



**UNIVERSIDAD CATÓLICA**  
de Colombia

**Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde.**

**Elaborado por:**

**Sara Daniela Vera Nuñez  
Juan Diego Jiménez Rojas**

**Universidad Católica de Colombia  
Facultad de Ingeniería  
Programa de Ingeniería Civil  
Bogotá D.C, Colombia  
2020**

**Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde.**

**Elaborado por:**

**Sara Daniela Vera Nuñez 506516  
Juan Diego Jiménez Rojas 506480**

**Trabajo de grado**

**Director:**

**Ing. Edgar Ricardo Monroy Vargas**

**Universidad Católica de Colombia  
Facultad de Ingeniería  
Programa de Ingeniería Civil  
Bogotá D.C, Colombia  
2020**



## Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:

**Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)**

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

### Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

### Bajo las condiciones siguientes:



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**No Comercial** — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bogotá D.C. 2020.

## **Agradecimientos**

En primer lugar, queremos agradecer a Dios por permitirnos llevar acabo nuestro proyecto de grado para poder optar por nuestro título de ingenieros civiles. De igual manera agradecemos a nuestros padres por ser ese apoyo incondicional y por darnos la oportunidad de estudiar y capacitarnos para la vida. También queremos agradecer en gran medida al profesor e Ingeniero Wilfredo Marimon Bolívar quien nos orientó durante el desarrollo de este trabajo. Por último, agradecer a nuestro director el Ingeniero Edgar Ricardo Monroy Vargas por acompañarnos durante el proceso y ejecución del trabajo.

## Tabla de Contenidos

1. Resumen .....	12
2. Introducción .....	13
3. Problema de investigación.....	15
3.1. Pregunta problema .....	18
4. Antecedentes.....	19
4.1. Recubrimiento elaborado a partir de nanopartículas de TiO <sub>2</sub> con propiedades auto limpiables en vidrio .....	19
4.2. Optimización de un sistema de filtración con nanomateriales para la mejora de los índices de calidad del agua. ....	20
5. Justificación .....	21
6. marco teorico .....	24
7. Estado del arte.....	39
7.1. A review on green synthesis of magnetic nanoparticles (magnetite) for environmental applications.....	39
8. Objetivos.....	42
8.1. Objetivo general .....	42
8.2. Objetivos específicos.....	42
9. Alcances y limitaciones.....	43
9.1. Alcances .....	43
9.2. Limitaciones.....	43
10. Metodología.....	44

10.1. Obtención de extracto de té coca.....	44
10.2. Síntesis de nanomaterial .....	45
10.3. Compuestos activos en la síntesis de nanopartículas magnéticas.....	46
10.4. Condiciones de operación teórica para la optimización de las propiedades magnéticas de nanopartículas.....	46
10.5. Diseño del Reactor Batch .....	47
11. Resultados y análisis .....	48
11.1. The Synthesis of Gold Nanoparticles Using <i>Amaranthus spinosus</i> Leaf Extract and Study of Their Optical Properties.....	50
11.2. Magnetic iron oxide ( $Fe_3O_4$ ) nanoparticles from tea waste for arsenic removal .....	53
11.3. Potential of green synthesized zero-valent iron nanoparticles for remediation of lead-contaminated water .....	53
11.4. Biosynthesis of Iron and Silver Nanoparticles at Room Temperature Using Aqueous Sorghum Bran Extracts .....	58
11.5. Green Synthesis and Characterization of Zero Valent Iron Nanoparticles from the Leaf Extract of <i>Azadirachta indica</i> ( <i>Neem</i> ).....	58
11.6. Synthesis of iron-based nanoparticles using <i>oolong</i> tea extract for the degradation of malachite green. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy .....	61
11.7. Optimization of microwave-solvothermal synthesis of $Fe_3O_4$ nanoparticles. Coating, modification, and characterization.....	63

11.8. Greener synthesis of magnetite nanoparticles using green tea extract and their magnetic properties .....	70
11.9. Green synthesis and surface properties of Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> with SA core–shell Nanocomposites.....	78
11.10. Optimización teórica de las propiedades magnéticas de las nanopartículas	84
11.11. Diseño y construcción del Reactor Batch .....	89
11.11.1. Cálculo para el diseño del reactor.....	89
11.11.2. Cálculo del volumen del cilindro del reactor.....	89
11.11.3. Cálculo del volumen del reactor.....	91
11.11.4. Cálculo del área de transferencia de calor del serpentín de calentamiento .....	92
11.11.5. Cálculo del flujo calórico .....	93
11.11.6. Cálculos para el Sistema de agitación .....	94
11.11.7. Cálculo de la longitud del eje de agitación.....	94
11.11.8. Cálculo de la altura del eje de agitación .....	94
11.11.9. Cálculo de las dimensiones de las paletas .....	94
11.11.10. Cálculo de la densidad y viscosidad de la mezcla.....	95
11.11.11. Cálculo del número de Reynolds.....	95
11.11.12. Cálculo de la potencia para accionar el eje .....	96
12. Conclusiones: .....	97
13. Referencias.....	99
14. Anexos.....	105

14.1. Tablas de coeficientes de transferencia de calor general.....	105
14.2. Especificaciones técnicas y número de potencia de agitadores mecánicos. 105	
14.3. Viscosidad dinámica del agua líquida a varias temperaturas. ....	106
14.4. Densidad del agua líquida a varias temperaturas.....	107

### Lista de figuras

Figura 1 Rutas de ingreso de contaminantes emergentes al ambiente y al agua potable .....	25
Figura 2 Intercambio Iónico .....	27
Figura 3 Procesos de Coagulación y Floculación .....	29
Figura 4 Nanotecnología.....	30
Figura 5 Dependencia del tamaño en la técnica de filtración.....	32
Figura 6 Estructura de espinela inversa de $Fe_3O_4$ .....	34
Figura 7 Técnicas de síntesis de nanomateriales basados en carbono.....	36
Figura 8 Esquema de la metodología adoptada .....	44
Figura 9 Proceso para la obtención de extracto de té de coca para la síntesis de nanopartículas magenticas. ....	45
Figura 10 Preparación del extracto de té de coca.....	48
Figura 11 Filtrado al vacío del extracto .....	49
Figura 12 Espectros de absorción de AuNP sintetizados mediante el tratamiento de 1 mM de solución de $HAuCl_4 \cdot 4H_2O$ . spinosus a 25°C bajo agitación magnética .....	51
Figura 13 Espectros FT-IR de (A) A. spinosus extracto de hoja; y (B) AuNP sintetizados a partir de A. spinosus extracto de hoja etanólica.....	52

Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de  
hierro obtenidas por síntesis verde

---

Figura 14 Síntesis de GZVINPs con extracto de hoja de <i>E. officinalis</i> .....	54
Figura 15 Espectro UV-Vis del extracto de hoja de <i>E. officinalis</i> , solución de $FeCl_3$ y GZVINP .....	55
Figura 16 Imagen SEM de los GZVINP sintetizados con <i>E. officinalis</i> .....	56
Figura 17 Imagen TEM de los GZVINP sintetizados con <i>E. officinalis</i> .....	57
Figura 18 Tubo A- Cloruro férrico, Tubo B- Extracto de hojas de plantas de Neem, Tubo C- Solución sintetizada de nanopartículas .....	59
Figura 19 Espectro UV-Vis de nanopartículas de hierro .....	60
Figura 20 Imagen SEM de nanopartículas de hierro .....	60
Figura 21 XRD pattern .....	66
Figura 22 C) Micrografías SEM a 2700x, D) Micrografías SEM a 10000x para $Fe_3O_4$ - TMSPT-ATM .....	68
Figura 23 B).temperatura de reaccion vs $T_h$ : superficie de respuesta. C) grafico de contorno. D).Cantidad de acetato de amonio vs $t_h$ : superficie de respuesta. E) grafico de de contorno. F).Cantidad de acetato de amonio Vs temperatura de reaccion. G) grafico de contorno .....	69
Figura 24 Absorbancia en función de la longitud de onda .....	71
Figura 25 Absorbancia en función de la longitud de onda .....	72

Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

---

Figura 26 Patrones de difracción de rayos X de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) para muestras G1, G2 y G3 sintetizadas con diferentes temperaturas de reacción a 180, 200 C y 220 C por 2 hrs. ....	73
Figura 27 Espectros FT-IR para (a) extracto de té verde y (b) sintetizado verde para la muestra G2, el recuadro muestra el estiramiento del enlace Fe-O.....	74
Figura 28 Micrografías FE-SEM de $\text{Fe}_3\text{O}_4$ nanopartículas para (a) muestra G2 (b) micrografía ampliada de la muestra G2. ....	75
Figura 29 Muestra la temperatura ambiente (300 K) y baja temperatura (60 K) M Vs H bucles de histéresis para la muestra G1, G2 y G3.....	77
Figura 30 Magnetización a temperatura ambiente de $\text{Fe}_3\text{O}_4$ MNP con relación molar de $\text{Fe}^{3+}/\text{I-Cys}$ a 1:1.80, 1:2.00, 1:2.14, 1:2.25 (a) y a una temperatura de reacción de 60° C, 70 ° C, 90 ° C. ....	79
Figura 31 Imágenes SEM y TEM de $\text{Fe}_3\text{O}_4$ (a y c) y $\text{Fe}_3\text{O}_4 @ \text{SA}$ MNCs (byd); histogramas que muestran la distribución del diámetro de $\text{Fe}_3\text{O}_4$ (e) y $\text{Fe}_3\text{O}_4$ con SA (f) con un diámetro de modo de $38 \pm 5$ y $49 \pm 5$ nm.....	81
Figura 32 Curva de magnetización (a) y ajuste de Langevin (b) para las MNC $\text{Fe}_3\text{O}_4$ con SA, recuadro 1 presenta la curva amplificada de campo magnético bajo de las MNC, las partículas en etanol son atraídas hacia los imanes dentro de 30 segundos, el recuadro se muestra en el recuadro 2.....	82

Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de  
hierro obtenidas por síntesis verde

---

Figura 33 Representación gráfica del diámetro en función del tiempo, con variaciones del pH. ....	85
Figura 34 Esquema del cilindro.....	90
Figura 35 Parámetros mezcladores mecánicos.....	94
Figura 36 Dimensiones del cilindro expresadas en cm.....	95

Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de  
hierro obtenidas por síntesis verde

---

**Lista de tablas**

Tabla 1	Características generales de la magnetita natural .....	34
Tabla 2	Características y resultados de extractos de plantas utilizados en proceso de síntesis verde .....	62
Tabla 3	Matriz de diseño experimental para el diseño factorial de Plackett-Burman .....	64
Tabla 4	Niveles de los factores de control para el diseño de Box-Behnken .....	64
Tabla 5	Matriz de diseño experimental para el diseño Box-Behnken .....	65
Tabla 6	Datos comparativos de magnetización para la muestra G1, G2 y G3. ....	77
Tabla 7	Influencia de $n(\text{Fe}^{3+}) / n(\text{l-Cys})$ en el rendimiento de los productos.....	79
Tabla 8	Influencia de la temperatura de reacción en las propiedades de las nanopartículas de $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .....	80
Tabla 9	Análisis comparativo entre temperatura, tiempo de reacción y tamaño de partícula .....	83
Tabla 10	Datos experimentales para el cálculo de la energía libre .....	86
Tabla 11	Datos utilizados para el desarrollo de la ecuación de energía libre .....	87
Tabla 12	Resultados obtenidos para la ecuación de energía libre.....	87

## 1. RESUMEN

En este trabajo de investigación se implementó un método ecológico de síntesis verde el cual se basa en la utilización de extractos de plantas como agentes reductores sustituyendo agentes químicos que son comúnmente utilizados en estos procesos y que pueden ser contaminantes. Este método está orientado a la optimización de las propiedades magnéticas de nanopartículas realizando una comparación entre tiempos de reacción, concentraciones y temperatura.

De igual manera se analizó cual es la influencia que tiene el diámetro de la nanopartícula en las propiedades magnéticas teniendo un referente teórico respecto a la fuerza de magnetización y energía libre, donde se estudiaron las ecuaciones de estos dos parámetros realizando una variación de los diámetros y analizando su comportamiento.

Con la realización de esta investigación se pudo establecer que para llevar a cabo un buen proceso de síntesis verde optimizando la magnetización de las nanopartículas obtenidas, se debe emplear una temperatura de reacción de 90°C y con un tiempo de reacción de 120 minutos debido a que con estos dos parámetros se obtuvo el mayor diámetro de partícula y saturación de magnetización, que corresponden a 53 nm y 66.66 emu/g respectivamente. Así mismo se evidencio que existe una relación directamente proporcional entre el diámetro de la partícula con respecto a la energía libre y la fuerza de magnetización, ya que, al aumentar este diámetro, aumentan estos valores.

Por último, se llevó a cabo el diseño de un reactor Batch para el proceso de síntesis verde de nanopartículas magnéticas donde la finalidad de dicho reactor es la obtención de un total de 200 gr de partículas, teniendo como resultado un volumen total del reactor de 4.76 gal.

## 2. INTRODUCCIÓN

El acceso a agua potable y un adecuado saneamiento básico está estipulado como uno de los derechos humanos fundamentales, debido a que estos resultan ser indispensables para la salud y la integridad de las personas, sin embargo los índices de contaminación de los recursos hídricos conlleva a que aproximadamente tres de cada diez personas no tengan accesos a agua potable segura<sup>1</sup>.

Una de las principales fuentes de contaminación de los cuerpos de agua son las actividades industriales, mineras y metalúrgicas, las cuales generan aguas residuales con altos índices de acumulación de metales pesados, los cuales tienden a comprometer la salud tanto de personas y animales como de diferentes ecosistemas, por esta razón se han venido implementando métodos de separación económicos y efectivos para la remoción de estos metales<sup>2</sup>.

En este sentido durante los últimos años se ha implementado ampliamente el uso de nanopartículas en aplicaciones ambientales orientadas a la mitigación y eliminación de contaminantes de diferentes cuerpos de agua, específicamente metales pesados y colorantes debido a su fácil aplicabilidad y a un mayor contacto superficial por su relación (superficie/volumen). Entre las nanopartículas que más se han utilizado para estos fines se encuentran las nanopartículas magnéticas. Para la obtención de estas nanopartículas es común utilizar métodos convencionales como precipitación química y bioprecipitación, intercambio iónico, coagulación/floculación y separación electroquímica, sin embargo algunas de estas técnicas se realizan químicamente y requieren la utilización de fuertes agentes

---

<sup>1</sup> Mundial, I., & Unidas, N. (2019). *No Dejar*. Retrieved from <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367304?locale=en>

<sup>2</sup> Villegas, G., Víctor, R., Ale, N., Lezama, G., Enrique, G., Ojeda, Y., ... Holger, J. (2013). *EQUILIBRIO DE BIOSORCIÓN DE PLOMO ( II ) Y CARACTERIZACIÓN MEDIANTE FT-IR Y SEM-EDAX EN LEAD ( II ) BIOSORPTION EQUILIBRIUM AND CHARACTERIZATION THROUGH FT-IR AND SEM-EDAX*.

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

---

reductores como por ejemplo el borohidruro de sodio, químico altamente corrosivo y toxico, por lo cual se genera un gran impacto ambiental<sup>3</sup>.

Debido a que los métodos de síntesis convencionales de nanopartículas generan un impacto ambiental grande, es necesario la utilización de metodologías verdes que proporcionen propiedades magnéticas comparables con los métodos de síntesis convencionales. Por esta razón en esta investigación analizo la utilización de extractos de plantas como agentes reductores en procesos de síntesis verde, ya que estos procesos son amigables con el medio ambiente y han demostrado gran eficiencia en la remoción de contaminantes de cuerpos de agua.

---

<sup>3</sup> Kumar, R., Singh, N., & Pandey, S. N. (2015). Potential of green synthesized zero-valent iron nanoparticles for remediation of lead-contaminated water. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(12), 3943–3950. <https://doi.org/10.1007/s13762-015-0751-z>

### 3. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El uso del agua ha venido aumentando un 1% anual en todo el mundo desde los años 80 del siglo pasado debido a diferentes factores demográficos como socioeconómicos, lo cual genera que la calidad del agua también se vea afectada. Según la OMS, 3 de cada 10 personas no cuentan con acceso a agua potable lo cual significa que 2100 millones de personas que representan el 29 % de la población mundial, carecen de un servicio de agua potable gestionada de manera segura, así mismo 6 de cada 10 personas no tienen acceso a servicios de saneamiento seguros<sup>1</sup>.

Todos estos factores influyen en los altos niveles de contaminación en el medio ambiente, sin mencionar que toneladas de sustancias biológicamente activas, sintetizadas para su uso en la agricultura, la industria, la medicina, etc., han sido vertidas al medio ambiente sin un control y sin tener presente las consecuencias<sup>4</sup>.

Además de la contaminación presente en el medio ambiente, las fuentes hídricas también se ven afectadas debido a varios factores como los metales pesados, los cuales representan un grave problema de tipo ambiental que afecta directamente la integridad de muchos de los organismos presentes en diferentes ecosistemas y que debido a la facilidad de dispersión de dichos contaminantes, es probable que se acumule en algunos de los procesos de la cadena trófica o cadena alimenticia y genere diferentes trastornos en la fisiología humana que a su vez desencadenan una serie de riesgos para la salud de las personas<sup>5</sup>.

---

<sup>1</sup> Mundial, I., & Unidas, N. (2019). *No Dejar*. Retrieved from <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367304?locale=en>

<sup>4</sup> Lima, V. C., Prata, T. S., Landa, G., Yannuzzi, L. A., & Rosen, R. B. (2010). Intravitreal triamcinolone and bevacizumab therapy for combined papillophlebitis and central retinal artery occlusion. *Retinal Cases and Brief Reports*, 4(2), 125–128. <https://doi.org/10.1097/ICB.0b013e3181ad3957>

<sup>5</sup> Shen, Y. F., Tang, J., Nie, Z. H., Wang, Y. D., Ren, Y., & Zuo, L. (2009). Preparation and application of magnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles for wastewater purification. *Separation*

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

---

Los metales pesados que ocasionan esta contaminación provienen en su mayoría de distintas fuentes antropogénicas como desechos domésticos, agrícolas e industriales y se conoce que un porcentaje considerable de dichos elementos se pueden acumular en los sedimentos superficiales de los ríos<sup>6</sup>.

El riesgo que implica la contaminación de fuentes hídricas debido a estos metales pesados radica en que, a diferencia de otros contaminantes orgánicos, estos no poseen la capacidad de ser biodegradados o descompuestos en componentes también contaminantes, pero menos perjudiciales; por el contrario, estos tienden a acumularse en organismos vivos<sup>7</sup>.

Dentro de este grupo de metales pesados, es muy común la utilización de mercurio en la minería artesanal, siendo esta la mayor fuente de liberación intencional de este metal y según un informe publicado por el PNUMA del 2007, este tipo de actividad artesanal consume 806 toneladas y genera emisiones del orden de 150 toneladas. El mercurio es utilizado para separar y extraer el oro de las rocas en las que se encuentra, debido a que el mercurio se adhiere al oro formando una amalgama lo cual facilita su separación para posteriormente calentar la amalgama y que se evapore el mercurio<sup>8</sup>.

En Colombia 17 departamentos y 80 municipios están siendo afectados por la contaminación que genera la minería del oro, evidenciando en algunos de ellos concentraciones en aguas superficiales por encima de los 3,0 µg/L. En 2010 Colombia generó (75,0 Ton/año) de mercurio ubicándola en el segundo lugar de los

---

<sup>6</sup> Herrera Núñez, J., Rodríguez Corrales, J., Coto Campos, J. M., Salgado Silva, V., & Borbón Alpizar, H. (2013). Evaluación de metales pesados en los sedimentos superficiales del río Pirro. *Revista Tecnología En Marcha*, 26(1), 27. <https://doi.org/10.18845/tm.v26i1.1119>

<sup>7</sup> Molina, C., Ibañez, C., & Gibon, F.-M. (2012). Proceso de biomagnificación de metales pesados en un lago hiperhalino (Poopó, Oruro, Bolivia): posible riesgo en la salud de consumidores. *Ecología En Bolivia: Revista Del Instituto de Ecología*, 47(2), 99–118.

<sup>8</sup> Cano, S. E. (2012). Contaminación con mercurio por la actividad minera. *Biomedica*, 32(3), 309–312.

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

---

países que más contaminan por este metal. Por otra parte, pese a que la concentración de mercurio permitida en Colombia debe ser menor a 2,0 µg/L, en la ciénaga de Ayapel Córdoba se detectaron concentraciones de hasta 5,0 µg/L<sup>9</sup>.

Aunque el mercurio presenta un alto índice de toxicidad, cuando este es arrastrado por el suelo y a los diferentes cuerpos de agua por las lluvias, este se transforma en metilmercurio, una forma de mercurio mucho más tóxica. A través de los procesos de “bioacumulación” y “biomagnificación” el metilmercurio ingresa a los organismos vivos, donde se elimina muy difícilmente<sup>8</sup>.

Dentro de los procesos utilizados para tal fin se pueden encontrar técnicas convencionales como precipitación química y bioprecipitación, coagulación/floculación, intercambio iónico y separación electroquímica, adsorción entre otros<sup>10</sup>. Algunas de estas técnicas poseen una serie de factores limitantes para su implementación como requerimientos de grandes tiempos de contacto, peligros de proliferación bacteriana, generación de lodos y sobrecostos de operación o simplemente liberación al ambiente de los agentes precipitantes utilizados<sup>11</sup>.

