a la carta 00-002-1035, del software X’Pert HighScore de la Malvern Panalytical. [27], [28].



**Figura 4.** Espectro de difracción de las FeO NP sintetizados por ruta verde.

Tal y como se había descrito, la importancia de los mecanismos de reducción de los agentes precursores radican en que la reacción química debe de ser en lo posible completa, y que en el coloide nanoestructurado esté presente el (los) elemento (s) a la cual corresponde el objetivo inicial del

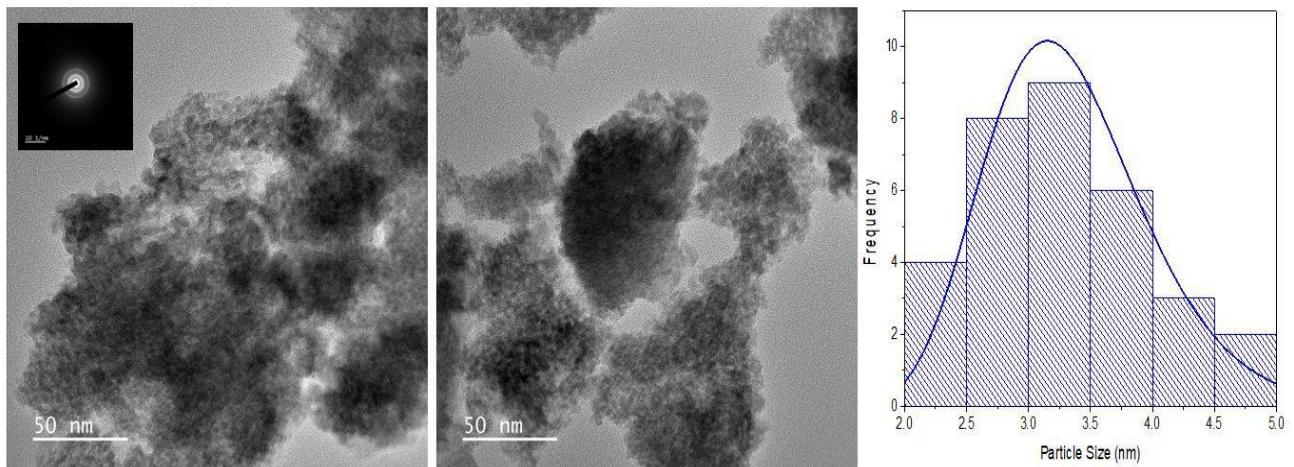
proceso; para ello, esta investigación presenta en la Figura 5, el resultado de análisis elemental por EDS, en donde se puede visualizar la presencia de los elementos fierro (Fe) y oxígeno (O), con valores de 66.4% y 33.6% respectivamente, sin ningún otro tipo de elemento, lo cual justifica que la metodología adoptada y vinculado al uso del extracto en medio acuoso de *E. globulus*, tiene un excelente comportamiento para el desarrollo de FeO NP.



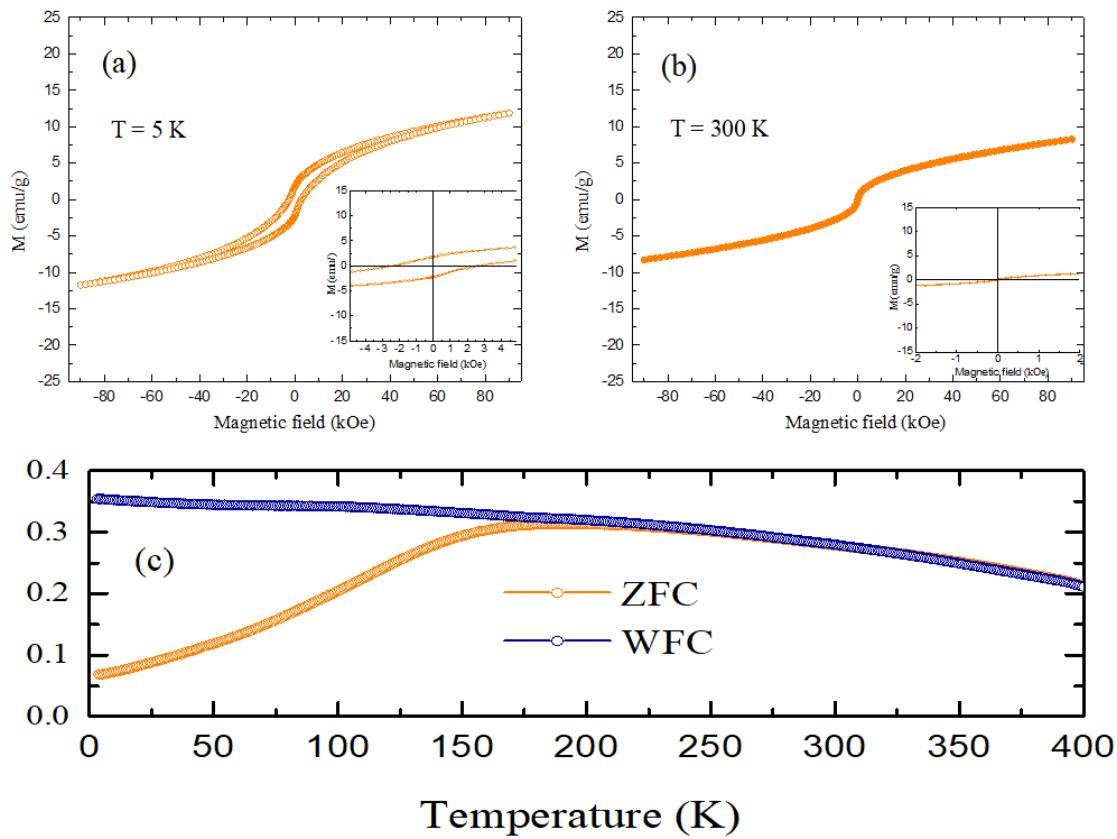
**Figura 5.** Espectro EDS de las FeO NP sintetizado usando extracto acuoso de *E. globulus*.

El proceso de nucleación y estabilización en la síntesis de nanopartículas metálicas definen la optimización de la metodología, esto debido a que se pueden llegar a manejar morfologías, tamaños y hasta inclusive la estabilidad coloidal. Un proceso incompleto trae consigo que la reacción continúe en el tiempo, o en todo caso se generen procesos de acumulación o formación de ‘clusters’ (que es lo que no se espera de una síntesis). En ese sentido, la síntesis mediada por reactivos inorgánicos es muy eficiente, siendo por el contrario la metodología de síntesis verde un reto, debido a que se generan reacciones incompletas, presencia de trazas orgánicas y por ende

reacciones posteriores indeseables. La Figura 6 muestra la caracterización por STEM de las FeO NP sintetizados por ruta verde, en donde se evidencia la formación de nanopartículas con morfología esférica uniforme, totalmente limpio, sin presencia de zonas densas que pudiesen indicar la presencia de materia orgánica del extracto, esto también se corrobora con los resultados por EDS en donde no muestra presencia de traza. El histograma presenta los diferentes tamaños de nanomaterial encontrado, siendo el de mayor prevalencia las NP de 3.0 nm, con configuración de tipo monodispersa.



**Figura 6.** Imágenes STEM de las FeO NP sintetizados por ruta verde, e histograma de tamaños.



**Figura 7.** (a)-(b) Mediciones de magnetización de saturación versus histéresis de campo aplicado para FeO NP a 5 K y 300 K. (c) Curva de magnetización en función de la temperatura a campos bajos, bajo los protocolos ZFC y WFC.