Cada una de estas técnicas presenta diferentes ventajas y desventajas, por lo cual es necesario seguir investigando y desarrollando técnicas enfocadas a la nanotecnología, la cual ofrece la posibilidad de nuevos materiales para el tratamiento de aguas como las nanopartículas magnéticas que gracias a sus

---

<sup>9</sup> Díaz-Arriaga, F. A. (2014). Mercurio en la minería del oro: Impacto en las fuentes hídricas destinadas para consumo humano. *Revista de Salud Pública*, 16(6), 947–957. <https://doi.org/10.15446/rsap.v16n6.45406>

<sup>8</sup> Cano, S. E. (2012). Contaminación con mercurio por la actividad minera. *Biomedica*, 32(3), 309–312

<sup>10</sup> Singh, S., Barick, K. C., & Bahadur, D. (2011). Surface engineered magnetic nanoparticles for removal of toxic metal ions and bacterial pathogens. *Journal of Hazardous Materials*, 192(3), 1539–1547. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.06.074>

<sup>11</sup> Marimón, W. (2016). *INGENIERIA DE NANOPARTICULAS MAGNETICAS PARA LA REMOCION DE MERCURIO (II) EN AGUAS* (pp. 1–34). pp. 1–34.

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

---

propiedades se puede convertir en un método eficaz y conveniente para la separación de partículas utilizando separación magnética.

Debido a que los métodos de síntesis convencionales de nanopartículas generan un impacto ambiental grande, es necesario la utilización de metodologías verdes que proporcionen propiedades magnéticas comparables con los métodos de síntesis convencionales.

### **3.1. PREGUNTA PROBLEMA**

¿Cuáles son las condiciones de síntesis favorables para optimizar las propiedades magnéticas de las nanopartículas mediante la utilización de extracto de plantas como agentes reductores de síntesis verde?

#### 4. ANTECEDENTES

En investigaciones previas realizadas por estudiantes de la universidad católica de Colombia, se presentan los siguientes trabajos correlacionados con nuestro proyecto de investigación.

##### 4.1. RECUBRIMIENTO ELABORADO A PARTIR DE NANOPARTÍCULAS DE $TiO_2$ CON PROPIEDADES AUTO LIMPIABLES EN VIDRIO

Los estudiantes Viviana López y Diego Riveros en el año 2018 desarrollaron un trabajo de investigación el cual tuvo como principal objetivo realizar la fabricación de un revestimiento para vidrios de fachadas, a partir del uso de nano partículas de  $TiO_2$  mediante el método de sol-gel.

El cual se realizó a través de la metodología de recopilación de información de las propiedades del vidrio, la nanotecnología aplicada en la ingeniería civil y las características de dióxido de titanio, así mismo analizaron la información por medio de artículos científicos y posteriormente desarrollaron las pruebas de laboratorio para la obtención del gel y la película de nanopartículas.

Obteniendo como conclusión que el método sol-gel fue adecuado para la fabricación de las nanopartículas debido a que el producto tiene un breve proceso de fabricación y puede ser aplicada después de 24 horas. En donde el recubrimiento de nanopartículas de  $TiO_2$  para los vidrios convencionales son afectados por el modo de aplicación y condiciones iniciales del gel.

Comprobando por medio del estudio de microscopio de barrido y por las imágenes del MEB que el tamaño de las nanopartículas están en los rangos establecidos y no presenta ningún tipo de impureza, en donde se comprobó que el método sol-gel brinda la capacidad al vidrio de ser autolimpiable<sup>12</sup>.

---

<sup>12</sup> López López, Viviana Paola y Riveros Garcia, D. A. (2018). *Recubrimientos elaborados a partir de nanopartículas de  $TiO_2$  con propiedades autolimpiables en vidrios*. 1–8.

---

#### **4.2. OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA DE FILTRACIÓN CON NANOMATERIALES PARA LA MEJORA DE LOS ÍNDICES DE CALIDAD DEL AGUA.**

En el trabajo de investigación realizado por los estudiantes Carolina González y Cristian Linares presento la reducción de los parámetros fisicoquímicos que determinan la calidad del agua dado los resultados obtenidos en la filtración mediante el carbón activado estándar y modificado con nanopartículas magnéticas en dos muestras de agua, agua lluvia y agua contaminada. Este proyecto tenía como objetivo principal “*optimizar un sistema de filtración existente en la Universidad Católica de Colombia mediante el uso de nanopartículas para mejorar los índices de calidad del agua*”, el cual se realizó mediante la síntesis del carbón activado aplicando en el método de síntesis verde impregnando las nanopartículas al carbón activado, así mismo realizaron la caracterización con el fin de determinar el porcentaje de nanopartículas y carbón activado, por último se realizó la determinación de los parámetros fisicoquímicos en los procesos de coagulación-floculación, filtración y el modificado con las nanopartículas.

Obteniendo como resultados entre el 65% y el 90% de reducción en los parámetros de turbiedad, color y solidos totales debido a la implementación de carbón activado modificado con nanopartículas magnéticas y así mismo cada muestra de la investigación presenta un valor de 0.865 en el índice de calidad del agua, el cual presenta un valor aceptable<sup>13</sup>.

---

<sup>13</sup> Garcia, C., & Gonzalez, C. (2019). *OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA DE FILTRACIÓN CON NANOMATERIALES PARA LA MEJORA DE LOS INDICES DE CALIDAD DEL AGUA*. 1–78. <https://doi.org/10.37700/0033-2909.I26.1.78>

## 5. JUSTIFICACIÓN

La contaminación por metales pesados es una problemática que ha ido creciendo considerablemente en algunos sectores del país, como en Bogotá donde según un estudio realizado a un total de 400 personas de entre 3 y 91 años demostró que 9 de cada 10 bogotanos presentan altas concentraciones de mercurio y plomo evidenciados en la orina, sangre y cabello sobrepasando los niveles recomendados por instituto nacional de salud y la organización mundial de la salud presentando concentraciones de mercurio de 98.7% en el pelo, 80.8% en la sangre y 40.6% en la orina<sup>14</sup>.

Por otra parte, en otros sectores del país el aumento de las concentraciones de mercurio se debe al consumo de pescado como principal fuente de proteína, esto ocurre en el departamento de Antioquia y Córdoba y se debe a que muchos de los organismos acuáticos tienen la capacidad de almacenar grandes concentraciones de este metal. Los hombres tenían concentraciones de 4,31 mg/g (n = 56) y en las mujeres 5,78 mg/g (n = 38) y no hubo diferencias en los niveles de Hg entre grupos de diferentes edades<sup>15</sup>.

En el departamento del choco un grupo de toxicólogos de la universidad de Cartagena publicaron recientemente un estudio acerca de contaminación del mercurio producto de la minería del oro, donde se analizaron un total de 258 peces de 16 diferentes especies que fueron capturadas en febrero de 2016 en 11 lugares diferentes del río Atrato se encontraron que los valores totales de mercurio en ellos variaron entre 0.01 mg/g y 3.88 mg/g, los mismos resultados mostraron concentraciones más altas en especies carnívoras como el bagre sapo. Para cada

---

<sup>14</sup> Sánchez, F., & Sharon, C. (2016). *CAPÍTULO II METALES TÓXICOS EN COLOMBIA: PRESENCIA, ORIGEN, DISTRIBUCIÓN Y CONTAMINACIÓN EN COMPONENTES BIÓTICOS Y ABIÓTICOS* Fernanda Sánchez 1 Sharon Corredor 2. Retrieved from [https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2939/CAPÍTULO II Metales Pesados.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2939/CAPÍTULO%20II%20Metales%20Pesados.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

<sup>15</sup> U, J. O., Johnson, B., & Arguello, E. (2002). *Human exposure to mercury in San Jorge river basin , Colombia ǳ South America /*.

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

---

una de estas especies el nivel total de mercurio estuvo por encima del recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para consumo humano (0.5 mg/g) y se encontraron al menos tres veces por encima de los límites establecidos<sup>16</sup>.

Bajo la problemática que representa la escasez de agua y fuentes de abastecimiento poco confiables y de mala calidad generada por la contaminación por metales pesados, muchos países en desarrollo investigan cómo se podría mejorar el acceso al agua limpia a través de la nanotecnología<sup>17</sup>, la cual nos brinda la posibilidad de eliminar de manera eficiente contaminantes y gérmenes presentes en el agua, además de esto con la utilización de nanopartículas y nano membranas se facilita la detección y eliminación de sustancias químicas biológicas incluyendo metales como cadmio (Cd), plomo (Pb) y cromo(Cr), mercurio (Hg). Por otra parte la importancia de la utilización de este tipo de tecnología radica en que los nanomateriales respecto a las técnicas que se utilizan convencionalmente para la remoción materiales contaminantes presenta una mayor reactividad, mayor contacto superficial por su relación (superficie/volumen) y así mismo mejor capacidad de eliminación de materiales contaminantes<sup>18</sup>.

La principal limitación que representa la utilización de nano membranas como la de óxido de grafeno, nanofiltración de cerámica y poliméricas con recubrimiento antiderrame, es el alto costo de estos materiales nanoestructurados y la dificultad en escalar los procesos de manufactura de membrana para uso comercial impidiendo su aplicación en tratamientos de agua a gran escala. Por otra parte, la implementación de nanomateriales para catálisis y fotocátalisis requiere la utilización de lámparas UV y ozono que hacen que el gasto de energía sea muy alto

---

<sup>16</sup> Piedrahita, C. (n.d.). *El sumergido*.

<sup>17</sup> Quintero, E. (2016). *OBSERVATORIO CT + i*.

<sup>18</sup> Tiwari, D. K., Behari, J., & Sen, P. (2008). *Application of Nanoparticles in Waste Water Treatment*. 3(3), 417–433.

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

---

y limite su uso, además de esto estos materiales pueden presentar recombinación de cargas, inestabilidad coloidal y derrame<sup>19</sup>.

Por esta razón el desarrollo de esta investigación busca establecer la eficiencia que tiene la implementación de nanopartículas en la optimización de las propiedades magnéticas con el fin de remplazar las técnicas convencionales para la remoción de metales pesados con el fin de mitigar las problemáticas que generan este tipo de métodos como lo generación de lodos, altos costos de operación y peligros de crecimiento bacteriano<sup>20</sup>.

---

<sup>19</sup> Chávez-Lizárraga, G. A. (2018). Nanotecnología una alternativa para el tratamiento de aguas residuales: Avances, Ventajas y Desventajas. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 9(1), 52–61. <https://doi.org/10.36610/j.jsars.2018.090100052>

<sup>20</sup> MARIMON, W. (2018). *INGENIERÍA DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS PARA LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN AGUAS*. 160.

## 6. MARCO TEORICO

### Contaminación del agua

La contaminación de los recursos hídricos es una de las principales problemáticas que afecta la calidad del agua y directamente la salud de las personas que se abastecen de ella y se da principalmente debido al actual estilo de vida que se ha ido adoptando en las sociedades urbanas ya que se vierten al ambiente grandes volúmenes de aguas residuales y de residuos sólidos de composición variada, entre los que se encuentra una amplia gama de microorganismos patógenos y de contaminantes químicos con potencial para afectar la salud pública y el ambiente. Esta contaminación puede ser originada de diversas maneras como por ejemplo al verter directamente descargas de aguas residuales crudas o tratadas en los cuerpos receptores superficiales; o indirectamente al disponer aguas residuales, excretas o residuos sólidos en el suelo<sup>21</sup>.

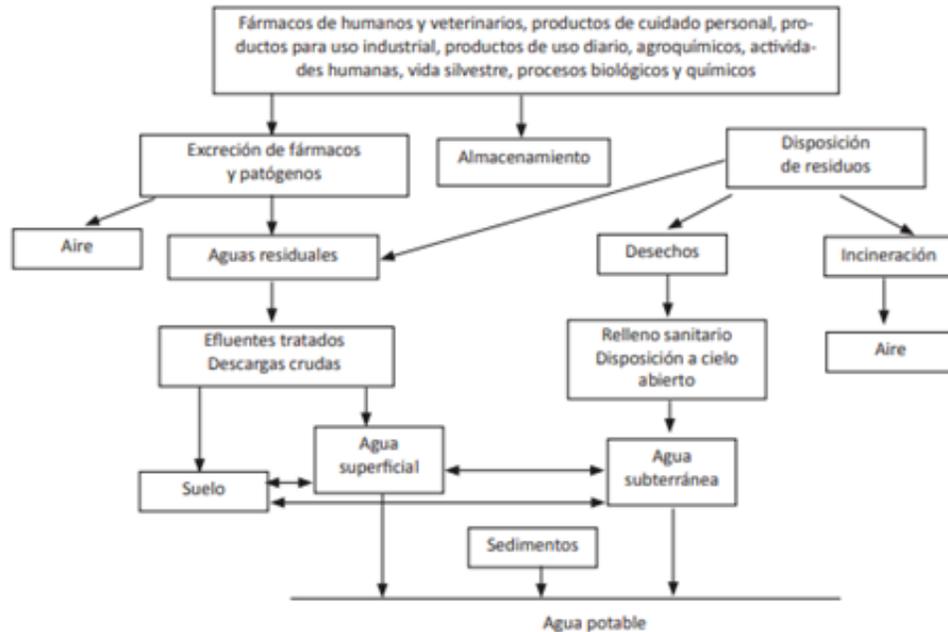
En la Figura 1 se representa esquemáticamente algunas de las fuentes de contaminación que se pueden encontrar.

---

<sup>21</sup> Enriqueta, J., Muñoz, C., Guillermo, C., & Mólgora, C. (n.d.). *Parte III Calidad del agua, en contacto con zonas de riego que usan agua residual*.

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

Figura 1 Rutas de ingreso de contaminantes emergentes al ambiente y al agua potable



Fuente: artículo- La contaminación de las aguas por hidrocarburos<sup>22</sup>.

### Tratamiento de agua

Debido a los altos índices de contaminación en el agua que han sido generados por las diferentes actividades del hombre, han llevado a que la calidad de los recursos hídricos se vea afectada y no cumpla con una serie de parámetros de calidad del agua necesarios para que dicha agua sea apta para el consumo humano, es por esta razón que es necesario implementar una serie de métodos y procesos para el tratamiento del agua, con el fin de garantizar que dicha agua esté libre de microorganismos patógenos, sustancias tóxicas o nocivas para la salud, y cumplir con las normas bacteriológicas y fisicoquímicas establecidas.

<sup>22</sup> Prieto Díaz, V. I., & Martínez de Villa Pérez, A. (1999). La contaminación de las aguas por hidrocarburos: un enfoque para abordar su estudio. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, Vol. 37, pp. 13–20. scielocu.

En general el tratamiento de aguas hace referencia a los métodos que se implementan para eliminar los residuos y mejorar la calidad en cuanto al color, olor, sabor y apariencia. Dichos métodos o procesos pueden ser físicos, químicos o biológicos; donde los físicos son aquellos que no generan sustancias nuevas, sino que se concentran en los contaminantes, los químicos si generan sustancias nuevas y por último los biológicos son aquellos donde se implementan organismos vivos<sup>23</sup>.

### **Precipitación química y bioprecipitación**

Es uno de los métodos que se emplean para el tratamiento de aguas residuales donde se utilizan una serie de procesos bioquímicos donde los microorganismos implicados reducen los metales pesados en forma de sulfuros para que ocurra el fenómeno de precipitación. Este método de precipitación de hidróxidos o sulfuros es considerado como una de las formas de tratamiento terciario de agua residual pero su principal problemática es la generación de grandes volúmenes de sólidos, a los cuales se les debe dar un manejo adecuado<sup>24</sup>.

### **Intercambio iónico**

Es un proceso en el cual se utilizan membranas de separación de materiales poliméricos aniónicos o catiónicos para que ocurra una transferencia de iones entre un medio sólido y una solución. Para este procedimiento los materiales que se utilizan frecuentemente para el tratamiento de aguas son las resinas sintéticas.

En un documento de la universidad de Coruña en el año 2015, se define el intercambio iónico como una operación unitaria la cual permite que separadas

---

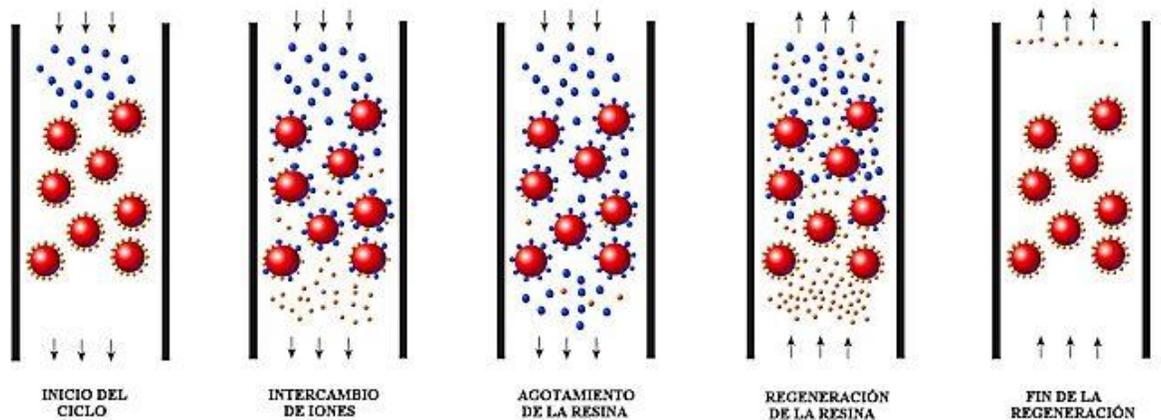
<sup>23</sup> Chunculluy, N. (2011). Tratamiento de agua para consumo humano. *Ingeniería Industrial*, 29(29), 153–170. Retrieved from [http://revistas.ulima.edu.pe/index.php/Ingenieria\\_industrial/article/viewFile/232/208](http://revistas.ulima.edu.pe/index.php/Ingenieria_industrial/article/viewFile/232/208)

<sup>24</sup> Tema 8: *Química de las aguas naturales*. (n.d.). 1–13.

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

especies iónicas disueltas mediante e su transferencia desde la fase líquida a un material intercambiador sólido, donde se sustituyen otros iones del mismo signo eléctrico<sup>25</sup>.

Figura 2 Intercambio Iónico



Fuente: artículo- Intercambio iónico (FT-TER-006) <sup>25</sup>.

## Coagulación

La coagulación se conoce como “la desestabilización eléctrica de algunas Partículas medias te la adición de sustancia químicas que son los coagulantes”, esta operación se desarrolla en tanques de mezcla, en donde el agua se somete a agitación formando una solución homogénea de los coagulantes en un lapso de tiempo corto. Este proceso tiene como fin remover del agua a tratar la turbiedad orgánica e inorgánica, color verdadero, color aparente, eliminar bacterias, virus, organismos patógenos, destrucción de algas, plancton y sustancias productoras de sabor y olor. Para evaluar esta operación se debe tener en cuenta las características físicas y

<sup>25</sup> Universidad de Coruña. (2015). *Intercambio iónico (FT-TER-006)*. 30. Retrieved from <https://www.wateractionplan.com/documents/186210/200858/FT-TER-006-INTERCAMBIO+IONICO+A201515.pdf/7ad263b8-d51c-44b3-a366-9598794c596e>

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

---

químicas del agua; la concentración, dosis, aplicación de la coagulación y los tiempos de mezcla. Los factores que influyen en la coagulación se comprenden como capacidad de cambio, tamaño de las partículas, temperatura, concentración de pH, relación cantidad-tiempo y alcalinidad<sup>26</sup>.

Las clases de coagulantes para aguas potables según la “*Evaluación del proceso de coagulación – floculación de una planta de tratamiento de agua potable*” son las sales de Aluminio, sales de hierro y polímeros. Las sales de Aluminio forman “un floc ligeramente pesado”, la más utilizada debido a su bajo costo y su sencillo manejo es el Sulfato de Aluminio  $Al_2(SO_4)_3$ ; las sales de hierro forman un floc más pesado y de una mayor velocidad de asentamiento en comparación con las sales de aluminio, las más implementadas son el Cloruro Férrico, Cloruro de Hierro y los sulfatos de hierro férrico y ferroso; y polímeros los cuales se determinan como compuestos de alto peso molecular ayudando a la coagulación, su dosificación de esta sustancia se utiliza en muy bajas concentraciones<sup>26</sup>.

### Floculación

Es la segunda fase en que se sedimentan las partículas a partir de la desestabilización de tamaño coloidal, se da por medio de agitación moderada del agua y “*la unión de los flóculos ya formados con el fin de aumentar su volumen y peso de forma que pueden decantar*”<sup>27</sup>. La floculación se debe a un mecanismo que forma puentes químicos o enlaces físico, la floculación consiste en partículas coaguladas de tamaño submicroscópico en visibles, discretas y suspendidas<sup>28</sup>.

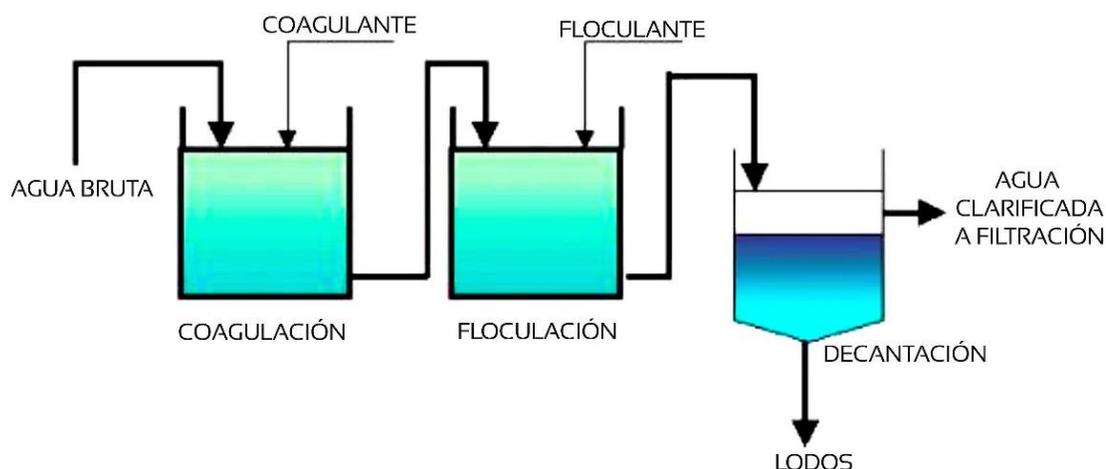
---

<sup>26</sup> Osorno, H. A. R. (2009). EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COAGULACIÓN – FLOCULACIÓN DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE. *UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA*, 31–47.

<sup>27</sup> Coagulación-, E. D. E. L. P. D. E. (2009). Estudio Del Proceso De Coagulación-Floculación De Aguas Residuales De La Empresa Textil “Desembarco Del Granma” a Escala De Laboratorio. *Tecnología Química*, XXIX (3), 64–73. <https://doi.org/10.1590/2224-6185.2009.3>.

<sup>28</sup> TRIANA, E. J. H., & BRICEÑO, C. A. C. (2017). *DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA PLANTA MODELO DE TRATAMIENTO PARA LA POTABILIZACION DE AGUA*

Figura 3 Procesos de Coagulación y Floculación



Fuente: Estudio para la rehabilitación de una planta de tratamiento<sup>29</sup>.

## Nanotecnología

Abarca la capacidad de diseñar y fabricar materiales, dispositivos y sistemas con control a dimensiones nanométricas. Por lo general, se considera que los "materiales de ingeniería" comprenden el diseño, la caracterización, producción y aplicación de materiales, los cuales hoy en día se han ampliado a incluir dispositivos y sistemas en lugar de solo materiales. La esencia de la nanotecnología es el tamaño y el control debido a la diversidad de aplicaciones<sup>30</sup>.

En la figura 4 se evidencia tres aspectos de la nanotecnología: indirecto, directo y conceptual. Por indirecto "la *miniaturización progresiva de las tecnologías existentes*", lo que abre nuevas áreas de aplicación para esas tecnologías. Directo

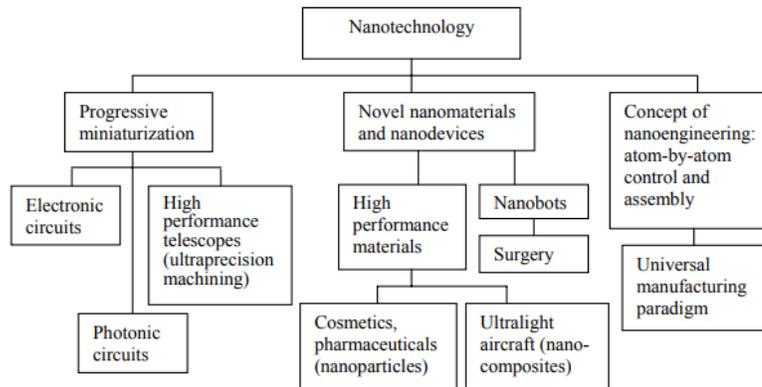
<sup>29</sup> ÍÑIGUEZ, G., & HERNÁNDEZ, R. (2010). Estudio para la rehabilitación de una planta de tratamiento de vinazas tequileras mediante un floculante polimérico de poliacrilamida (PAM). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, Vol. 26, pp. 299–311. scielomx.

<sup>30</sup> Ramsden, J. J. (2005). What is nanotechnology? *Nanotechnology Perceptions*, 1(1), 3–17. <https://doi.org/10.4024/n03ra05/01.01>

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

da referencia a la aplicación de nano ingeniería, aplicada para mejorar el rendimiento de los procesos y materiales existentes. Finalmente, está el aspecto conceptual de la nanotecnología, en el que todos los materiales y los procesos se consideran desde un punto de vista molecular o incluso atómico, como en los sistemas vivos<sup>30</sup>.

Figura 4 Nanotecnología



Fuente: Artículo- What is nanotechnology? <sup>30</sup>

### Nanotecnología en el tratamiento de aguas

Debido a los grandes avances que se han desarrollado en el campo de la nanotecnología, y los altos índices de contaminación que se han presentado, se ha optado por implementar este tipo de tecnologías en el tratamiento de aguas residuales. Son muchos los factores y las ventajas que presenta la implementación de nanotecnología para tratar esta problemática, ya que se utilizan nanomateriales

---

<sup>30</sup> Ramsden, J. J. (2005). What is nanotechnology? *Nanotechnology Perceptions*, 1(1), 3–17. <https://doi.org/10.4024/n03ra05/01.01>

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

---

con un tamaño menor a 100 nm, lo cual nos ofrece propiedades como alta reactividad, fuertes fuerzas de interacción, alta área superficial, etc<sup>31</sup>.

Los desarrollos de diferentes nanomateriales han permitido implementar procesos económicamente viables para el tratamiento efectivo de aguas residuales que garanticen el cumplimiento de los estándares de calidad. Las nanopartículas tienen la capacidad de penetrar más profundamente la estructura del agua y por lo tanto puede tratar de manera más efectiva los problemas de contaminación del agua en comparación con otras tecnologías convencionales. Además de esto, Las nanopartículas, que tienen una alta capacidad de absorción, interacción y reacción, pueden comportarse como coloides al mezclarse con suspensiones acuosas<sup>32</sup>.

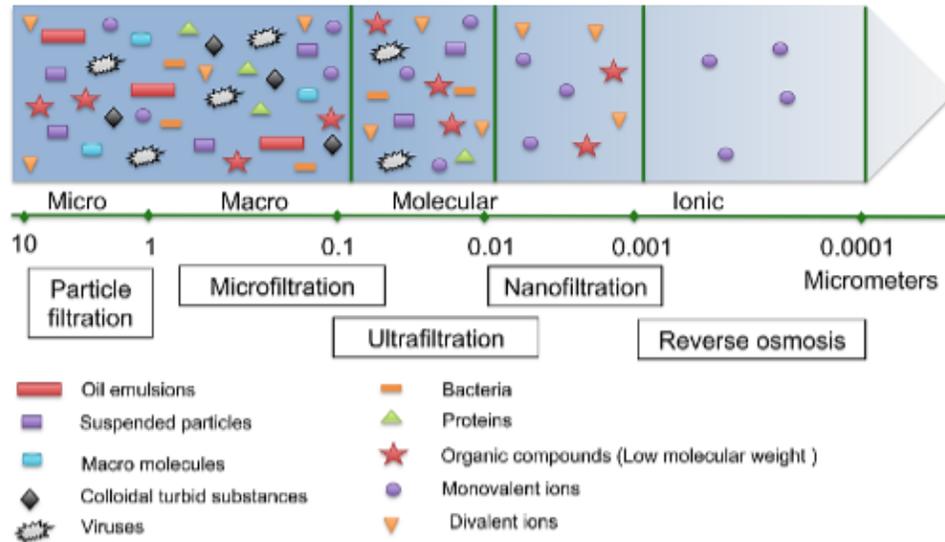
---

<sup>31</sup> Yunus, I. S., Harwin, Kurniawan, A., Adityawarman, D., & Indarto, A. (2012). Nanotechnologies in water and air pollution treatment. *Environmental Technology Reviews*, 1(1), 136–148. <https://doi.org/10.1080/21622515.2012.733966>

<sup>32</sup> M. T. Amin, A. A. Alazba, and U. M. (2014). *A Review of Removal of Pollutants from Water/Wastewater Using Different Types of Nanomaterials*. 1–24. <https://doi.org/10.1007/BF02819836>

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

Figura 5 Dependencia del tamaño en la técnica de filtración



Fuente: artículo- nanopartículas, nanotecnología y toxicidad <sup>33</sup>

### Nanopartículas magnéticas

La obtención de nanopartículas magnéticas implica una reducción del tamaño de las partículas, lo que a su vez genera un cambio de comportamiento del material debido a que pasa de ser ferro o ferromagnético a superparamagnético. La utilización de este tipo de nanopartículas nos ofrece una gran variedad de aplicaciones que van desde los campos de la electrónica, la mecánica, y la óptica, hasta alcanzar áreas más complejas como la biomedicina. Cuando se desea implementar nanopartículas superparamagnéticas en áreas como la biología, es necesario que se cumplan una serie de requisitos de uniformidad y una estrecha distribución de tamaños, además de esto también se requiere que sean dispersables en agua o fluidos biológicos.

<sup>33</sup> Staff, R. (2015). Nanotecnología, nanopartículas y toxicidad. *Revista Enfermería Del Trabajo*, 5(1), 21–27.

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

---

En la literatura se han encontrado síntesis de una gran variedad de nanopartículas con comportamiento magnético con características particulares cada una de ellas, como por ejemplo nanopartículas de  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$  que presentan tamaños que varían entre los 2 y 9 nm, comportamiento superparamagnético y baja magnetización a saturación (15 emu/g); nanopartículas de óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) con comportamiento superparamagnético, magnetización a saturación que varía entre 30 y 80 emu/g (dependiendo de la concentración de los elementos) y baja citotoxicidad, entre otras.

Dentro de las nanopartículas mencionadas anteriormente, las más estudiadas hasta el momento han sido las de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), las cuales se caracterizan por su bajo costo de producción, bajo campo coercitivo y niveles de magnetización aceptables<sup>34</sup>.

Dentro de las nanopartículas mencionadas anteriormente, las más estudiadas hasta el momento han sido las de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), las cuales se caracterizan por su bajo costo de producción, bajo campo coercitivo y niveles de magnetización aceptables<sup>35</sup>.

La magnetita  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , es un óxido mixto de hierro que se compone de oxígeno y hierro con porcentajes de 27.6% y 72.4% respectivamente. Cristaliza en un sistema cúbico centrado en las caras (FCC de oxígenos a  $\approx 8.40 \text{ \AA}$ ) con estructura de espinela inversa, como se ilustra en la Figura 6.

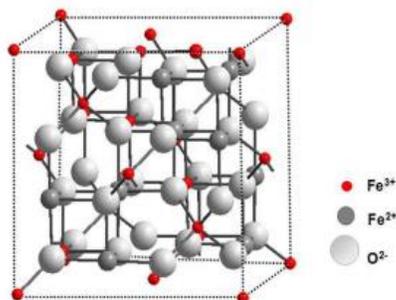
---

<sup>34</sup> García Castrillón, M. (2012). Síntesis de nanopartículas magnéticas y su aplicación en nanocompuestos de matriz polimérica con propiedades magnéticas. *Tesis Doctoral*, 279. Retrieved from <http://zaguan.unizar.es>

<sup>35</sup> Noval, V. E., Puentes, C. O., & Carriazo, J. G. (2017). Magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ): Una estructura inorgánica con múltiples aplicaciones en catálisis heterogénea Resumen Magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ): An inorganic structure with many applications for heterogeneous catalysis Abstract Magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ): Una estructura. *Revista Colombiana de Química*, 46(1), 42–59. Retrieved from <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcolquim/article/view/62831/63822>

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

Figure 6 Estructura de espinela inversa de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>



Fuente: Magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>): Una estructura inorgánica con múltiples aplicaciones en catálisis heterogénea<sup>35</sup>

En la tabla 1 se pueden evidenciar una serie de características generales de la magnetita natural<sup>35</sup>.

Tabla 1 Características generales de la magnetita natural

Fórmula química	FeFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (Fe <sup>2+</sup> Fe <sup>3+</sup> <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ), Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
Clase	Oxido
Grupo	Espinela
Etimología	El nombre probablemente se deriva de la localidad de Magnesia, en Macedonia
Sistema y clase	Isométrico 4/m $\bar{3}$ 2/m
Tipo de celda unitaria	Cúbica (espinela inversa)
Grupo espacial	<i>Fd3m</i> , <i>a</i> = 8,40 Å; <i>Z</i> = 8
Posiciones en difracción de rayos X (DRX)	Valores de espaciado interplanar <i>d</i> (Å): 2,96 – 2,53 – 1,61 – 1,48 – 1,09
Color	Negro
Brillo	Metálico
Densidad	5,2 g/cm <sup>3</sup>
Óptica	Opaco, de color gris e isotropo
Magnetismo	Ferrimagnética
Forma de presentarse en la naturaleza	Frecuentemente en cristales octaédricos, raramente en dodecaédricos. Masivo o diseminado en agregados, gránulos compactos, también en arenas sueltas magnéticas

Fuente: Magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>): Una estructura inorgánica con múltiples aplicaciones en catálisis heterogénea<sup>35</sup>

<sup>35</sup> Noval, V. E., Puentes, C. O., & Carriazo, J. G. (2017). Magnetita ( Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ): Una estructura inorgánica con múltiples aplicaciones en catálisis heterogénea Resumen Magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>): An inorganic structure with many applications for heterogeneous catalysis Abstract Magnetita ( Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ): Uma estrutura. *Revista Colombiana de Química*, 46(1),

### **Métodos de síntesis de nanopartículas**

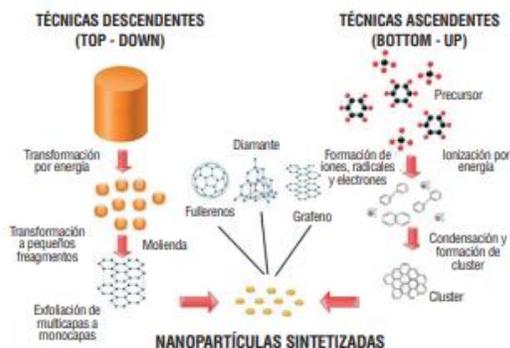
Para llevar cabo el proceso de síntesis de nanopartículas Nps, se pueden establecer principalmente dos estrategias, top-Down y bottom-up, las cuales se pueden apreciar gráficamente en la figura 7; en el método top-Down se parte de la masa y posteriormente se reduce el tamaño hasta llegar al rango nanométrico, en este método se pueden diferenciar algunas de las técnicas utilizadas como molienda de alta energía, deposición en fase vapor, sputtering, entre otros. Algunos de estos métodos tienen presentan una limitación, y es que requieren de instrumentación compleja, lo que incrementa los costos de producción. En cuanto al método bottom-up, los átomos o moléculas se ensamblan hasta lograr estructuras moleculares en el tamaño nano y es la más utilizada para la preparación de Nps. Por otra parte, este método involucra síntesis química y biológica evidenciando algunos métodos como el coloidal, sol-gel, síntesis solvotermal para síntesis química y el uso de microorganismos para síntesis biológica<sup>36</sup>.

---

<sup>36</sup> Sakthivel, S., & Prasanna Venkatesh, R. (2012). Solid state synthesis of nano-mineral particles. *International Journal of Mining Science and Technology*, 22(5), 651–655. <https://doi.org/10.1016/J.IJMST.2012.08.010>

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

Figura 7 Técnicas de síntesis de nanomateriales basados en carbono



Fuente: Nanomateriales, nanopartículas y síntesis verde<sup>36</sup>

Aunque los métodos químicos representan mayor viabilidad en cuanto a factores de sustentabilidad y ambientales, presentan una serie de inconvenientes durante los cultivos, baja velocidad de síntesis y es difícil controlar la distribución de tamaño, forma y cristalinidad de las Nps; todos estos factores afectan finalmente las propiedades de las mismas<sup>37</sup>.

### Síntesis verde

Una de las principales problemáticas que implica la producción de nanopartículas, es que se requiere la utilización de materiales tóxicos como lo son algunos solventes y surfactantes, que implican directamente el deterioro del medio ambiente, por esta razón surge la importancia de desarrollar métodos de síntesis que sean amigables con el medio ambiente, como lo son los procesos de síntesis verde que sobresalen

<sup>36</sup> Sakthivel, S., & Prasanna Venkatesh, R. (2012). Solid state synthesis of nano-mineral particles. *International Journal of Mining Science and Technology*, 22(5), 651–655. <https://doi.org/10.1016/J.IJMST.2012.08.010>

<sup>37</sup> Narayanan, K. B., & Sakthivel, N. (2010). Biological synthesis of metal nanoparticles by microbes. *Advances in Colloid and Interface Science*, 156(1–2), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2010.02.001>

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

---

como como una técnica alternativa de bioproducción de material nano particulado junto con material metálico<sup>38</sup>.

El contexto de este método se basa en el principio de la biorremediación, técnica que consiste básicamente en la utilización de las funciones naturales que poseen las plantas para extraer y recuperar los metales de los suelos que han sido contaminados con estos mismos metales debido a la capacidad de acumulación que estas presentan<sup>39</sup>.

La síntesis verde consiste en la reducción de metales mediante especies naturales con poder antioxidante. Este sistema surge debido a que durante la última década se ha demostrado que plantas y algas, diatomeas, bacterias, levaduras, hongos, y células humanas que son diferentes tipos de sistemas biológicos, pueden remplazar los agentes químicos reductores, ya que tienen la capacidad de transformar los iones inorgánicos metálicos en nanopartículas de metal mediante las proteínas y las capacidades reductoras de los metabolitos que poseen los mismos<sup>40</sup>.

Una de los métodos más rápido y eficiente para sintetizar de manera directa las nanopartículas, es mediante la utilización de extractos acuosos de plantas, debido a que estos contienen generalmente uno o más ingredientes activos de una planta

---

<sup>38</sup> Moghaddam, A. B., Namvar, F., Moniri, M., Tahir, P. M., Azizi, S., & Mohamad, R. (2015). Nanoparticles biosynthesized by fungi and yeast: A review of their preparation, properties, and medical applications. *Molecules*, 20(9), 16540–16565. <https://doi.org/10.3390/molecules200916540>

<sup>39</sup> Yang, Q., Shan, W., Hu, L., Zhao, Y., Hou, Y., Yin, Y., ... Jiang, G. (2018). Uptake and Transformation of Silver Nanoparticles and Ions by Rice Plants Revealed by Dual Stable Isotope Tracing. *Environmental Science & Technology*, 53. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02471>

<sup>40</sup> Mittal, A. K., Chisti, Y., & Banerjee, U. C. (2013). Synthesis of metallic nanoparticles using plant extracts. *Biotechnology Advances*, 31(2), 346–356. <https://doi.org/10.1016/J.BIOTECHADV.2013.01.003>

Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de  
hierro obtenidas por síntesis verde

---

en específico<sup>41</sup>. En nuestro caso para el desarrollo de esta investigación utilizaremos como agente reductor el extracto de té de coca, donde llevaremos a cabo todo el proceso de síntesis para la obtención de nanopartículas magnéticas que optimicen de remoción de metales pesados en aguas.

---

<sup>41</sup> Vilchis-Nestor, A. R., Sánchez-Mendieta, V., Camacho-López, M. A., Gómez-Espinosa, R. M., Camacho-López, M. A., & Arenas-Alatorre, J. A. (2008). Solventless synthesis and optical properties of Au and Ag nanoparticles using *Camellia sinensis* extract. *Materials Letters*, 62(17–18), 3103–3105. <https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2008.01.138>

## 7. ESTADO DEL ARTE

### 7.1. A REVIEW ON GREEN SYNTHESIS OF MAGNETIC NANOPARTICLES (MAGNETITE) FOR ENVIRONMENTAL APPLICATIONS.

En un trabajo de investigación realizado por el ingeniero Wilfredo Marimon bolívar y la ingeniera Nathalie Toussaint-Jiménez, se aborda el tema de la nanotecnología, específicamente la implementación de síntesis verde de nanopartículas (magnetita) para aplicaciones de tipo ambiental ya que es un método de síntesis ecológico, seguro y económico<sup>42</sup>.

El objetivo de esta investigación es analizar las diferentes fuentes para la síntesis de MNPS mediante la utilización de extractos de plantas o reducción con biomoléculas, así como algunas de las aplicaciones donde estos nanomateriales pueden ser utilizados para procesos de eliminación de contaminantes de sistemas acuosos y como agente antimicrobiano.

Por otra parte, otro de los objetivos de esta investigación es evaluar el potencial toxicológico de estos métodos de síntesis con el fin de comparar la toxicidad que presentan estos materiales respecto a los obtenidos por métodos convencionales para así poder determinar la viabilidad de aplicación a gran escala. Tecnologías.

Dentro de los estudios analizados para el desarrollo de esta investigación se obtuvieron distribuciones de tamaño y grupos funcionales expuestos en la superficie del material con la capacidad de eliminar metales tales como cromo hexavalente con tasas de eliminación de alrededor del 86% para la concentración Inicial de 100 mg / L.

En un estudio realizado por M.V.Arularasu, J. Devakumar y T.V.Rajendran en el 2018, se analizó la obtención de nanomateriales magnéticos mediante la utilización de algas marinas para la reducción de hierro y la posterior formación de ferritas

---

<sup>42</sup> Marimón-bolívar, W., & Toussaint-jimenez, N. (n.d.). *A review on green synthesis of magnetic nanoparticles (magnetite) for environmental applications.*

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

---

donde productos basados en dichas algas resultan ser mejores que los obtenidos por síntesis química. Por esta razón se utilizó una especie de alga marina denominada *alvarezii kappaphycus* como agente reductor en conjunto con la glicina de un hierro 3 precursor de cloruro en la obtención de MNPS donde el material resultante tenía un tamaño medio de 18 a 20 nm con magnetización de saturación de 18.89 emu/g con excelentes propiedades catalíticas para la eliminación de colorantes peligrosos de la industria textil<sup>43</sup>.

Por otra parte, los investigadores El-Kassas Hala, Aly-Eldeen Mohamed A. y Gharib Samiha M en el año 2016, utilizaron *Padina pavonica* y *Sargassum acinarium* para la síntesis verde de nanopartículas de óxido de hierro se obtuvieron partículas de 10 a 19.5 nm y 21,6 a 27,4 nm respectivamente y una capacidad de eliminación de 91% y 78% después de 75 min<sup>44</sup>.

Por último, en un estudio realizado por Wensheng Lu, Yuhua Shen y Anjian Xie en el año 2010, emplearon diferentes fuentes para generar síntesis verde, como por ejemplo  $\alpha$ -D-glucosa, la cual se deriva de un extracto de una planta en presencia de un agente reductor que para este caso es Hierro 3 como un precursor con una serie de especificaciones como la temperatura a 80°C y un tiempo de una hora, se obtuvieron partículas con un tamaño promedio de 12,5 nm y con una magnetización 60,5 emu/g<sup>45</sup>.