La Figura 7 (a), (b) muestran los resultados correspondientes a las curvas de magnetización de las FeONP evaluados a diferentes temperaturas (5 K y 300 K), en ambos casos exhiben comportamientos vinculados a materiales superparamagnéticos (SPIONS). Los valores máximos de magnetización están en función a la temperatura, es así como, para temperaturas muy bajas tiene un valor de 12.5 emu/g y además muestra coercitividad y remanencia, sin embargo, al

incrementarse la temperatura, tiende a disminuir a 8.2 emu/g y muestra coercitividad y remanencia nula, la reducción está vinculado a generalmente al desorden cristalino, es decir se da la inclinación del espín como resultado de la reducción en la coordinación con los cationes superficiales. El comportamiento coercitivo y remanente nulo sugieren que las NP alcanzan el estado de saturación con una única contribución gobernada por la naturaleza superparamagnética

[27]. En el caso (b), muestra con comportamiento perfecto de Langevin, en donde sugiere la capacidad de ser blanco de un campo externo, sin mantener ningún tipo de magnetismo residual cuando se elimina el campo externo; esta característica presenta a las FeO NP obtenidas en este experimento, como una potencial alternativa para aplicaciones en imágenes por resonancia magnética, entre otros. La Figura 7(c), muestra la diferente

respuesta del campo magnético frente a la temperatura en un proceso continuo. Al inicio, al estar las FeO NP enfriadas muestran hay un incremento (0.32 ume/g) de la medida zero field cool (ZFC), y una proyección en decaimiento del WFC, sin presentar inestabilidad térmica.

Adicional a las caracterizaciones anteriores, se evaluó las nanopartículas en estudio desde la perspectiva de su estabilidad, un factor importante para determinar el éxito de la síntesis; es así como se realizó análisis de potencial Zeta a partir de su movilidad electroforética. Con este análisis, se puede determinar el comportamiento de las cargas superficiales, debido a que está estrechamente vinculado a la estabilidad de los coloides [29]. Los promedios calculados a partir de 10 datos obtenidos muestran un valor de  $13.58 \pm 2.92$  mV y  $1.06 \pm 0.056$   $\mu\text{S/V/cm}$  de movilidad electroforética, lo cual indicarían una estabilidad promedio.

#### IV. CONCLUSIONES

La metodología de síntesis verde se presenta como una potencial alternativa para su aplicación en el desarrollo de diversidad de nanomateriales, pues el buen manejo de los parámetros de síntesis motiva a que los resultados sean óptimos. En el caso de esta investigación, se ha logrado sintetizar FeO NP usando como reductore extracto en medio acuoso de *E. globulus*, con características de estabilidad coloidal promedio, morfología definida de tipo esférica y 3 nm de diámetro, además de un comportamiento superparamagnético el cuállo presenta como un nanomaterial con diversidad de aplicaciones, asimismo, los resultados por DRX y EDS refuerzan la evidencian de la presencia estructural y elemental del nanomaterial.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al LABNANO/CBPF por el apoyo técnico durante el trabajo de caracterización por microscopía electrónica. Asimismo, agradecen a la Dirección de Investigación, Innovación & Responsabilidad Social de la Universidad Privada del Norte por su constante apoyo y gestión.