---

<sup>43</sup> Arularasu, M. V., Devakumar, J., & Rajendran, T. V. (2018). An innovative approach for green synthesis of iron oxide nanoparticles: Characterization and its photocatalytic activity. *Polyhedron*, 156, 279–290. <https://doi.org/10.1016/J.POLY.2018.09.036>

<sup>44</sup> El-Kassas, H. Y., Aly-Eldeen, M. A., & Gharib, S. M. (2016). Green synthesis of iron oxide (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) nanoparticles using two selected brown seaweeds: Characterization and application for lead bioremediation. *Acta Oceanologica Sinica*, 35(8), 89–98. <https://doi.org/10.1007/s13131-016-0880-3>

<sup>45</sup> Lu, W., Shen, Y., Xie, A., & Zhang, W. (2010). Green synthesis and characterization of superparamagnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 322(13), 1828–1833. <https://doi.org/10.1016/J.JMMM.2009.12.035>

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

---

En conclusión, con la realización de este trabajo investigativo se pudo establecer la eficiencia que tienen las nanopartículas magnéticas que son obtenidas por síntesis verde especialmente en la eliminación de metales pesados en el agua teniendo en cuenta factores como el tamaño de las MNPS y la capacidad de eliminación de dichos metales y así mismo se analizaron los estudios de toxicidad donde se evidencia una disminución en la producción de especies reactivas de oxígeno<sup>42</sup>.

---

<sup>42</sup> Marimón-bolívar, W., & Toussaint-jimenez, N. (n.d.). *A review on green synthesis of magnetic nanoparticles (magnetite) for environmental applications.*

## **8. OBJETIVOS**

### **8.1. OBJETIVO GENERAL**

Establecer las condiciones favorables para la síntesis verde de nanopartículas magnéticas utilizando extractos de plantas como agente reductor.

### **8.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Realizar una revisión de los compuestos activos necesarios para la síntesis de nanopartículas magnéticas utilizando extractos de plantas

Establecer condiciones de operación teórica para la optimización de las propiedades magnéticas de nanopartículas.

Realizar un diseño conceptual de un reactor de síntesis de nanopartículas verdes.

## **9. ALCANCES Y LIMITACIONES**

### **9.1. ALCANCES**

El desarrollo de esta investigación está enfocado a establecer un método de síntesis verde de nanopartículas magnéticas mediante el cual sea posible optimizar el proceso de remoción de metales pesados en aguas contaminadas; dicha remoción se realiza mediante síntesis verde evitando así la utilización de métodos convencionales con el fin de mitigar los impactos tanto ambientales como económicos que estos generan. La remoción que se busca obtener está enfocada específicamente a metales pesados como el mercurio el cual es uno de los que presenta mayor índice de contaminación en fuentes hídricas.

Este método de síntesis verde para la obtención de magnetita se desarrollará mediante la utilización de extracto de té coca como agente orgánico, buscando así establecer la eficiencia de este extracto en la remoción de metales y así mismo definir las concentraciones óptimas de aplicabilidad que optimicen los procesos de magnetización de las nanopartículas.

### **9.2. LIMITACIONES**

Esta investigación tenía planteado cumplir con los alcances estipulados anteriormente, pero esta finalidad no pudo llevarse a cabo debido al cierre temporal de la universidad católica de Colombia y a la imposibilidad del acceso a los laboratorios de la misma. Por esta razón se plantearon nuevos objetivos para el proyecto trabajando la misma línea de investigación establecida inicialmente.

## 10. METODOLOGÍA

Para desarrollar el presente trabajo de investigación se implementará la siguiente metodología:

Figura 8 Esquema de la metodología adoptada



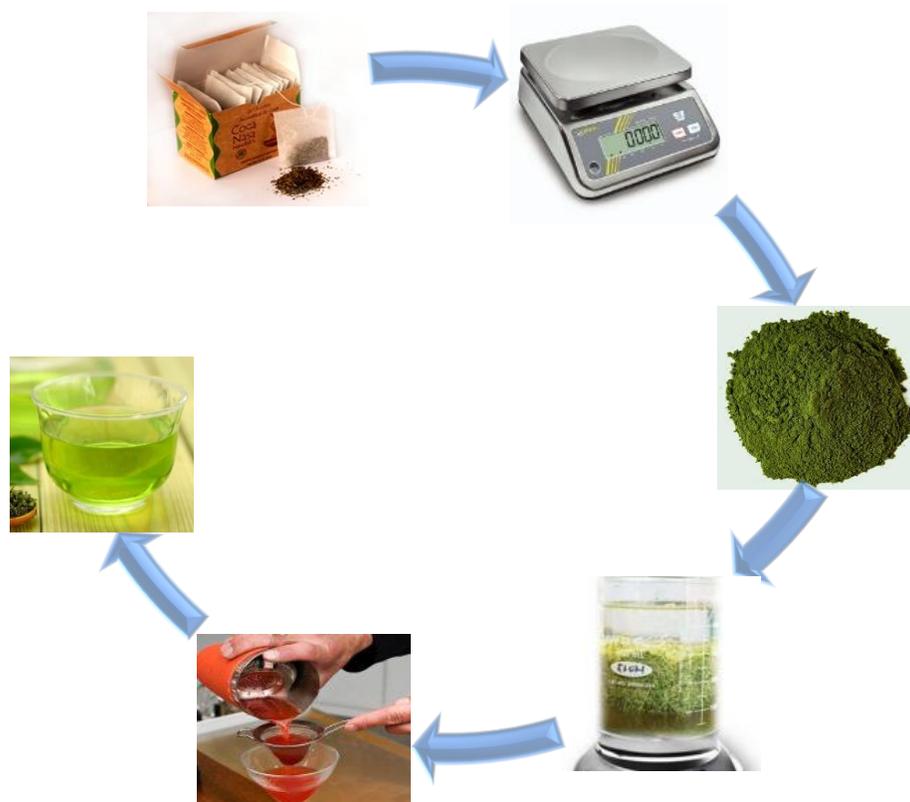
Fuente: Propia

### 10.1. OBTENCIÓN DE EXTRACTO DE TÉ COCA.

La producción de extracto de té se llevará a cabo con la obtención del producto de té de coca comercial, el cual será pesado, seguido de un lavado y secado a temperatura ambiente. Para la extracción se realizará con agua desionizada, la cual se llevará a una temperatura de 60°C durante un periodo de 1 hora en agitación constante, la mezcla resultante se filtrará y se almacenará en frío hasta su utilización para la producción de las nanopartículas.

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

Figura 9 Proceso para la obtención de extracto de té de coca para la síntesis de nanopartículas magenticas.



Fuente: Propia

### 10.2. SÍNTESIS DE NANOMATERIAL

La obtención de nanopartículas magnéticas verdes se basa en la modificación de una técnica utilizada en investigaciones publicadas previamente por coprecipitación por metodología verde. De manera general, se añaden 10 ml de una solución de  $\text{FeCl}_3$  (0,1 mol/L) y concentraciones variables (0.1 – 1 mol/L) de extracto de té a un vaso de precipitados de 100 ml bajo agitación mecánica a 75°C. Al alcanzar esta temperatura, se adicionan gota a gota solución de hidróxido de sodio de tal forma que se ajuste el pH a valores mayores a 8.5. La mezcla se lleva temperatura de 80, 85 y 90°C de tal forma que se evalúe el efecto de la temperatura de reacción y se mantiene la reacción durante (20, 30 y 40 minutos). Al final de este período, las nanopartículas se separan por aplicación de campo magnético y después se lavan

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

---

varias veces con agua desionizada y alcohol, para posterior secado a 60°C durante 12 horas<sup>20</sup>.

### **10.3. COMPUESTOS ACTIVOS EN LA SÍNTESIS DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS**

Se realizó una revisión bibliográfica de una serie de proyectos e investigaciones en los cuales fueron implementados procesos de síntesis verde para la obtención de nanopartículas donde se utilizaron extractos provenientes de diferentes especies vegetales con características determinadas; proceso ampliamente utilizado por sus beneficios ecológicos. Dicha revisión se realizó para determinar cuáles son los componentes activos que están presentes en los extractos de las plantas, que a su vez favorecen el proceso y la optimización de la síntesis verde de nanopartículas. Dentro de la revisión bibliográfica se escogieron 3 estudios, en cada uno de estos estudios se realizó el proceso de síntesis verde variando parámetros de temperatura, tiempos de reacción y concentración. Con cada uno de los resultados obtenidos se realizaron cuadros comparativos con el fin de establecer cuáles de estos factores representan las condiciones óptimas de operación para el proceso de síntesis verde de nanopartículas teniendo como factor de respuesta el tamaño de la nanopartícula generado y la saturación de magnetización.

### **10.4. CONDICIONES DE OPERACIÓN TEÓRICA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MAGNÉTICAS DE NANOPARTÍCULAS.**

Se realiza un análisis teórico de la fuerza de magnetización para establecer la influencia de cada una de las variables presentes en la ecuación de fuerza de magnetización, para posteriormente dar soporte teórico a los valores de las condiciones óptimas de operación, con base en un referente teórico extraído de artículos investigados.

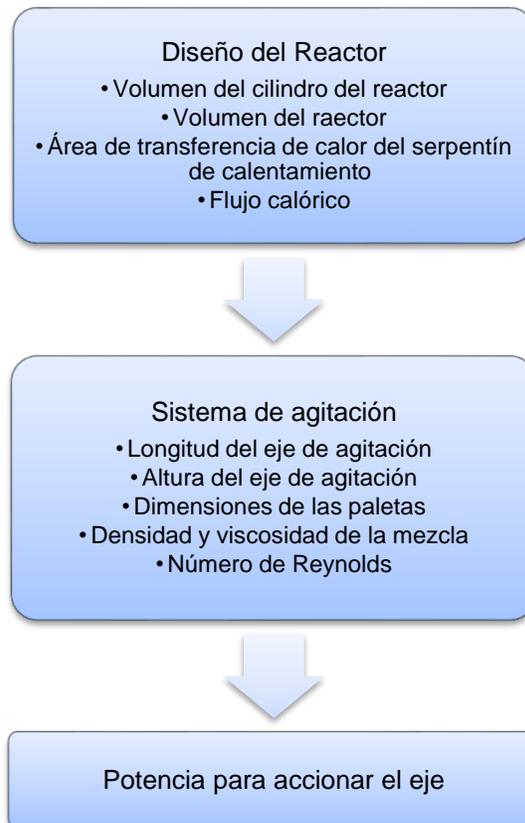
---

<sup>20</sup> MARIMON, W. (2018). *INGENIERÍA DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS PARA LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN AGUAS*. 160.

### 10.5. DISEÑO DEL REACTOR BATCH

Teniendo en cuenta la recopilación de información sobre métodos de síntesis empleados, se establecen una serie de parámetros o condiciones óptimas de operación, las cuales serán utilizadas para realizar el diseño de un reactor para la elaboración de nanopartículas magnéticas mediante síntesis verde.

Para este diseño se realiza el siguiente paso a paso:



## 11.RESULTADOS Y ANÁLISIS

De acuerdo con la metodología planteada en este proyecto se determinó utilizar té de coca como agente reductor en el proceso de síntesis verde, ya que está conformado por una serie de componentes que favorecen el proceso de la síntesis.

Se adquirió el té de coca el cual viene comercialmente en presentación de sobres, donde cada sobre de 0.75 gr aproximadamente. Para la obtención del extracto se decidió adoptar una relación de 100 gr de té de coca por cada 100 ml de agua destilada, donde posteriormente se llevó la muestra a una plancha de calentamiento llevando dicha a muestra a una temperatura de 60 °C y se dejó allí a temperatura constante durante un periodo de una hora.

Figura 10 Preparación del extracto de té de coca



Fuente: Propia

Por último, para el proceso de obtención del extracto, se utilizó un método de filtración de vaciado el cual aumentaba la eficiencia y los tiempos de filtrado, obteniendo un extracto de té de coca con un aspecto físico el cual se muestra en la siguiente figura.

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

Figura 11 Filtrado al vacío del extracto



Fuente: Propia

Una vez obtenido el extracto de té coca se debe caracterizar el material, para llevar a cabo este procedimiento es necesario la utilización de los laboratorios de la universidad, sin embargo, esto no pudo ser realizado debido al cierre permanente de la universidad y la imposibilidad de acceder a los laboratorios de la misma. Por esta razón se estableció dar continuidad al proyecto mediante una revisión teórica de las aplicaciones que tiene la utilización de extractos naturales de plantas y diferentes tipos de té en los procesos de síntesis verde de nanopartículas.

En investigaciones recopiladas en el artículo “Examen de los métodos verdes de hierro nanopartículas síntesis y aplicaciones”<sup>46</sup>, plantean como una variedad de

---

<sup>46</sup> Fahmy, H. M., Mohamed, F. M., Marzouq, M. H., Mustafa, A. B. E. D., Alsoudi, A. M., Ali, O. A., ... Mahmoud, F. A. (2018). Review of Green Methods of Iron Nanoparticles Synthesis and Applications. *BioNanoScience*, 8(2), 491–503. <https://doi.org/10.1007/s12668-018-0516-5>

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

---

hierbas y plantas actúan como antioxidantes compuestos por aminoácidos, polifenoles, bases nitrogenadas y azúcares reductores. A continuación, se analizaron algunos de ellos, mencionando la especie de planta que fue utilizada, concentraciones, tiempos de reacción y así mismo los resultados obtenidos en cada uno de ellos.

### 11.1. THE SYNTHESIS OF GOLD NANOPARTICLES USING *AMARANTHUS SPINOSUS* LEAF EXTRACT AND STUDY OF THEIR OPTICAL PROPERTIES

Uno de los estudios investigados utilizó extracto de hoja de *Amaranthus Spinosisus* para la síntesis de nanopartículas de oro<sup>47</sup>, donde la metodología para la obtención del extracto, consistió en lavar las hojas secas con agua doblemente destilada para posteriormente secarlas y molerlas hasta obtener un polvo fino. Luego se tomó 1 Gr de polvo de hoja y se mezcló con 100 ml de etanol, dejando la mezcla en una incubadora de agitación que funcionaba a 200 rpm, 25°C durante 24 horas, y por último se realizó un proceso de filtrado para obtener el extracto, el cual se mezcló con una solución acuosa de H<sub>2</sub>AuCl<sub>4</sub>.

Para la caracterización de las nanopartículas se colocó pocas gotas de la solución sobre una rejilla de cobre y se dejaron secar en un horno de aire caliente a 50°C durante 4 horas.

Se utilizaron concentraciones de 1,2,3,4 y 5% de extracto para establecer su efecto sobre la síntesis de AuNP, donde se observó un color amarillo debido a la reacción entre H<sub>2</sub>AuCl<sub>4</sub> y el extracto manteniendo la mezcla a temperatura ambiente de 25°C bajo agitación constante y al transcurrir 4 horas, dicha mezcla fue tomando gradualmente un tono rojo rubí<sup>47</sup>.

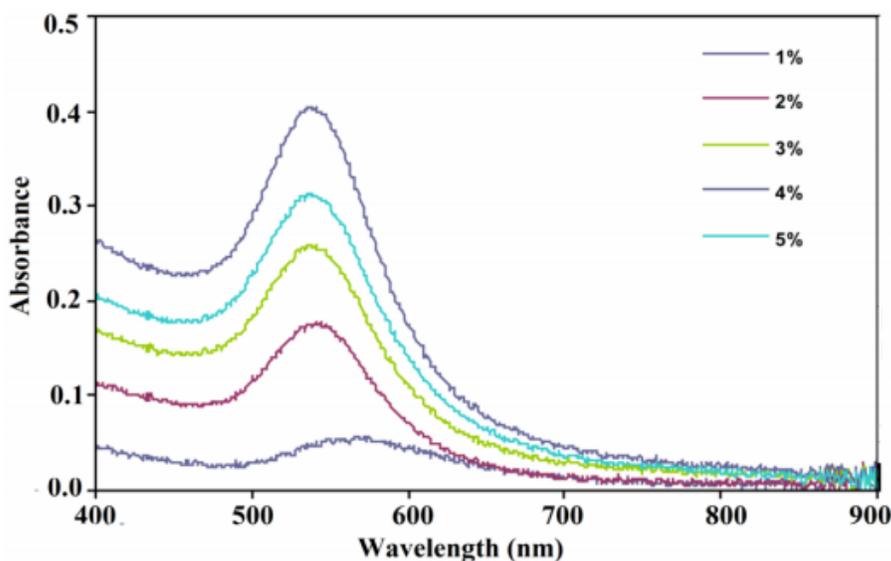
---

<sup>47</sup> Das, R. K., Gogoi, N., Babu, P. J., Sharma, P., Mahanta, C., & Bora, U. (2012). The Synthesis of Gold Nanoparticles Using <i>Amaranthus spinosus</i> Leaf Extract and Study of Their Optical Properties. *Advances in Materials Physics and Chemistry*, 02(04), 275–281. <https://doi.org/10.4236/ampc.2012.24040>

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

Al momento de realizar el ensayo de espectroscopia- visible se apreciaron bandas de absorción con picos que variaron entre (535-565 nm) como se puede apreciar en la figura 12.

Figura 12 Espectros de absorción de AuNP sintetizados mediante el tratamiento de 1 mM de solución de  $\text{HAuCl}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ . spinosus a 25°C bajo agitación magnética.



Fuente: Artículo -The synthesis of gold nanoparticles using amaranthus spinosus leaf extract and study of their optical properties<sup>47</sup>.

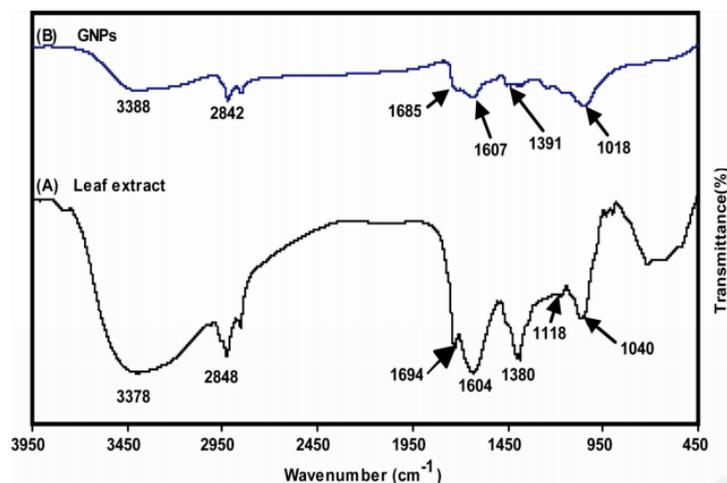
En la figura 12 se apreció la formación de bandas de absorción las cuales se generaron gracias a la propiedad óptica de la superficie del oro conocida como resonancia de plasmón superficial (SPR), donde el pico se ubicó en aproximadamente 565 nm, pudiendo así comprobar que, con concentraciones de extractos más alta, las intensidades de absorbancia son mayores y por ende la formación de más nanopartículas AuNP<sup>47</sup>.

<sup>47</sup> Das, R. K., Gogoi, N., Babu, P. J., Sharma, P., Mahanta, C., & Bora, U. (2012). The Synthesis of Gold Nanoparticles Using <i>Amaranthus spinosus</i> Leaf Extract and Study of Their Optical Properties. *Advances in Materials Physics and Chemistry*, 02(04), 275–281. <https://doi.org/10.4236/ampc.2012.24040>

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

Cuando se realizó el espectro FTIR del extracto de hoja de té (figura 13), se pudo evidenciar bandas características para varios grupos funcionales como hidroxilo, aminas aromáticas, aminas alifáticas, carbonilo, y benceno. Donde cada uno de estos grupos hallados en el espectro se respaldaron con la evaluación de los compuestos como fenoles, flavonoides, lisina entre otros, compuestos presentes en el extracto de hojas de especies *Amaranthus*, ya que este tipo de especies son ricas en propiedades antioxidantes<sup>47</sup>.

Figura 13 Espectros FT-IR de (A) *A. spinosus* extracto de hoja; y (B) AuNP sintetizados a partir de *A. spinosus* extracto de hoja etanólica.



Fuente: Artículo -The synthesis of gold nanoparticles using amaranthus spinosus leaf extract and study of their optical properties <sup>47</sup>.

Es así como se pudo evidenciar en este estudio la eficiencia que presenta la utilización de extracto de hojas de especies *Amaranthus* para la formación de nanopartículas AuNP gracias a sus componentes, específicamente lo fenoles, flavonoides.

<sup>47</sup> Das, R. K., Gogoi, N., Babu, P. J., Sharma, P., Mahanta, C., & Bora, U. (2012). The Synthesis of Gold Nanoparticles Using <i>Amaranthus spinosus</i> Leaf Extract and Study of Their Optical Properties. *Advances in Materials Physics and Chemistry*, 02(04), 275–281. <https://doi.org/10.4236/ampc.2012.24040>

### **11.2. MAGNETIC IRON OXIDE (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) NANOPARTICLES FROM TEA WASTE FOR ARSENIC REMOVAL**

En este artículo hacen referencia a las nanopartículas magnéticas de óxido de hierro sintetizadas con una plantilla de residuos de té (MION-Tea) el cual tiene propiedades súper magnéticas. La muestra de MION-Tea en SEM (microscopio electrónico de barrido) mostro una estructura de cristales en forma de pirámide de magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) y en TEM (microscopía electrónica) mostro un tamaño de partícula entre 5 y 25 nm, estas nanopartículas se probaron para eliminar Arsénico As (III) y As (V) de la solución acuosa. Presentando que el MION-Tea es un absorbente potencial para As (III) y As (V)<sup>48</sup>.

### **11.3. POTENTIAL OF GREEN SYNTHESIZED ZERO-VALENT IRON NANOPARTICLES FOR REMEDIATION OF LEAD-CONTAMINATED WATER**

En otro de los estudios analizados, se buscó mejorar la síntesis de nanopartículas de hierro de valencia cero (ZVINP)<sup>3</sup> utilizando una solución de FeCl<sub>3</sub> como fuente de hierro a reducir, debido a que usualmente el proceso de síntesis se realiza químicamente y se requiere la utilización de fuertes agentes reductores como el borohidruro de sodio, químico altamente corrosivo y toxico, por lo cual se estudió la viabilidad realizar la síntesis utilizando extractos de plantas como agentes reductores, específicamente extracto de hoja de una especie de planta llamada *E. officinalis* y así mismo analizar la aplicación de este para solucionar el problema de contaminación generado por el plomo Pb. Con la espectroscopia FTIR se

---

<sup>48</sup> Lunge, S., Singh, S., & Sinha, A. (2014). Magnetic iron oxide (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) nanoparticles from tea waste for arsenic removal. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 356, 21–31. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2013.12.008>

<sup>3</sup> Kumar, R., Singh, N., & Pandey, S. N. (2015). Potential of green synthesized zero-valent iron nanoparticles for remediation of lead-contaminated water. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(12), 3943–3950. <https://doi.org/10.1007/s13762-015-0751-z>

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

establecieron las características vibratorias de los grupos químicos funcionales de la muestra, donde se obtuvo como resultado vibraciones de estiramiento de 1,616  $\text{cm}^{-1}$  para C=C y 1,044  $\text{cm}^{-1}$  para C–O–C, por último, O – H a 3,37 y 3,422  $\text{cm}^{-1}$ .

Para la preparación del extracto de la hoja se utilizó una metodología similar a la aplicada en el estudio anterior, donde se recogieron las hojas frescas, se lavaron y se dejaron secar al aire a temperatura ambiente, las hojas se partieron en trozos pequeños y se calentaron en un baño de agua destilada a 90°C durante 25 a 30 minutos. La solución se enfría durante la noche y por último se filtró con papel filtro Whatman. De igual manera se disolvió  $\text{FeCl}_3$  en agua destilada para obtener la solución acuosa de cloruro férrico. El extracto se mezcló en proporciones (1:3,1:4, 1:5,1:6 y 1:7) a temperatura ambiente, se presentó un rápidamente un cambio de color de la solución de cloruro férrico de amarillo a negro lo cual indica la síntesis verde de ZVINP en forma de precipitado negro fino intenso<sup>3</sup>.

Figure 14 Síntesis de GZVINPs con extracto de hoja de *E. officinalis*



Fuente: Artículo- Potential of green synthesized zero-valent iron nanoparticles for remediation of lead-contaminated water <sup>3</sup>

<sup>3</sup> Kumar, R., Singh, N., & Pandey, S. N. (2015). Potential of green synthesized zero-valent iron nanoparticles for remediation of lead-contaminated water. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(12), 3943–3950. <https://doi.org/10.1007/s13762-015-0751-z>

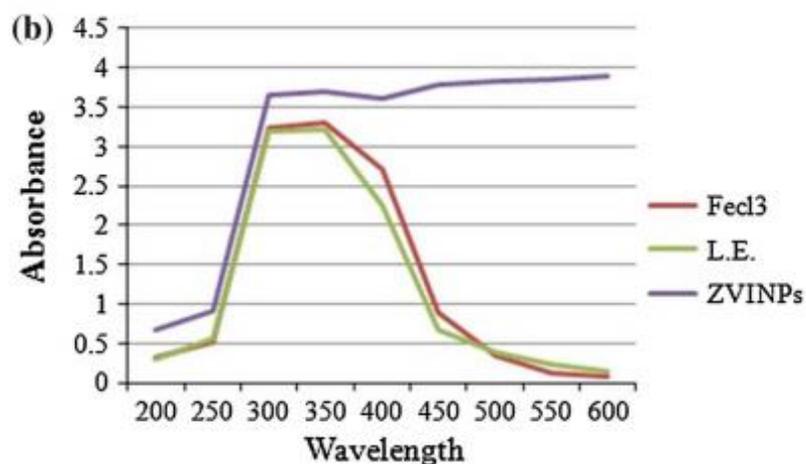
## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

---

Esta investigación arroja un contenido total estimado de polifenoles de 27.7 %, y gracias a este alto contenido de polifenoles se pudo establecer que es una buena opción la utilización de la planta *E. officinalis* como agente reductor.

Esta síntesis realizada de nanopartículas de hierro cerovalente ZVINP se pudo comprobar aún más al medir la absorbancia con un espectrofotómetro UV-VIS en una serie de longitudes de onda que comienzan desde 200 hasta 600 nm. Por otra parte, la absorbancia máxima para el extracto de hoja y la solución acuosa de cloruro férrico  $\text{FeCl}_3$  registró entre 250 y 350 nm<sup>3</sup>.

Figura 15 Espectro UV-Vis del extracto de hoja de *E. officinalis*, solución de  $\text{FeCl}_3$  y GZVINP.



Fuente: Artículo- Potential of green synthesized zero-valent iron nanoparticles for remediation of lead-contaminated water <sup>3</sup>

---

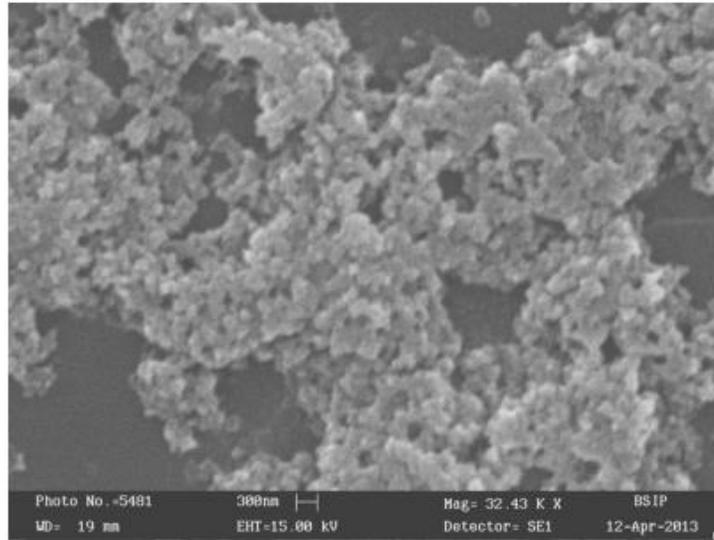
<sup>3</sup> Kumar, R., Singh, N., & Pandey, S. N. (2015). Potential of green synthesized zero-valent iron nanoparticles for remediation of lead-contaminated water. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(12), 3943–3950. <https://doi.org/10.1007/s13762-015-0751-z>

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

---

Con el fin de identificar la estructura de la superficie externa de los GZVINP se realizó un análisis SEM donde se obtuvo una morfología esférica y uniforme.

Figura 16 Imagen SEM de los GZVINP sintetizados con *E. officinalis*.



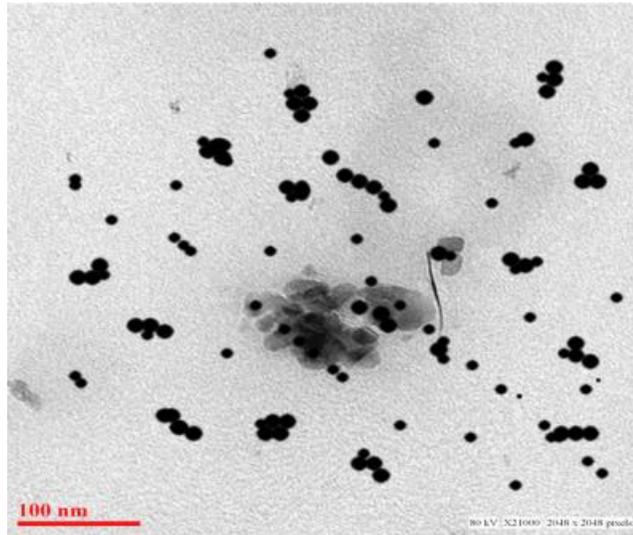
Fuente: Artículo- Potential of green synthesized zero-valent iron nanoparticles for remediation of lead-contaminated water<sup>3</sup>.

También se realizó la imagen TEM de los GZVINP donde se pudo apreciar que la mayoría de las nanopartículas obtenidas presentan una forma esférica y con un tamaño promedio de 22.6 nm.

---

<sup>3</sup> Kumar, R., Singh, N., & Pandey, S. N. (2015). Potential of green synthesized zero-valent iron nanoparticles for remediation of lead-contaminated water. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(12), 3943–3950. <https://doi.org/10.1007/s13762-015-0751-z>

Figure 17 Imagen TEM de los GZVINP sintetizados con *E. officinalis*.



Fuente: Artículo- Potential of green synthesized zero-valent iron nanoparticles for remediation of lead-contaminated water <sup>3</sup>.

Con el estudio realizado se pudo establecer que el extracto de la hoja *E. officinalis* presenta un gran potencial para el proceso de síntesis de ZVINP debido al contenido total de polifenoles y ácido ascórbico. De igual manera se comprobó su eficiencia contra la remediación del plomo y otros metales pesados presentes en el agua, donde para concentraciones bajas de Pb fue requerida una menor concentración de ZVINPs y menor tiempo para su remediación, por esta razón los autores concluyeron que la eficiencia dependía de la concentración de Pb<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> Kumar, R., Singh, N., & Pandey, S. N. (2015). Potential of green synthesized zero-valent iron nanoparticles for remediation of lead-contaminated water. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(12), 3943–3950. <https://doi.org/10.1007/s13762-015-0751-z>

#### **11.4. BIOSYNTHESIS OF IRON AND SILVER NANOPARTICLES AT ROOM TEMPERATURE USING AQUEOUS SORGHUM BRAN EXTRACTS**

Para este artículo se crearon nanopartículas de hierro y plata empleando extractos acuosos de la planta *sorgo*<sup>49</sup>, proveniente de las regiones tropicales y subtropicales de África, esta planta se utilizó como agente reductor y de recubrimiento para este estudio, los iones de plata se redujeron gracias a la implementación del extracto acuoso de *sorgo*, formando de esta manera las nanopartículas de plata son un diámetro de 10 nm y cristalinas. Los espectros de absorción de las nanopartículas de plata coloidal indican un pico y resonancia de plasmó superficial (SPR) con una longitud de onda de 390nm, se conformaron nanopartículas de hierro amorfo con un diámetro medio de 50nm con una temperatura ambiente, estas nanopartículas fueron probadas para la degradación de azul de bromotimol el cual actúa como un contaminante orgánico.

#### **11.5. GREEN SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF ZERO VALENT IRON NANOPARTICLES FROM THE LEAF EXTRACT OF AZADIRACHTA INDICA (NEEM)**

En este estudio se utilizó extracto de la hoja de planta llamada *Azadirachta indica* o también conocida como *neem* para la síntesis verde de nanopartículas de hierro junto con una solución acuosa de cloruro férrico<sup>50</sup>. El resultado de esta síntesis produjo una alta tasa de nanopartículas, lo cual justificó su uso sobre otros métodos y así mismo por ser un método ecológico y seguro.

---

<sup>49</sup>Njagi, E., Huang, H., Stafford, L., Genuino, H., Galindo, H., Collins, J., ... Suib, S. (2011). Biosynthesis of Iron and Silver Nanoparticles at Room Temperature Using Aqueous Sorghum Bran Extracts. *Langmuir: The ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 27, 264–271. <https://doi.org/10.1021/la103190n>

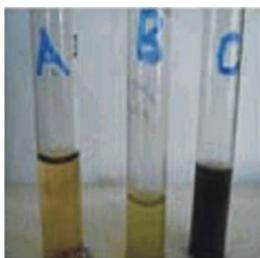
<sup>50</sup> Pattanayak, M., & Nayak, P. L. (2013). Green Synthesis and Characterization of Zero Valent Iron Nanoparticles from the Leaf Extract of *Azadirachta indica* (Neem). *World Journal of Nano Science & Technology*, 2(1), 6–09. <https://doi.org/10.5829/idosi.wjnst.2013.2.1.21132>

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

Para el proceso de la obtención del extracto se empleó una metodología similar a la mencionada anteriormente donde se recolectaron las hojas, se lavaron y se limpiaron con agua triplemente destilada. Posteriormente se parten en trozos pequeños y se suspenden en 10 ml de agua destilada estéril y se calienta de 2-3 minutos a una temperatura que varía entre 70-80°C. El extracto se filtró utilizando filtro Whatman's N.1. También se utilizó 0.001 m de cloruro férrico<sup>50</sup>.

Para el proceso de la síntesis se mezclaron tanto el precursor como el agente reductor en una proporción 1:1, se mezclaron 5 ml del extracto y 5ml de la solución acuosa FeCl<sub>3</sub> realizando una agitación a 50-60°C donde se apreció un cambio de color de verde a negro, como ya se ha apreciado en investigaciones anteriores.

Figura 18 Tubo A- Cloruro férrico, Tubo B- Extracto de hojas de plantas de Neem, Tubo C- Solución sintetizada de nanopartículas.



Fuente: Artículo- Green Synthesis and Characterization of Zero Valent Iron Nanoparticles from the Leaf Extract of Azadirachta indica (Neem)<sup>50</sup>.

Para el análisis del espectro UV-Vis se utilizó un espectrofotómetro Systronics y se obtuvieron picos de absorción entre 216-268 nm, y adicionalmente se observó un cambio de pH de alto ácido a bajo ácido. De igual manera se realizó espectroscopia UV donde las nanopartículas sintetizadas se encontraron en un rango de 216-268 nm<sup>50</sup>.

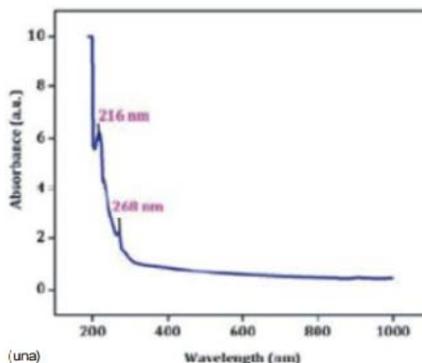
---

<sup>50</sup> Pattanayak, M., & Nayak, P. L. (2013). Green Synthesis and Characterization of Zero Valent Iron Nanoparticles from the Leaf Extract of Azadirachta indica (Neem). *World Journal of Nano Science & Technology*, 2(1), 6-09. <https://doi.org/10.5829/idosi.wjnst.2013.2.1.21132>

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

---

Figura 19 Espectro UV-Vis de nanopartículas de hierro.



Fuente: Artículo- Green Synthesis and Characterization of Zero Valent Iron Nanoparticles from the Leaf Extract of *Azadirachta indica* (Neem)<sup>50</sup>.

Por último, se obtuvieron esferas con un diámetro aproximado de 100 nm los cuales se pueden distinguir entre sí.

Figura 20 Imagen SEM de nanopartículas de hierro.



Fuente: Fuente: Artículo- Green Synthesis and Characterization of Zero Valent Iron Nanoparticles from the Leaf Extract of *Azadirachta indica* (Neem)<sup>50</sup>.

---

<sup>50</sup> Pattanayak, M., & Nayak, P. L. (2013). Green Synthesis and Characterization of Zero Valent Iron Nanoparticles from the Leaf Extract of *Azadirachta indica* (Neem). *World Journal of Nano Science & Technology*, 2(1), 6–09. <https://doi.org/10.5829/idosi.wjnst.2013.2.1.21132>

**11.6. SYNTHESIS OF IRON-BASED NANOPARTICLES USING OOLONG TEA EXTRACT FOR THE DEGRADATION OF MALACHITE GREEN. SPECTROCHIMICA ACTA PART A: MOLECULAR AND BIOMOLECULAR SPECTROSCOPY**

En este artículo se realizó un estudio de síntesis verde a partir de té *Oolong*, en donde se extrajo el extracto de té con una concentración de 60 gramos por cada litro de agua, sometiéndolo a un calor constante de 80°C durante una hora, posteriormente se realizó filtración por vacío. Al obtener el extracto de té *Oolong* el cual tiene como principal propiedad ser un agente antioxidante, se le añade 0.1 mol /L de sulfato de hierro ( $\text{FeSO}_4$ ), dando como resultado nanopartículas FeNPs de forma esférica con diámetros de 40 a 50 nm obtenidos gracias a microscopia electrónica de análisis (SEM) y una difracción de rayos X (XRD) mostrando que FeNPs era de naturaleza cristalina. Estas nanopartículas son empleadas para la degradación de la verde malaquita (MG) el cual es un colorante verde que es utilizado principalmente para tratamientos contra parásitos protozoos en agua dulce. Teniendo como resultado que el extracto de té representado como polifenol y cafeína también sirvió como agente reductor, en donde se observó una eficiencia de eliminación del verde malaquita utilizando FeNPs de un 61.9% en un tiempo de 10 minutos y posteriormente alcanzo su equilibrio a los 60 minutos con un porcentaje de 75.5%.<sup>46</sup>

---

<sup>46</sup> Fahmy, H. M., Mohamed, F. M., Marzouq, M. H., Mustafa, A. B. E. D., Alsoudi, A. M., Ali, O. A., ... Mahmoud, F. A. (2018). Review of Green Methods of Iron Nanoparticles Synthesis and Applications. *BioNanoScience*, 8(2), 491–503. <https://doi.org/10.1007/s12668-018-0516-5>

Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

Tabla 2 Características y resultados de extractos de plantas utilizados en procesos de síntesis verde.

Especie vegetal	Morfología	Tamaño partícula (nm)	Aplicación de estudio
<i>Mion-tea</i>	Cristales en forma de pirámide	5-25	Eliminación de arsénico As (III) y As (V)
<i>E. officinalis</i>	Esférica y uniforme	22,6	Eliminación de plomo Pb en cuerpos de agua
<i>Planta Sorgo</i>	Cristalina	50	Degradación de azul de bromotimol
<i>Oolong tea</i>	Cristalina	40-50	Degradación del verde malaquita (MG)
<i>Amaranthus spinosus</i>	Cristalina en forma esférica y triangular	10.74	síntesis de AuNPs

Fuente: Propia

En la tabla 2 se muestra la recopilación de cada uno de los resultados de los artículos investigados sobre utilización de plantas o especies vegetales en procesos de síntesis verde, en donde la especie vegetal de oolong tea tiene como principal función actuar como agente antioxidante en el proceso de síntesis de nanopartículas obteniendo un diámetro de partícula entre 40 y 50 nm. De igual manera se determinó que la utilización de la especie de planta *E. officinalis* como agente reductor es buena debido a su alto contenido de polifenoles ya que presenta un contenido total estimado de 27.7%, generando partículas de 22.6 nm. En otro de los estudios investigados se utilizó el extracto acuoso de la planta de sorgo la cual fue empleada como un agente reductor y así mismo de recubrimiento para la partícula generada, en la cual se generó un diámetro de partícula de 50 nm. También se estudió la utilización de la especie vegetal *amaranthus spinosus* en los procesos de síntesis verde debido a que el extracto de esta especie presenta algunos compuestos como fenoles y flavonoides que favorecen este proceso y obteniendo un diámetro de partícula de 10.74 nm.

---

### 11.7. OPTIMIZATION OF MICROWAVE-SOLVOTHERMAL SYNTHESIS OF $\text{Fe}_3\text{O}_4$ NANOPARTICLES. COATING, MODIFICATION, AND CHARACTERIZATION

Para el desarrollo de la síntesis en este artículo se emplearon dos diseños experimentales, uno de ellos es un diseño factorial  $2^2$  para evaluar los efectos de los tiempos de reacción (gradiente y retención); y el otro corresponde a un diseño Box-Behnken (BBD) el cual se realizó para optimizar el proceso de síntesis<sup>51</sup>.

Para el diseño factorial PlackettBurman, se debe diferenciar el tiempo de gradiente y el tiempo de mantenimiento, donde el tiempo de gradiente corresponde al tiempo que se requiere para llevar la temperatura del salón o la temperatura ambiente hasta la temperatura de la reacción y esta denotado por la sigla ( $T_{\text{sol}}$ ), el tiempo mantenimiento hace referencia al tiempo en el que la temperatura de la reacción se mantiene constante, donde cada uno de estos tiempos fueron evaluados a los 3 y 7 min, como se muestra en la tabla 4. Donde el factor a representa la cantidad de acetato de amonio, el factor b representa la temperatura de la reacción, y la columna yield representa el porcentaje del rendimiento<sup>51</sup>.

---

<sup>51</sup> Hernández-Hernández, A. A., Álvarez-Romero, G. A., Castañeda-Ovando, A., Mendoza-Tolentino, Y., Contreras-López, E., Galán-Vidal, C. A., & Páez-Hernández, M. E. (2018). Optimization of microwave-solvothermal synthesis of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles. Coating, modification, and characterization. *Materials Chemistry and Physics*, 205, 113–119. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.11.009>

Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

Tabla 3 Matriz de diseño experimental para el diseño factorial de Plackett-Burman.

Experiment	Factors		Yield, %
	A	B	
1	3	7	72.01
2	3	3	72.44
3	1	7	74.58
4	1	7	56.44
5	1	3	90.26
6	3	3	93.05
7	1	3	81.39
8	3	7	82.87

Fuente: Artículo- Optimization of microwave-solvothermal synthesis of fe3o4 nanoparticles. coating, modification, and characterization<sup>51</sup>.

Para la optimización de la síntesis, los factores de control utilizados fueron Cantidad de acetato de amonio (Factor A, inhibidor de la aglomeración); temperatura de reacción (Factor B, favorece la cinética de reacción); y T h (Factor C) como se muestra en la tabla 6.

Tabla 4 Niveles de los factores de control para el diseño de Box-Behnken.