#### REFERENCIAS

- [1] A. El-Ansary and L. M. Faddah, "Nanoparticles as biochemical sensors," *Nanotechnol. Sci. Appl.*, vol. 3, no. 1, pp. 65–76, Sep. 2010, doi: 10.2147/NSA.S8199.
- [2] D. Astruc, "Introduction: Nanoparticles in Catalysis," *Chem. Rev.*, vol. 120, no. 2, pp. 461–463, Jan. 2020, doi: 10.1021/ACS.CHEMREV.8B00696.
- [3] A. Y. Ghidan, T. M. Al Antary, and M. nanoparticles Ag, "Applications of Nanotechnology in Agriculture," *Appl. Nanobiotechnology*, Sep. 2019, doi: 10.5772/INTECHOPEN.88390.
- [4] S. K. Murthy, "Nanoparticles in modern medicine: State of the art and future challenges," *Int. J. Nanomedicine*, vol. 2, no. 2, p. 129, 2007, Accessed: Feb. 03, 2022. [Online]. Available: /pmc/articles/PMC2673971/.
- [5] A. Chatterjee *et al.*, "Green synthesis of iron oxide nanoparticles and their ameliorative effect on arsenic stress relief in *Oryza sativa* seedlings," *Biocatal. Agric. Biotechnol.*, vol. 38, p. 102207, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.BCAB.2021.102207.
- [6] A. Dasgupta *et al.*, "Green conversion of graphene oxide to graphene nanosheets and its biosafety study," *PLoS One*, vol. 12, no. 2, p. e0171607, Feb. 2017, doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0171607.
- [7] D. Patiño-Ruiz, L. Sanchez-Botero, J. Hinestroza, and A. Herrera, "Modification of Cotton Fibers with Magnetite and Magnetic Core-Shell Mesoporous Silica Nanoparticles," *Phys. status solidi*, vol. 215, no. 19, p. 1800266, Oct. 2018, doi: 10.1002/PSSA.201800266.
- [8] A. Lassoued, M. S. Lassoued, B. Dkhil, S. Ammar, and A. Gadri, "Synthesis, photoluminescence and Magnetic properties of iron oxide ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) nanoparticles through precipitation or hydrothermal methods," *Phys. E Low-dimensional Syst. Nanostructures*, vol. 101, pp. 212–219, Jul. 2018, doi: 10.1016/J.PHYSSE.2018.04.009.
- [9] A. Hassanjani-Roshan, M. R. Vaezi, A. Shokuhfar, and Z. Rajabali, "Synthesis of iron oxide nanoparticles via sonochemical method and their characterization," *Particuology*, vol. 9, no. 1, pp. 95–99, Feb. 2011, doi: 10.1016/J.PARTIC.2010.05.013.
- [10] S. Vasantharaj, S. Sathiyavimal, P. Senthilkumar, F. Lewis Oscar, and A. Pugazhendhi, "Biosynthesis of iron oxide nanoparticles using leaf extract of *Ruellia tuberosa*: Antimicrobial properties and their applications in photocatalytic degradation," *J. Photochem. Photobiol. B Biol.*, vol. 192, pp. 74–82, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.JPHOTOBIOL.2018.12.025.
- [11] Y. Wu, S. Zeng, F. Wang, M. Megharaj, R. Naidu, and Z. Chen, "Heterogeneous Fenton-like oxidation of malachite green by iron-based nanoparticles synthesized by tea extract as a catalyst," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 154, pp. 161–167, Nov. 2015, doi: 10.1016/J.SEPPUR.2015.09.022.
- [12] M. Yadi *et al.*, "Current developments in green synthesis of metallic nanoparticles using plant extracts: a review," <https://doi.org/10.1080/21691401.2018.1492931>, vol. 46, no. sup3, pp. S336–S343, Nov. 2018, doi: 10.1080/21691401.2018.1492931.
- [13] J. Sarkar, N. Chakraborty, A. Chatterjee, A. Bhattacharjee, D. Dasgupta, and K. Acharya, "Green Synthesized Copper Oxide Nanoparticles Ameliorate Defence and Antioxidant Enzymes in *Lens culinaris*," *Nanomater.* 2020, Vol. 10, Page 312, vol. 10, no. 2, p. 312, Feb. 2020, doi: 10.3390/NANO10020312.
- [14] T. Shahwan *et al.*, "Green synthesis of iron nanoparticles and their application as a Fenton-like catalyst for the degradation of aqueous cationic and anionic dyes," *Chem. Eng. J.*, vol. 172, no. 1, pp. 258–266, Aug. 2011, doi: 10.1016/J.CEJ.2011.05.103.
- [15] B. Ahmmad *et al.*, "Green synthesis of mesoporous hematite ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) nanoparticles and their photocatalytic activity," *Adv. Powder Technol.*, vol. 24, no. 1, pp. 160–167, Jan. 2013, doi: 10.1016/J.APT.2012.04.005.
- [16] V. C. Karade *et al.*, "A green approach for the synthesis of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles from *Gardenia resinifera* plant and it's In vitro hyperthermia application," *Helijon*, vol. 5, no. 7, p. e02044, Jul. 2019, doi: 10.1016/J.HELION.2019.E02044.