Control factors	Description	Chosen levels		
		-1	0	1
Factor A	Amount of CH <sub>3</sub> COONH <sub>4</sub> , mmol	3.90	5.20	6.50
Factor B	Temperature, °C	255	265	275
Factor C	th, min	5	7.5	10

Fuente: Artículo- Optimization of microwave-solvothermal synthesis of fe3o4 nanoparticles. coating, modification, and characterization<sup>51</sup>.

<sup>51</sup> Hernández-Hernández, A. A., Álvarez-Romero, G. A., Castañeda-Ovando, A., Mendoza-Tolentino, Y., Contreras-López, E., Galán-Vidal, C. A., & Páez-Hernández, M. E. (2018). Optimization of microwave-solvothermal synthesis of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles. Coating, modification, and characterization. *Materials Chemistry and Physics*, 205, 113–119. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.11.009>

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

Para la metodología de cada experimento se utilizó  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (2mmol), citrato trisódico (1,55 mmol), Acetato de amonio (5 mmol) y etilenglicol(6ml); los cuales se mezclaron en un vial de reacción de 30 ml y se colocaron en el equipo de microondas, donde una vez alcanzado el tiempo de reacción, se separa el sólido obtenido con un imán de neodimio (30000 Gauss), se lavó con etanol (70% v / v), se secó a  $60^\circ\text{C}$ <sup>51</sup>.

Tabla 5 Matriz de diseño experimental para el diseño Box-Behnken.

Experiment	Factors			Particle size, nm
	A	B	C	
1	3.9	255	7.5	11.46
2	6.5	255	7.5	31.64
3	3.9	275	7.5	10.90
4	6.5	275	7.5	22.79
5	3.9	265	5	10.71
6	6.5	265	5	12.96
7	3.9	265	10	13.23
8	6.5	265	10	15.89
9	5.2	255	5	12.33
10	5.2	275	5	10.17
11	5.2	255	10	11.21
12	5.2	275	10	11.59
13	5.2	265	7.5	12.94
14	5.2	265	7.5	13.43
15	5.2	265	7.5	10.70

Fuente: Artículo- Optimization of microwave-solvothermal synthesis of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles. coating, modification, and characterization <sup>51</sup>.

En la tabla 4 se muestran los resultados del diseño Plackett-Burman donde el factor de respuesta fue el porcentaje del rendimiento, el factor B tiene un efecto positivo en el rendimiento de la reacción, por esa razón fue terminado a los 7 minutos para la síntesis de microondas. Cuando la temperatura se incrementó en un tiempo de gradiente más largo ( $t_{\text{sol}}$ ), se obtuvo un mayor porcentaje de rendimiento; Esto puede asociarse con una mejor distribución de la temperatura en el sistema, mejorando la síntesis de magnetita<sup>51</sup>.

---

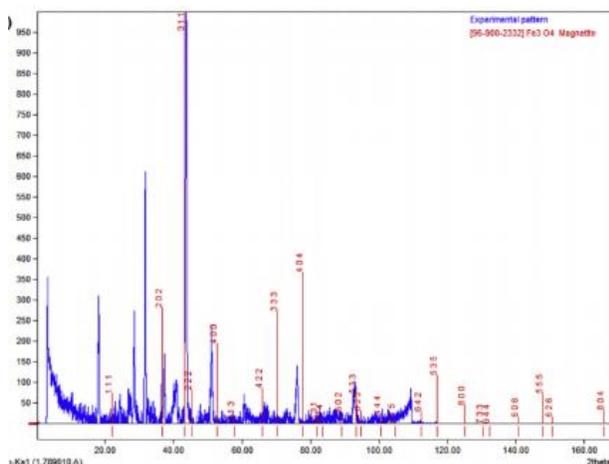
<sup>51</sup> Hernández-Hernández, A. A., Álvarez-Romero, G. A., Castañeda-Ovando, A., Mendoza-Tolentino, Y., Contreras-López, E., Galán-Vidal, C. A., & Páez-Hernández, M. E. (2018). Optimization of microwave-solvothermal synthesis of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles. Coating, modification, and characterization. *Materials Chemistry and Physics*, 205, 113–119. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.11.009>

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

Para la optimización del proceso de síntesis, los procesos de recubrimiento y modificación se cambiaron con el fin de reducir el tiempo de síntesis. Se utilizó microondas y sonicación para reducir dichos tiempos y así mismo mejorar la eficiencia de proceso. De igual manera se utilizó DMF como solvente en el proceso de la modificación.

Se utilizó la XRD para establecer e identificar la estructura cristalina de las nanopartículas generadas como se muestra en la figura 21. Por otra parte, los tamaños de partícula fueron establecidos mediante la ecuación de Debye-Scherrer y se usaron como factor de respuesta para el BBD de la tabla 6<sup>51</sup>.

Figura 21 XRD pattern.



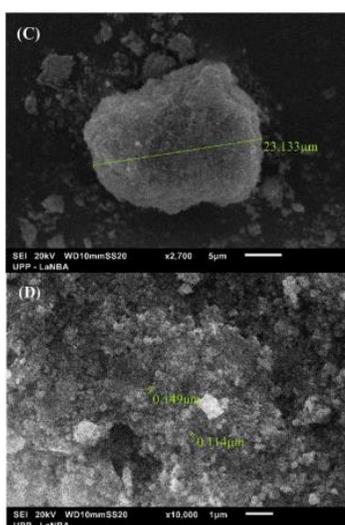
Fuente: Artículo- Optimization of microwave-solvothermal synthesis of fe3o4 nanoparticles. coating, modification, and characterization <sup>51</sup>.

<sup>51</sup> Hernández-Hernández, A. A., Álvarez-Romero, G. A., Castañeda-Ovando, A., Mendoza-Tolentino, Y., Contreras-López, E., Galán-Vidal, C. A., & Páez-Hernández, M. E. (2018). Optimization of microwave-solvothermal synthesis of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles. Coating, modification, and characterization. *Materials Chemistry and Physics*, 205, 113–119. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.11.009>

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

Al realizar la micrografía SEM (figura 22) se pudo observar aglomerados con un tamaño de partícula de 25 nm, lo cual puede ser asociado a una alta saturación magnética. De igual manera se pudo apreciar una distribución homogénea con un tamaño de partícula aparente entre 114 y 149 nm, además de esto se pudo establecer que el nanomaterial magnético posee forma cubica<sup>51</sup>.

Figura 22 C) Micrografías SEM a 2700x, D) Micrografías SEM a 10000x para Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-TMSPT-ATM.



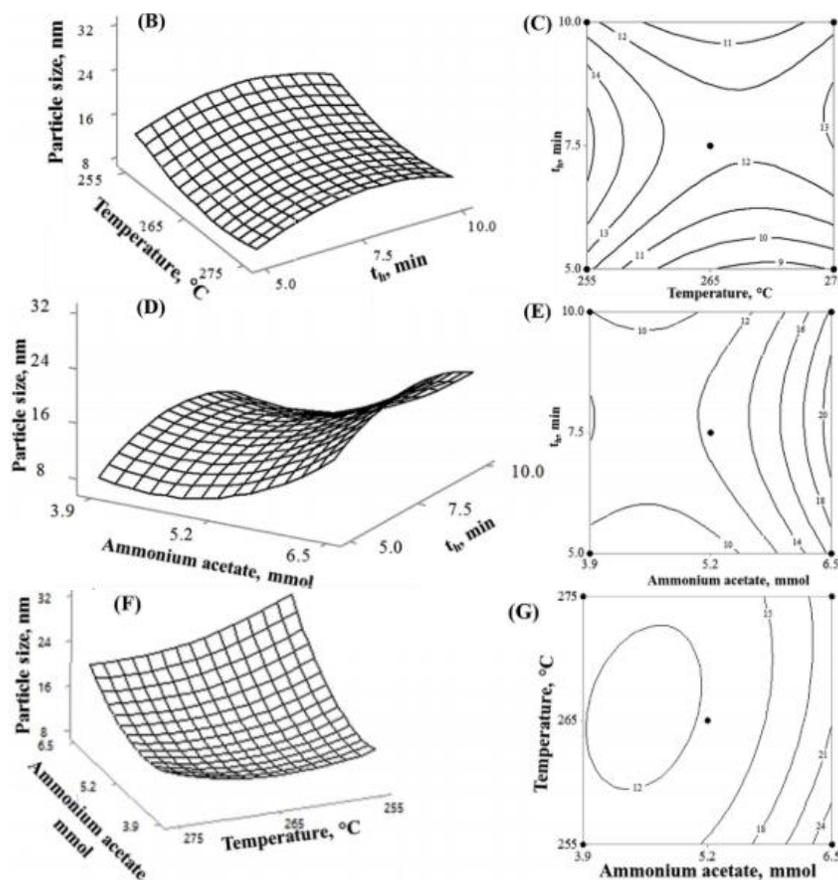
Fuente: Artículo- Optimization of microwave-solvothermal synthesis of fe<sub>3</sub>o<sub>4</sub> nanoparticles. coating, modification, and characterization <sup>51</sup>.

---

<sup>51</sup> Hernández-Hernández, A. A., Álvarez-Romero, G. A., Castañeda-Ovando, A., Mendoza-Tolentino, Y., Contreras-López, E., Galán-Vidal, C. A., & Páez-Hernández, M. E. (2018). Optimization of microwave-solvothermal synthesis of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles. Coating, modification, and characterization. *Materials Chemistry and Physics*, 205, 113–119. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.11.009>

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

Figure 23 B).temperatura de reacción vs superficie de respuesta. C) gráfico de contorno. D). Cantidad de acetato de amonio vs superficie de respuesta. E) grafico de contorno. F). Cantidad de acetato de amonio Vs temperatura de reacción.



Fuente: Artículo- Optimization of microwave-solvothermal synthesis of fe3o4 nanoparticles. coating, modification, and characterization <sup>51</sup>.

<sup>51</sup> Hernández-Hernández, A. A., Álvarez-Romero, G. A., Castañeda-Ovando, A., Mendoza-Tolentino, Y., Contreras-López, E., Galán-Vidal, C. A., & Páez-Hernández, M. E. (2018). Optimization of microwave-solvothermal synthesis of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles. Coating, modification, and characterization. *Materials Chemistry and Physics*, 205, 113–119. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.11.009>

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

---

La temperatura es el factor más importante en la síntesis de solvotermia, ya que este parámetro controla la nucleación y ayuda a la formación de una estructura específica. De acuerdo a las gráficas obtenidas en la figura 23, se pueden hacer diferentes apreciaciones, por ejemplo, se puede evidenciar que en la F y G los tamaños de nanopartículas más pequeños se obtuvieron a una temperatura de 265°C, sin tener en cuenta la concentración de acetato. De igual manera en la B y C se puede evidenciar que a 255°C y a 7.5 minutos, se obtiene el mayor tamaño de nanopartículas<sup>51</sup>.

Como resultado de esta investigación se establecieron unas condiciones óptimas para llevar a cabo el proceso de síntesis, las cuales fueron una temperatura T de 255°C,  $T_{sol} \frac{1}{4}$  7 min,  $T_{h} \frac{1}{4}$  10 min, 4,55 mmol de acetato de amonio, 2 mmol de Hexa hidrató de cloruro 10 min, 2 mmol de Hexa hidrató de cloruro férrico, 1,55 mmol de citrato de sodio y 6 ml de etilenglicol. Bajo cada una de estas condiciones se obtuvo un tamaño de nanopartícula de 31.60 nm<sup>51</sup>.

Para esta síntesis los factores más importantes fueron la temperatura y tiempos de reacción (gradiente y retención). Uno de los aspectos a destacar dentro del proceso de síntesis realizado es que el revestimiento y la modificación fueron realizados en su totalidad en 30 minutos, a comparación de algunos otros métodos donde se requieren tiempos de 24 horas.

---

<sup>51</sup> Hernández-Hernández, A. A., Álvarez-Romero, G. A., Castañeda-Ovando, A., Mendoza-Tolentino, Y., Contreras-López, E., Galán-Vidal, C. A., & Páez-Hernández, M. E. (2018). Optimization of microwave-solvothermal synthesis of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles. Coating, modification, and characterization. *Materials Chemistry and Physics*, 205, 113–119. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.11.009>

---

### 11.8. GREENER SYNTHESIS OF MAGNETITE NANOPARTICLES USING GREEN TEA EXTRACT AND THEIR MAGNETIC PROPERTIES

Las nanopartículas magnéticas en los métodos convencionales utilizan diferentes agentes reductores como la hidrazina, dimetilformamida, borohidruro de sodio, monóxido de carbono entre otros, los cuales son agentes reductores y productos químicos reactivos que tienen efectos contrarios en el medio ambiente. Por lo tanto, se emplea un método respetuoso con el medio ambiente como es el caso de esta investigación la cual a través del método de reducción biogénica se empleando extracto de té verde para la síntesis verde de nanopartículas<sup>52</sup>.

La metodología a desarrollar en esta investigación se dividió en cuatro pasos los cuales fueron los materiales, la preparación del extracto de té verde, síntesis de nanopartículas magnéticas y caracterizaciones.

Los materiales adquiridos fueron Nitrato férrico  $Fe(NO_3)_3$ , etilenglicol ( $CH_2(OH).CH_2OH$ ) y las bolsas de té verde. Para la preparación del extracto de té verde, se tomó una bolsa de té estándar se sumergió en 100 ml de agua doblemente destilada, hirviendo durante media hora y se filtró dos veces con papel de filtro obteniendo un extracto sin partículas, posteriormente se refrigeró a 4°C. En la síntesis de nanopartículas se preparó una solución de 0.1 M de nitrato férrico y el extracto de té verde, se mezclaron en una relación 1:2 tornando un color negro verdoso agitándose durante un periodo de 30 minutos, luego de este proceso se mantuvo en el horno a 180°C, 200°C Y 220°C por dos horas, acabado este proceso se dejó enfriar a temperatura ambiente con el fin de eliminar el contenido orgánico presente en la superficie y neutralizar el pH de las nanopartículas, los productos se lavaron con etanol y finalmente, las nanopartículas se secaron al vacío a temperatura ambiente<sup>52</sup>.

Para esta investigación el té verde juega un papel muy importante, debido a que la cantidad que se emplee es fundamental para la estructura y el tamaño final que se obtuvo en las nanopartículas, como se observa en la figura 24<sup>52</sup>, la cual nos

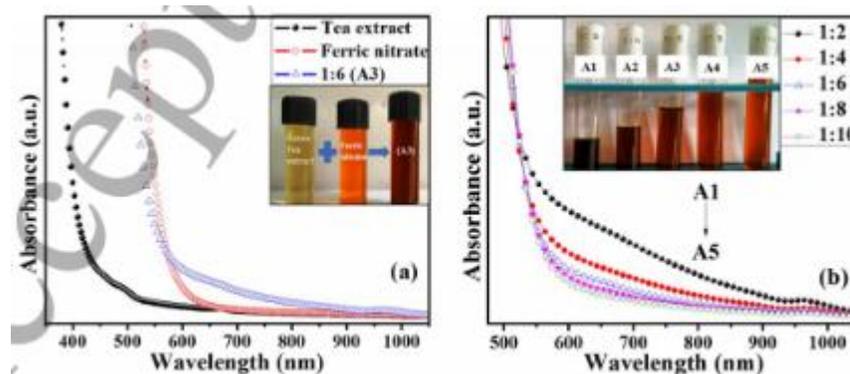
---

<sup>52</sup> Physics, O. (2018). Greener synthesis of magnetite nanoparticles using green tea extract and their magnetic properties. *On Certain Distance and Degree Based Topological Indices of Zeolite LTA Frameworks*, (December 2016), 11–14.

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

muestran la absorbancia en función de la longitud de onda para las relaciones de preparación de nitrato de hierro (III) y el extracto de té verde. En la gráfica de la relación 1:6 se evidencia una absorción por debajo de 500nm y 600nm para el extracto de té y la solución de nitrato férrico, para la mezcla de estas dos sustancias se presenta una absorción mayor. Posteriormente se observa la gráfica con todas las relación de adición para la preparación de NZVI ( $FeO$ ) NP, la cual muestra que al disminuir la cantidad de extracto de té verde de la A5 a A1, se intensifica la formación de color negro verdoso y así mismo muestra una absorción creciente. Para la muestra A1, se evidencia la máxima absorción, indicando la formación de NZVI ( $FeO$ ) NPs.

Figura 24 Absorbancia en función de la longitud de onda.



Fuente: Artículo- Greener synthesis of magnetite nanoparticles using green tea extract and their magnetic properties <sup>52</sup>.

Para alcanzar la condición óptima para nano escala de hierro de valencia cero (NZVI ( $FeO$ )) Se mezcló el nitrato férrico y extracto de té verde en diferentes proporciones para la formación de nanopartículas como se muestra en la siguiente tabla.

<sup>52</sup> Physics, O. (2018). Greener synthesis of magnetite nanoparticles using green tea extract and their magnetic properties. *On Certain Distance and Degree Based Topological Indices of Zeolite LTA Frameworks*, (December 2016), 11–14.

Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

---

Figura 25 Absorbancia en función de la longitud de onda.

Sample code	Ratio	Description
A1	1:2	1 ml Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ; 2 ml tea extract
A2	1:4	1 ml Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ; 4 ml tea extract
A3	1:6	1 ml Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ; 6 ml tea extract
A4	1:8	1 ml Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ; 8 ml tea extract
A5	1:10	1 ml Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ; 10 ml tea extract

Fuente: Artículo- Greener synthesis of magnetite nanoparticles using green tea extract and their magnetic properties <sup>52</sup>.

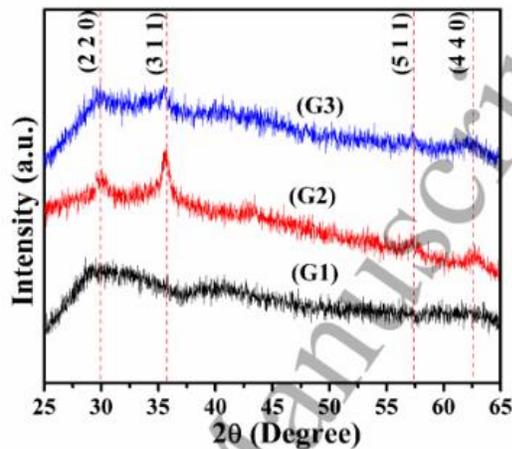
En la difracción de rayos X de magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), se estudio el efecto de la temperatura durante el proceso de la síntesis de las nanopartículas llevando las reacciones a 180°C, 200°C Y 220°C durante dos horas. Se utiliza el solvente EG para el proceso solvotermal. La nanopartícula preparada a 180°C (G1) es de naturaleza amorfa y no muestra ningún pico cristalino, por lo tanto las nanopartículas no se han transformado en fase de óxido de hierro. En la muestra de 200°C (G2) se observa el crecimiento del cristal con fase de magnetita pura y por ultimo la muestra 220°C (G3) disminuye la cristalinidad en comparación de 200°C (G2) esto puede presentarse debido a la descomposición de la materia orgánica en extracto de té verde. Encontrando el tamaño promedio de cristalito para las muestras G2 y G3 entre 7 nm y 13 nm respectivamente<sup>52</sup>.

---

<sup>52</sup> Physics, O. (2018). Greener synthesis of magnetite nanoparticles using green tea extract and their magnetic properties. *On Certain Distance and Degree Based Topological Indices of Zeolite LTA Frameworks*, (December 2016), 11–14.

Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

Figura 26 Patrones de difracción de rayos X de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) para muestras G1, G2 y G3 sintetizadas con diferentes temperaturas de reacción a 180, 200 C y 220 C por 2 hrs.



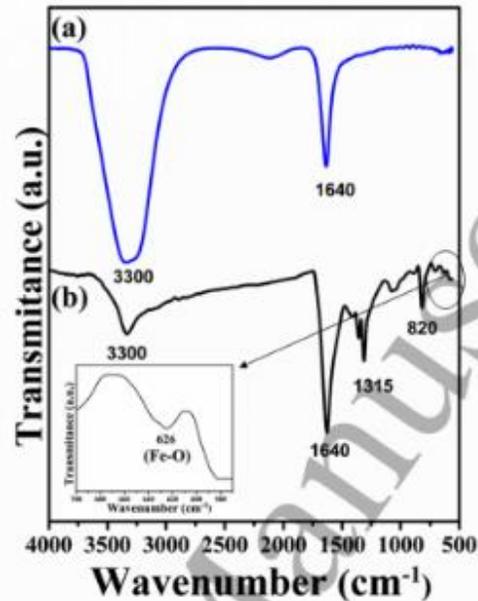
Fuente: Artículo- Greener synthesis of magnetite nanoparticles using green tea extract and their magnetic properties <sup>52</sup>.

En la muestra G2 y el extracto de té verde se analizó los espectros FT-IR mediante espectroscopia FT-IR como se muestra en la figura 27, en donde (a) muestra picos fuertes alrededor de  $1640\text{ cm}^{-1}$  y  $3300\text{ cm}^{-1}$  correspondientes a las vibraciones de estiramiento alqueno y grupos hidroxilo fenólicos, indicando el enlace de hidrógeno entre los polifenoles del té. En (b) se evidencia los espectros reducidos de forma verde, confirmando la formación de óxido de hierro en las nanopartículas. La vibración de estiramiento similar alrededor de  $626\text{ cm}^{-1}$  correspondiente al enlace Fe-O. El pico de absorción observado alrededor de  $820\text{ cm}^{-1}$  y  $1315\text{ cm}^{-1}$  se atribuyen a los modos de estiramiento C-O-C y C-OH aromático respectivamente. Las vibraciones de estiramiento a  $1640\text{ cm}^{-1}$  y  $3300\text{ cm}^{-1}$  <sup>52</sup>.

<sup>52</sup> Physics, O. (2018). Greener synthesis of magnetite nanoparticles using green tea extract and their magnetic properties. *On Certain Distance and Degree Based Topological Indices of Zeolite LTA Frameworks*, (December 2016), 11–14.

Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

Figura 27 Espectros FT-IR para (a) extracto de té verde y (b) sintetizado verde para la muestra G2, el recuadro muestra el estiramiento del enlace Fe-O.



Fuente: Artículo- Greener synthesis of magnetite nanoparticles using green tea extract and their magnetic properties <sup>52</sup>.

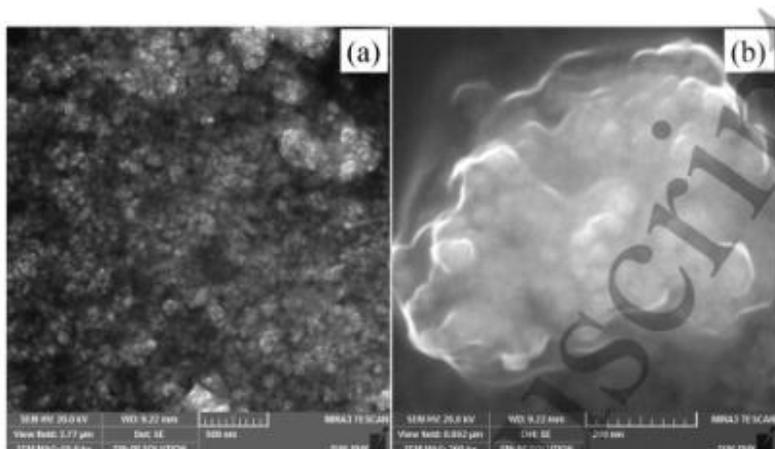
En la siguiente figura se evidencia que la nanopartícula de la muestra G2 presenta una morfología esférica. La vista ampliada (b) para la muestra G2 muestra que las nanopartículas esféricas tienen un tamaño de 25 a 30 nm.

---

<sup>52</sup> Physics, O. (2018). Greener synthesis of magnetite nanoparticles using green tea extract and their magnetic properties. *On Certain Distance and Degree Based Topological Indices of Zeolite LTA Frameworks*, (December 2016), 11–14.

Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

Figura 28 Micrografías FE-SEM de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanopartículas para (a) muestra G2 (b) micrografía ampliada de la muestra G2.



Fuente: Artículo- Greener synthesis of magnetite nanoparticles using green tea extract and their magnetic properties <sup>52</sup>.

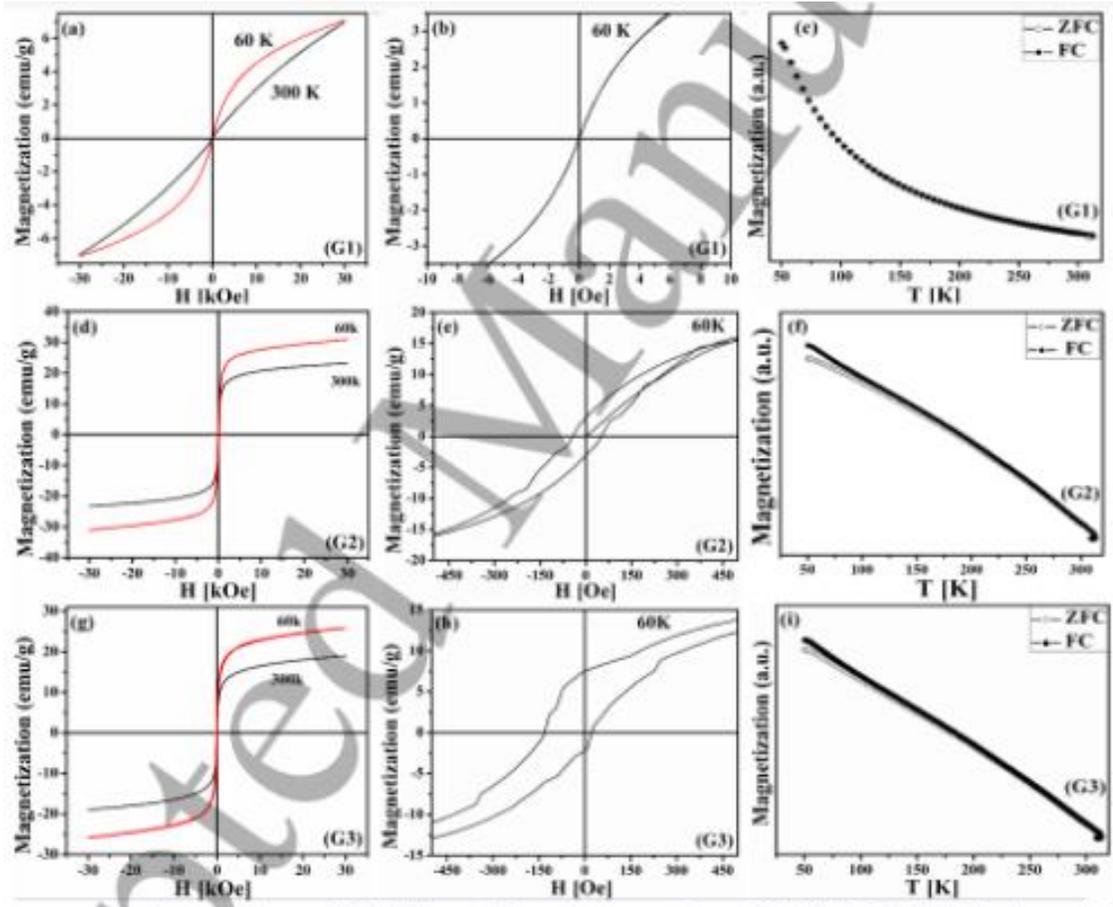
Para la figura 29 se muestran las curvas a, d y g de magnetización a temperatura ambiente 300 K, en donde las tres muestras no se presenta saturación, indicando que son superparamagnéticas y los *bucles de histéresis* mostrados en las gráficas b, e y h; a baja temperatura 60 K tampoco mostro saturación. *La muestra G1 tiene cero coercitividad a 60 K. La muestra G2 y G3 exhiben histéresis que indica la presencia de partículas ferromagnéticas junto con partículas superparamágicas*<sup>52</sup>.

---

<sup>52</sup> Physics, O. (2018). Greener synthesis of magnetite nanoparticles using green tea extract and their magnetic properties. *On Certain Distance and Degree Based Topological Indices of Zeolite LTA Frameworks*, (December 2016), 11–14.

Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

Figura 29 Muestra la temperatura ambiente (300 K) y baja temperatura (60 K) M Vs H bucles de histéresis para la muestra G1, G2 y G3.



Fuente: Artículo- Greener synthesis of magnetite nanoparticles using green tea extract and their magnetic properties <sup>52</sup>.

<sup>52</sup> Physics, O. (2018). Greener synthesis of magnetite nanoparticles using green tea extract and their magnetic properties. *On Certain Distance and Degree Based Topological Indices of Zeolite LTA Frameworks*, (December 2016), 11–14.

Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

Los resultados obtenidos del estudio magnético para todas las muestras se recopilaron en la tabla 6. En donde la muestra G1 tuvo una magnetización de saturación baja con respecto a G2 y G3 y cero coercitividad a 60 K y 300 K. La muestra G2 tiene una mejor magnetización de saturación (25 emu/g) que la muestra G3 que tuvo (19 emu/g) a 300 K. Las mediciones de magnetización a baja temperatura 60 K para las muestras G2 y G3 mostraron valores mayores que los medidos a 300 K<sup>52</sup>.

Tabla 6 Datos comparativos de magnetización para la muestra G1, G2 y G3.

Sample Code	Reaction temperature (°C)	Particle size (nm)	Saturation magnetization (Ms) (emu/g)		Coercivity (Hc) (Oe)		Irreversible temperature (T <sub>ir</sub> ) K
			XRD	300 K	60 K	300 K	
G1	180	Amorphous	7	7	0	0	-
G2	200	7	25	30	0	46	90
G3	220	13	19	26	0	77	70

Fuente: Artículo- Greener synthesis of magnetite nanoparticles using green tea extract and their magnetic properties <sup>52</sup>.

Las nanopartículas magnéticas de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (magnetita) óptimas en esta investigación presentaron un tamaño de partícula de 25 a 30 nm. Para la muestra G2 preparada a 200°C en la reacción solvotérmica tiene una magnetización de saturación de 25emu / g a temperatura ambiente. Los resultados de XRD y FE-SEM revelaron que el Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Las nanopartículas presentan una fase de magnetita pura y una morfología esférica. También muestra una naturaleza superparamagnética.

<sup>52</sup> Physics, O. (2018). Greener synthesis of magnetite nanoparticles using green tea extract and their magnetic properties. *On Certain Distance and Degree Based Topological Indices of Zeolite LTA Frameworks*, (December 2016), 11–14.

---

### 11.9. GREEN SYNTHESIS AND SURFACE PROPERTIES OF $\text{Fe}_3\text{O}_4$ WITH SA CORE-SHELL NANOCOMPOSITES

En este artículo se implementó l-cisteína como agente reductor y dispersor para preparar nanopartículas de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ <sup>53</sup>, donde posteriormente se modificaron las nanopartículas con ácido esteárico (SA) con el fin de formar nanocompuestos núcleo-caparazón de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

El enfoque de esta investigación es ecológico para preparar nanopartículas magnéticas de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , las cuales se sintetizaron mediante coprecipitación mejorada donde se agregaron 10 ml de solución de  $\text{FeCl}_3$  (0.1 mol / L) dentro de un recipiente de precipitado de 100 ml bajo agitación mecánica vigorosa a 60°C, 70°C, 80°C, 90°C. Posteriormente la solución acuosa de l-Cys (0.1 mol / L) fue incorporada gota a gota al recipiente de precipitado y el valor de pH fue ajustado a 10. Por último, los productos mezclados fueron separados magnéticamente y lavados con agua desionizada y etanol varias veces donde posteriormente se secaron a 40°C durante 2 horas<sup>53</sup>.

Con el fin de establecer y comprender la influencia de las condiciones de la reacción en el magnetismo de los productos, se realizaron una serie de concentraciones de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /l-Cys, las cuales variaron entre 1:1.8, 1:2, 1:2.14 hasta 1:2.25 a una temperatura de 80°C.

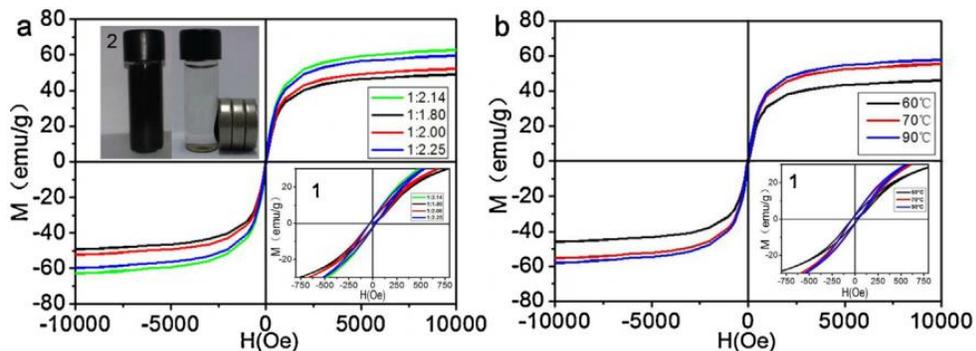
Para la modificación, la solución de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  se dispersó en 50 ml de etanol donde posteriormente se añadió SA con agitación durante 30 minutos a una temperatura ambiente. Después de tratamiento ultrasónico durante 30 min. Los productos fueron lavados con Etanol durante dos veces, y se seca al vacío a 60 ° C durante 24 h.

---

<sup>53</sup> Cao, H., Li, J., Shen, Y., Li, S., Huang, F., & Xie, A. (2014). Green synthesis and surface properties of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  @SA core-shell nanocomposites. *Applied Surface Science*, 301, 244–249. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.02.054>

Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

Figura 30 Magnetización a temperatura ambiente de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> MNP con relación molar de Fe<sup>3+</sup>/ L-Cys a 1:1.80, 1:2.00, 1:2.14, 1:2.25 (a) y a una temperatura de reacción de 60° C, 70 ° C, 90 ° C.



Fuente: Artículo- Green synthesis and surface properties of fe<sub>3</sub>o<sub>4</sub> with sa core–shell nanocomposites <sup>53</sup>.

Tabla 7 Influencia de n (Fe<sup>3+</sup>) / n (L-Cys) en el rendimiento de los productos.

n(Fe <sup>3+</sup> ):n(L-Cys)	Color	Saturation magnetization (emu/g)
1:1.80	Red brown	51.99
1:2.00	Gray black	55.42
1:2.14	Black	66.66
1:2.25	Gray black	60.45

T = 80 °C, pH = 10.

Fuente: Artículo- Green synthesis and surface properties of fe<sub>3</sub>o<sub>4</sub> with sa core–shell nanocomposites <sup>53</sup>.

Para analizar las propiedades magnéticas que presentaron las nanopartículas de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> se utilizó magnetómetro SQUID a temperatura ambiente (300K).

<sup>53</sup> Cao, H., Li, J., Shen, Y., Li, S., Huang, F., & Xie, A. (2014). Green synthesis and surface properties of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@SA core-shell nanocomposites. *Applied Surface Science*, 301, 244–249. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.02.054>

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

Como se evidencio en la tabla 7 y en la figura 30a, tanto el color como le magnetismo de las muestras cambiaron con la relación molar de  $\text{Fe}_3 + / \text{I-Cys}$  a  $80\text{ }^\circ\text{C}$  y un  $\text{pH} = 10$ . Por otra parte, las muestras presentaron un color gris y negro y una fuerte magnetización de saturación (Ms) con las relaciones molares de  $\text{Fe}_3 + / \text{I-Cys}$  de 1: 1.80 (51.99 emu/g), 1:2.00 (55,42 emu/g) y 1: 2,25 (60,45 emu/g). Sin embargo, la saturación de magnetización más fuerte se presentó con las relaciones molares de 1: 2.14 (66.66 emu / g) y mostro un cambio de color a negro. Por otra parte, se pusieron a prueba las nanopartículas obtenidas colocando imanes cerca del recipiente de vidrio, donde trascurridos 30 segundos, las partículas son atraídas hacia los imanes<sup>53</sup>.

La temperatura presenta una influencia considerable en la formación de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  MNP, como se muestra en la tabla 8 donde se muestra la relación molar ( $\text{Fe}_3 + \text{a I-Cys}$ ) de 1: 2.14 a  $\text{pH} = 10$ , de igual manera se puede evidenciar que la saturación magnética más fuerte se presenta en  $90\text{ }^\circ\text{C}$  (figura 31 a), lo que indica que la temperatura optima de reacción es de  $90\text{ }^\circ\text{C}$ .

Tabla 8 Influencia de la temperatura de reacción en las propiedades de las nanopartículas de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

Temperature ( $^\circ\text{C}$ )	Color	Saturation magnetization (emu/g)
60	Gray black	45.32
70	Gray black	58.65
90	Gray black	61.32

Fuente: Artículo- Green synthesis and surface properties of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  with sa core-shell nanocomposites <sup>53</sup>.

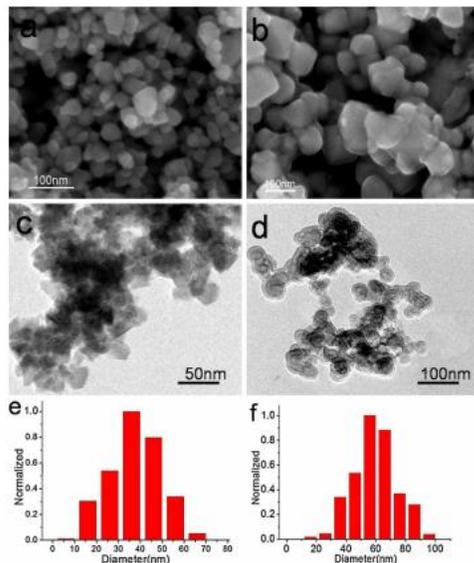
---

<sup>53</sup> Cao, H., Li, J., Shen, Y., Li, S., Huang, F., & Xie, A. (2014). Green synthesis and surface properties of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  @SA core-shell nanocomposites. *Applied Surface Science*, 301, 244–249. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.02.054>

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

Como se mencionó anteriormente, en este trabajo se prepararon las nanopartículas de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  y posteriormente se modificaron adicionando SA, por esta razón se estudia la morfología de cada una de estas partículas, tanto las creadas como las modificadas mediante imágenes SEM, donde se evidenciaron algunos cambios en dicha morfología (figura 31 a y b). Lo cual indica que la modificación de las MNP  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  por SA fue exitosa. De igual manera la imagen TEM que se muestran en la figura 31 c y d muestran una estructura que consiste en un caparazón de SA cuyo tamaño es aproximadamente 49 nm El espesor de la carcasa de SA es de 11 nm<sup>53</sup>.

Figura 31 Imágenes SEM y TEM de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (a y c) y  $\text{Fe}_3\text{O}_4 @ \text{SA}$  MNCs (byd); histogramas que muestran la distribución del diámetro de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (e) y  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  con SA (f) con un diámetro de modo de  $38 \pm 5$  y  $49 \pm 5$  nm.



Fuente: Artículo- Green synthesis and surface properties of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  with sa core-shell nanocomposites <sup>53</sup>.

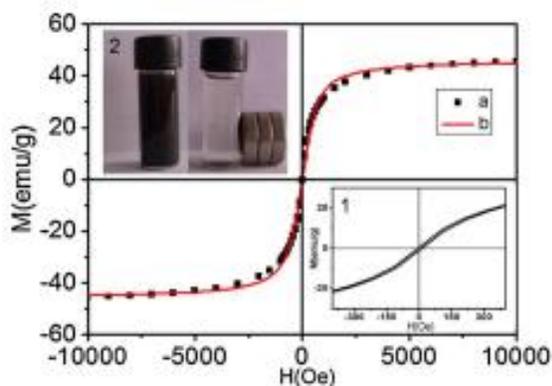
<sup>53</sup> Cao, H., Li, J., Shen, Y., Li, S., Huang, F., & Xie, A. (2014). Green synthesis and surface properties of  $\text{Fe}_3\text{O}_4 @ \text{SA}$  core-shell nanocomposites. *Applied Surface Science*, 301, 244–249. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.02.054>

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

La magnetización  $M_s$  para las nanopartículas de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  con SA presento una reducción a (44.74 emu / g) en comparación con las MNP de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (66,66 emu / g), lo cual se presentó debido a que la masa de los nanocompuestos introducidos por SA aumento<sup>53</sup>.

Al utilizar la función Langevin para calcular la magnetización  $M_s$ , de acuerdo a las variables presentes en dicha ecuación, se pudo establecer y calcular un diámetro de partícula  $D_M$  de aproximadamente 53 nm, lo cual representa un resultado excelente con base en la morfología realizada mediante imágenes SEM y TEM. El recuadro de la figura 32 muestra como trascurridos 30 segundos, las partículas son atraídas hacia los imanes ubicados cerca de la botella de vidrio, lo cual pone en evidencia La separabilidad magnética de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  con SA. De igual manera en la figura 32 se muestra la curva amplificada de campo magnético bajo estas partículas<sup>53</sup>.

Figura 32 Curva de magnetización (a) y ajuste de Langevin (b) para las MNC  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  con SA, recuadro 1 presenta la curva amplificada de campo magnético bajo de las MNC, las partículas en etanol son atraídos hacia los imanes dentro de 30 segundos.



Fuente: Artículo- Green synthesis and surface properties of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  with SA core-shell nanocomposites<sup>53</sup>.

<sup>53</sup> Cao, H., Li, J., Shen, Y., Li, S., Huang, F., & Xie, A. (2014). Green synthesis and surface properties of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ @SA core-shell nanocomposites. *Applied Surface Science*, 301, 244–249. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.02.054>

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

---

Con cada uno de los resultados obtenidos en los artículos anteriores, se realizó un cuadro comparativo en el cual se analizan parámetros como temperatura, tiempos de concentración, tamaño de partícula y saturación de magnetización, para así poder establecer cuáles son las condiciones óptimas de operación para llevar a cabo un adecuado proceso de síntesis verde de nanopartículas y así mismo optimizar las propiedades magnéticas de dichas partículas.

Tabla 9 Análisis comparativo entre temperatura, tiempo de reacción y tamaño de partícula.

<b>Agente Reductor</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Tiempo de reacción (min)</b>	<b>Tamaño partícula(nm)</b>	<b>Saturación de magnetización (emu/g)</b>
microondas	255	30	31,64	No reportado
té verde	200	120	25-30	30
l-cisteína	90	120	53	66,66

Fuente: Propia

Uno de los aspectos que influye en la determinación de los factores óptimos de operación es la temperatura, y como podemos observar en la tabla 9, los dos primeros estudios trabajan con temperaturas muy altas, lo cual dificulta el proceso de operación de síntesis verde y disminuye la viabilidad de dicha operación, por esta razón no es factible utilizar estas temperaturas. De igual manera el tamaño de nanopartícula generado en estos dos estudios tiene un valor de 30 nm aproximadamente en comparación del estudio donde se empleó l-cisteína, el cual presenta un valor de 53 nm y una temperatura de reacción menor.

De acuerdo a la tabla 9, se estableció que los factores óptimos de operación para el proceso de síntesis verde, se dan a una temperatura 90°C y con un tiempo de reacción de 2 horas, debido a que bajo estas condiciones se presenta un tamaño de nanopartícula de 53nm, lo cual nos indica una optimización en las propiedades magnéticas de la partícula ya que estas dependen en gran medida del tamaño de ella, obteniendo así un valor de saturación de magnetización de 66.66 emu/g.

---

### 11.10. OPTIMIZACIÓN TEÓRICA DE LAS PROPIEDADES MAGNÉTICAS DE LAS NANOPARTÍCULAS

En el estudio “*Nucleation and growth of magnetite from solution*”<sup>54</sup>, se analizó el comportamiento de las nanopartículas de magnetita teniendo en cuenta una variación del pH en un rango de 9 a 11, para la figura 33 del diámetro en función del tiempo, donde se evidencia un crecimiento lineal e indicando las distribuciones de tamaño de partícula para magnetita. Para un pH de 9 se muestra un comportamiento de crecimiento lineal, pero al variar los valores de pH (10 y 11) el crecimiento lineal de la reacción es limitada<sup>54</sup>.