- [17] D. Mukherjee, S. Ghosh, S. Majumdar, and K. Annapurna, "Green synthesis of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles for arsenic(V) remediation with a novel aspect for sludge management," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 4, no. 1, pp. 639–650, Mar. 2016, doi: 10.1016/J.JECE.2015.12.010.
- [18] S. Saif, A. Tahir, and Y. Chen, "Green Synthesis of Iron Nanoparticles and Their Environmental Applications and Implications," *Nanomater.* 2016, Vol. 6, Page 209, vol. 6, no. 11, p. 209, Nov. 2016, doi: 10.3390/NANO6110209.
- [19] A. V. Nomoev, V. V. Syzrantsev, N. V. Yumozhapova, E. C. Khartaeva, N. A. Torkhov, and K. V. Zobov, "Composite nanoparticles: applications, creation mechanism, properties," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 704, no. 1, p. 012018, Nov. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/704/1/012018.
- [20] L.-L. Zhou, Y.-J. Li, and L.-S. Yu, "Mechanism behind Unique Properties of Local Heating in Nanoscale Junctions\*," *Commun. Theor. Phys.*, vol. 63, no. 3, p. 379, Mar. 2015, doi: 10.1088/0253-6102/63/3/379.
- [21] P. Karpagavinayagam and C. Vedhi, "Green synthesis of iron oxide nanoparticles using *Avicennia marina* flower extract," *Vacuum*, vol. 160, pp. 286–292, Feb. 2019, doi: 10.1016/J.VACUUM.2018.11.043.
- [22] D. Asmat-Campos, J. Bautista-Guzman, and R. Gomez-Morales, "Biosynthesis of FeO nanoparticles through the reducing action of *Mangifera indica* peel extract and its application in the removal of heavy metal," in *19 th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*, Jul. 2021, pp. 1–8, doi: 10.18687/LACCEI2021.1.1.22.
- [23] Asmat-Campos, K. Andrade-Zavaleta, Y. Chacon-Laiza, Henriquez-Alegria, and Iparraguirre-Paredes, "Ecological synthesis of FeO nanoparticles and their application in the removal of heavy metals present in agricultural ground ,," in *19 th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*, Jul. 2021, pp. 1–7, doi: 10.18687/LACCEI2021.1.1.19.
- [24] R. Periakaruppan *et al.*, "Utilization of tea resources with the production of superparamagnetic biogenic iron oxide nanoparticles and an assessment of their antioxidant activities," *J. Clean. Prod.*, vol. 278, p. 123962, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.123962.
- [25] V. Ramalingam, P. Dhinesh, S. Sundaramahalingam, and R. Rajaram, "Green fabrication of iron oxide nanoparticles using grey mangrove *Avicennia marina* for antibiofilm activity and in vitro toxicity," *Surfaces and Interfaces*, vol. 15, pp. 70–77, Jun. 2019, doi: 10.1016/J.SURFIN.2019.01.008.
- [26] A. Rajendran, M. Alsawalha, and T. Alomayri, "Biogenic synthesis of husked rice-shaped iron oxide nanoparticles using coconut pulp (*Cocos nucifera* L.) extract for photocatalytic degradation of Rhodamine B dye and their in vitro antibacterial and anticancer activity," *J. Saudi Chem. Soc.*, vol. 25, no. 9, p. 101307, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.JSCS.2021.101307.
- [27] D. Patiño-Ruiz, L. Sánchez-Botero, L. Tejeda-Benitez, J. Hinestroza, and A. Herrera, "Green synthesis of iron oxide nanoparticles using *Cymbopogon citratus* extract and sodium carbonate salt: Nanotoxicological considerations for potential environmental applications," *Environ. Nanotechnology, Monit. Manag.*, vol. 14, p. 100377, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.ENMM.2020.100377.
- [28] M. Khatami *et al.*, "Super-paramagnetic iron oxide nanoparticles (SPIONs): Greener synthesis using Stevia plant and evaluation of its antioxidant properties," *J. Clean. Prod.*, vol. 208, pp. 1171–1177, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.10.182.
- [29] D. Asmat-Campos *et al.*, "Unraveling the Active Biomolecules Responsible for the Sustainable Synthesis of Nanoscale Silver Particles through Nuclear Magnetic Resonance Metabolomics," *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 8, no. 48, pp. 17816–17827, Dec. 2020, doi: 10.1021/ACSSUSCHEMENG.0C06903/SUPPL\_FILE/SC0C06903\_SI\_001.PDF.