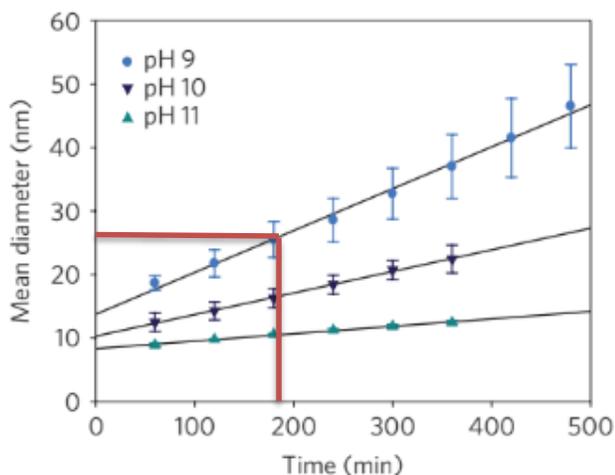
Según estos resultados, el pH de 9 resulta ser el más óptimo para la nucleación de nanopartículas al presentar un comportamiento lineal y creciente. Por esta razón se realizó un análisis comparativo del crecimiento que presenta el diámetro de la partícula en el transcurso del tiempo, con respecto al diámetro más óptimo obtenido en la revisión de los estudios de síntesis verde investigados, el cual es 53nm como se puede evidenciar en la tabla 9, teniendo en cuenta que aproximadamente la mitad de la partícula, es decir, 26.5nm presentan propiedades magnéticas, y la otra mitad corresponde a una capa orgánica, con el fin de comparar los tiempos de reacción obtenidos.

---

<sup>54</sup> Baumgartner, J., Dey, A., Bomans, P. H. H., Le Coadou, C., Fratzl, P., Sommerdijk, N. A. J. M., & Faivre, D. (2013). Nucleation and growth of magnetite from solution. *Nature Materials*, 12(4), 310–314. <https://doi.org/10.1038/nmat3558>

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

Figure 33 Representación gráfica del diámetro en función del tiempo, con variaciones del pH.



Fuente: Artículo- Nucleation and growth of magnetite from solution <sup>54</sup>.

Para un diámetro de partícula de 26.5nm que corresponde al core magnético de la misma partícula, el cual es aproximadamente el 50% del tamaño total de la partícula más óptima sintetizada con *L-cisteína* evidenciada en la tabla 9, se genera un tiempo de reacción de aproximadamente 195 minutos, el cual se encuentra esquematizado en la figura 33 con una línea roja, mientras que en los estudios de síntesis investigados para este mismo diámetro de partícula, que es el más óptimo se requiere un tiempo de reacción de 120 minutos. Esto se debe a que en los estudios de las síntesis no se tuvo en cuenta el pH, mientras que en el estudio de nucleación sí se tuvo en cuenta el pH lo cual generó que el tiempo de reacción aumentara 75 minutos aproximadamente, y así mismo también se debe a que en ese estudio se analizó el tiempo de reacción para el diámetro total de la partícula, es decir, tanto la capa orgánica como el core magnético, esto genera tiempos mayores.

<sup>54</sup> Baumgartner, J., Dey, A., Bomans, P. H. H., Le Coadou, C., Fratzl, P., Sommerdijk, N. A. J. M., & Faivre, D. (2013). Nucleation and growth of magnetite from solution. *Nature Materials*, 12(4), 310–314. <https://doi.org/10.1038/nmat3558>

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

---

Para representar la variación de energía libre  $\Delta G$  se utiliza la siguiente ecuación, donde se relaciona el radio de la partícula ( $r$ ), la energía superficial ( $\sigma$ ) y el cambio de energía libre por unidad de volumen ( $\Delta G_v$ )<sup>55</sup>.

$$\Delta G = 4\pi r^2 \sigma - \frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_v$$

Para calcular  $\Delta G_v$  se utiliza la siguiente ecuación

$$|\Delta G_v = \Delta H_f \Delta T / T_f|$$

$$\Delta T = T_f - T$$

Donde,  $\Delta H_f$  es la entalpía de cristalización por unidad de volumen y  $\Delta T$  es el subenfriamiento<sup>55</sup>.

Tabla 10 Datos experimentales para el cálculo de la energía libre.

Temperatura de fusión	$T_m = 415^\circ \text{ K}$
Energía superficial lateral del núcleo	$\sigma = 8 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$
Energía de superficie	$\sigma_e = 87.8 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$
Entalpía de cristalización por unidad de volumen	$\Delta H_v = 2.4 \times 10^8 \text{ J/m}^3$

Fuente: Nucleation and growth of magnetite from solution.

Para analizar la influencia que tiene el radio de la partícula en la ecuación de energía libre  $\Delta G$ , utilizamos cada uno de los radio de las partículas que fueron investigadas anteriormente y se reemplazaron en la ecuación.

---

<sup>55</sup> Piña Piña, G., Guzmán Alanis, N., Abúndez Pliego, A., Rodríguez, J., & Arellano Cabrera, J. (2012). Crecimiento y orientación controlada de núcleos en polímeros para implantes biomecánicos. *CIENCIA Ergo-Sum*, 19(2), 156–162.

Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

Tabla 11 Datos utilizados para el desarrollo de la ecuación de energía libre.

$\sigma$ (J/m <sup>2</sup> )	8,78, E-02
$\Delta G_v$ (J/m <sup>3</sup> )	46280991,74
T <sub>f</sub> (°K)	363
T (°K)	293
$\Delta T$ (°K)	70
$\Delta H_f$ (J/m <sup>3</sup> )	2,4, E+08

Fuente: Propia

Tabla 12 Resultados obtenidos para la ecuación de energía libre.

Diámetro de la partícula (nm)	Radio de la partícula (nm)	Diámetro de la partícula (m)	Radio de la partícula (m)	$\Delta G$ (J)
53	26,5	5,3, E-08	2,7, E-08	-2,833, E-15
50	25	5,0, E-08	2,5, E-08	-2,340, E-15
45	22,5	4,5, E-08	2,3, E-08	-1,650, E-15
31,64	15,82	3,2, E-08	1,6, E-08	-4,914, E-16
27,5	13,75	2,8, E-08	1,4, E-08	-2,954, E-16
22,6	11,3	2,3, E-08	1,1, E-08	-1,388, E-16
15	7,5	1,5, E-08	7,5, E-09	-1,972, E-17

Fuente: Propia

Por otra parte se analizo el artículo "*Magnetic nanoparticles: Essential factors for sustainable environmental applications*"<sup>56</sup> el cual hace referencia a las fuerzas que

---

<sup>56</sup> Tang, S. C. N., & Lo, I. M. C. (2013). Magnetic nanoparticles: Essential factors for sustainable environmental applications. *Water Research*, 47(8), 2613–2632. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.02.039>

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

---

actúan en las nanopartículas magnéticas, en donde la separación magnética generalmente es causada por la función de los campos magnéticos que ejercen una fuerza sobre el material con propiedades magnéticas, en este caso hace referencia a las nano partículas, la fuerza magnética se puede expresar como:

$$F_m = \mu_0 V_p M_p \Delta H$$

$$F_m = \mu_0 \left( \frac{4}{3} \pi R^3 \right) M_p \Delta H$$

Donde  $\mu_0$  es la constante del permeabilidad del vacío,  $V_p$  es el volumen de la partícula,  $M_p$  es la magnetización de la partícula y  $\Delta H$  es el gradiente de la intensidad del campo magnético en la posición de la partícula. La magnetización de las partículas puede ser interpretada por la susceptibilidad del volumen y campo magnético, en donde la susceptibilidad volumen es una constante para sustancias diamagnéticas y paramagnéticas, y una función de forma de la partícula y tamaño de las mismas, así como la intensidad del campo de las sustancias ferromagnéticas o ferrimagnéticas<sup>56</sup>.

Al analizar y desarrollar la ecuación de energía libre en nanopartículas magnéticas donde cada uno de los resultados obtenidos se encuentran registrados en la tabla 12, se estableció que la incidencia que tiene el radio de la partícula en esta ecuación presenta un comportamiento directamente proporcional, debido a que entre mayor sea el diámetro de la partícula, mayor será la energía que esta posee. Por otra parte se realizó el análisis de la fuerza magnética donde igualmente se pudo evidenciar que el radio de la partícula se comporta directamente proporcional a esta fuerza, por esta razón entre mayor sea el diámetro de la partícula obtenida, se mejorarán las propiedades magnéticas de la misma.

---

<sup>56</sup> Tang, S. C. N., & Lo, I. M. C. (2013). Magnetic nanoparticles: Essential factors for sustainable environmental applications. *Water Research*, 47(8), 2613–2632. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.02.039>

## 11.11. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR BATCH

### 11.11.1. CÁLCULO PARA EL DISEÑO DEL REACTOR

Para llevar acabo el diseño del reactor Batch nos basamos en un articulo “*Diseño, Construcción y Operación de un Reactor Batch para Saponificar Acetato de Etilo*” elaborado por José Luis Nuñez y Teresa de Jesús Udeos<sup>57</sup>.

### 11.11.2. CÁLCULO DEL VOLUMEN DEL CILINDRO DEL REACTOR

Se realizo calculo para establecer cada una de las dimensiones que debe tener el cilindro del reactor, tomando como referencia un volumen de 12500 ml (3,30 galones) para obtener 200 gr de particulas, este valor fue calculado teniendo en cuenta una reación de 250 ml para obtener 4 gr de partícula que fue la relación que se obtuvo en el laboratorio de la Universidad Católica de Colombia.

$$V = \pi * r^2 * h$$

$$V = \frac{\pi * D_t^2 * h}{4}$$

$$\text{Donde } h = 1,2D_t$$

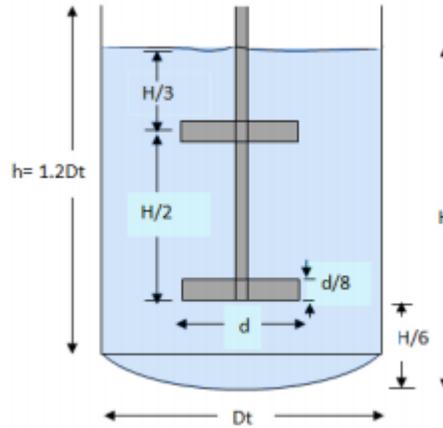
$$4 * V = \pi * D_t^2 * 1,2D_t$$

---

<sup>57</sup> Nuñez, J. ., & Udeos, T. (2015). “*Diseño, Construcción y Operación de un Reactor Batch para saponificar Acetato de Etilo&*.” 171. Retrieved from [https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/34064/1/20151SFMAR052801\\_2.PDF](https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/34064/1/20151SFMAR052801_2.PDF)

Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

Figura 34 Esquema del cilindro.



$$V = \frac{\pi * D_t^2 * 1,2D_t}{4}$$

$$3,3gal * \frac{3,785L}{1gal} * \frac{1m^3}{1000L} = 0,0125m^3$$

$$4 * (0,0125m^3) = 3,76D_t^3$$

$$D_t = \sqrt[3]{0,013297}$$

$$D_t = 0,2369m = 23,69cm$$

Al obtener un valor de 23.69 cm se estableció trabajar con un diámetro de 25cm para una mayor facilidad en los cálculos posteriores.

$$h = 1,2D_t$$

$$h = 1,2 * 25cm = 30cm$$

Se trabajo con una altura de 35cm para mayor facilidad.

$$V = \frac{\pi * D_t^2 * h}{4}$$

Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

---

$$V = \frac{\pi * 25^2 * 35}{4}$$

$$V = 17180.58 \text{ cm}^3$$

$$V = 17180.58 \text{ cm}^3 * \left( \frac{0.001 \text{ Litros}}{1 \text{ cm}^3} \right) * \left( \frac{1 \text{ galón}}{3,785 \text{ Litros}} \right) = 4.54 \text{ gal}$$

$$V_1 = 17.18 \text{ L} = 4.54 \text{ gal}$$

Se dejó un excedente del 30% de volumen ( $V_1$ ) = 1.36, ya que tanto el eje como las paletas de agitación pueden interferir en la capacidad o el volumen del tanque

Para evitar la acumulación de gases o formación de espuma, se le adiciono a la altura del tanque 10 cm con un factor de seguridad de 1.25, previniendo problemas durante el funcionamiento del reactor y mejorando la eficiencia del proceso, adoptando una altura final en el tanque de 45 cm.

### 11.11.3. CÁLCULO DEL VOLUMEN DEL REACTOR

Para el volumen del reactor ( $V_r$ ) se sumó el volumen del cilindro ( $V_1$ ) y el volumen del asiento redondeado ( $V_2$ ) de la parte baja del cilindro.

$$V_r = V_1 + V_2$$

Donde  $V_2$  es el volumen del asiento redondeado, el cual se calculó con el volumen de casquete esférico.

$$V_2 = \frac{1}{3} * \pi * hc^2 * ((3 * r) - hc)$$

$$V_2 = \frac{1}{3} * \pi * 5^2 * ((3 * 12.5) - 5)$$

$$V_2 = 850.85 \text{ cm}^3$$

$$V_2 = 0.85 \text{ l} = 0.22 \text{ gal}$$

$$V_r = V_1 + V_2$$

$$V_r = 4.54 \text{ gal} + 0.22 \text{ gal} = 4.76 \text{ gal}$$

---

#### 11.11.4. CÁLCULO DEL ÁREA DE TRANSFERENCIA DE CALOR DEL SERPENTÍN DE CALENTAMIENTO

$$Q_{ganado} = Q_{perdido}$$

En donde:

Q ganado= Calor sensible ganado por la solución a calentarse

Q perdido= Calor latente cedido por el vapor

El mecanismo de transferencia que se empleó para este reactor es el de convección debido a que no se presenta radiación térmica, por esta razón el cálculo de transferencia del medio calefactor se establece mediante la ecuación de enfriamiento de Newton.

$$Q_{conv} = h * A * (T_s - T_f)$$

En donde

h= Coeficiente de transferencia de calor

A= Área de transferencia

T<sub>s</sub>= Temperatura superficie de contacto

T<sub>f</sub>= Temperatura del fluido lejos de la superficie

Se estableció un valor de h de 200 W/m<sup>2</sup>.K con base en la tabla de coeficientes de transferencia de calor general (Anexo 16.1).

Por facilidad en la condición de operación se estableció un valor de T<sub>s</sub> 310°F (154,4°C), y una temperatura T<sub>f</sub> de 194°F (90°C) con base en los estudios investigando, donde la temperatura optima es de 90°C.

$$A = \frac{Q_{conv}}{(h * (T_s - T_f))}$$

$$A = \frac{1386.96}{200 * ((154,4 + 273) - (90 + 273))}$$

$$A = 0.1076 \text{ m}^2$$

Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

---

Si se emplea una tubería de cobre de ½ pulgada de diámetro, la longitud de la tubería de cobre es:

$$1 \text{ pulg} = 0.0254 \text{ m}$$

Longitud de circunferencia=  $\pi \cdot d = \pi \cdot 0,0127 = 0,040 \text{ m}$

$$A = C \cdot D$$

Donde

D= Longitud tubería

C= Longitud circunferencia

$$D = \frac{A}{C} = \frac{0.1076 \text{ m}^2}{0,040 \text{ m}} = 2.69 \text{ m}$$

$$L \text{ diseño} = 3 \text{ m}$$

#### 11.11.5. CÁLCULO DEL FLUJO CALÓRICO

$$Q = \frac{m}{T} * CP_{\text{agua}} * \Delta t$$

Donde

m= masa del agua

T= tiempo de reacción

cp= capacidad calórica del agua

$\Delta t$ = diferencial de temperatura

$$Q = \frac{17,04 \text{ kg}}{3600 \text{ s}} * 4186 \frac{\text{J}}{\text{kg} \text{ } ^\circ\text{K}} * (363^\circ\text{K} - 293^\circ\text{K})$$

$$Q = 1386.96 \text{ W}$$

### 11.11.6. CÁLCULOS PARA EL SISTEMA DE AGITACIÓN

Figure 35 Parámetros mezcladores mecánicos.

Parameter	Range	Definition Sketch
Impeller	Hydrofoil or 45° pitched-blade turbine (PBT), hydrofoil preferred	
$D/T_e$	0.3–0.6, 0.4–0.5 preferred	
$H/T_e$	0.9–1.1	
$C/H$	0.5–0.33	
$N$	10–30 rev/min	
Tip speed	2–3 m/s	

### 11.11.7. CÁLCULO DE LA LONGITUD DEL EJE DE AGITACIÓN

$$\text{Longitud eje} = H = 45\text{cm}$$

### 11.11.8. CÁLCULO DE LA ALTURA DEL EJE DE AGITACIÓN

Se estableció una altura del eje igual a la altura del tanque sin tener en cuenta el fondo del mismo, por lo cual tendrá una altura de 45 cm y el eje tendrá un diámetro de 2 cm.

### 11.11.9. CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DE LAS PALETAS

De acuerdo a los parámetros que se deben cumplir en los mezcladores mecánicos como se muestra en la figura 35, las paletas deben cumplir la siguiente relación:

$$0,3 < \frac{d}{Dt} < 0,6$$

$$0,3 < \frac{d}{25} < 0,6$$

$$7,5 < d < 15$$

El diámetro de las paletas debe estar en un rango entre 7.5 a 15, por Cuestión de que el tanque tiene un serpentín, definiremos un diámetro de 12 cm.

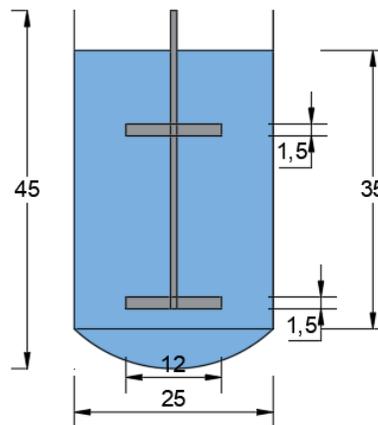
## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

El espesor de las paletas debe cumplir  $d/8$ , donde el diámetro es igual a 12cm.

$$\frac{d}{8} = \frac{12}{8} = 1.5 \text{ cm}$$

Obteniendo un espesor de 1.5 cm. Para una mayor eficiencia del reactor se operarán dos paletas axiales, las cuales tendrán como ubicación 15cm y 22.5 cm desde el extremo inferior del eje respectivamente.

Figure 36 Dimensiones del cilindro expresadas en cm.



Fuente: Propia

### 11.11.10. CÁLCULO DE LA DENSIDAD Y VISCOSIDAD DE LA MEZCLA

En este reactor se trabajó con agua a una temperatura de reacción de 90°C, por esta razón se buscaron las propiedades de densidad y viscosidad dinámica de este fluido (Anexo 16.3 y 16.4).

$$\rho_{\text{agua (90}^\circ\text{C)}} = 965.3 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\mu_{\text{agua (90}^\circ\text{C)}} = 0.000315 \frac{\text{kg}}{\text{m} * \text{s}}$$

### 11.11.11. CÁLCULO DEL NÚMERO DE REYNOLDS

$$Dt = 25\text{cm}$$

$$Nre = \frac{Da^2 * N * \rho}{\mu}$$

Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

---

En donde:

Da= Diámetro del rodete

N= Número de revoluciones por segundo

P= Densidad de la mezcla

$\mu$ = Viscosidad de la mezcla fluido

$$Nre = \frac{(0.083m)^2 * 5rps * 965.3 \text{ Kg}/m^3}{0.000315 \frac{kg}{m * s}}$$

$$Nre = 105554.78 = 1.05 \times 10^5$$

### 11.11.12. CÁLCULO DE LA POTENCIA PARA ACCIONAR EL EJE

$$P = \frac{Np * N^3 * Da^5 * \rho_{mezcla}}{g_c}$$

En donde:

P=Potencia

Np= es número de potencia

N= Número de revoluciones por segundo

Da= Diámetro del rodete (metros)

$\rho$ = Densidad de la mezcla ( $\text{Kg}/m^3$ )

$g_c$ = gravedad específica ( $m/s^2$ )

El número de potencia depende del tipo de impulsor empleado, para nuestro caso se utilizó un impulsor pitched-blade turbine ( $45^\circ$  PBT), el cual tiene un numero de potencia de 1.26 (Anexo 16.2).

$$P = \frac{1.26 * 5 \text{ rps}^3 * 0.25 \text{ m}^5 * 965.3 \text{ Kg}/m^3}{9.81 \text{ m}/s^2}$$

$$P = 15.15 \frac{\text{Kg} * \text{m}}{s} * \left( \frac{1J}{0.1019 \text{ Kg} * \text{m}} \right) = 148.67W$$

$$148.67W \left( \frac{0.00134102 \text{ HP}}{1W} \right) = 0.2 \text{ HP}$$

## 12. CONCLUSIONES:

- Los extractos de plantas son ampliamente utilizados en los procesos de síntesis verde como agentes reductores debido a que estos presentan una serie de compuestos como polifenoles y agentes antioxidantes, que facilitan la adherencia entre la superficie del núcleo y las partículas de los diferentes agentes orgánicos contaminantes como el plomo Pb, arsénico As, y así mismo facilita la remoción de estos metales contaminantes de cuerpos de agua.
- Además de la eficiencia que presentan las nanopartículas magnéticas en la remoción de metales pesados del agua, también se demostró la eficiencia que tiene en la degradación de azul de bromotimol y verde malaquita, utilizados para la medición del pH y la eliminación de parásitos del agua respectivamente.
- Se evidencio que, en algunos de los estudios investigados, las nanopartículas obtenidas mediante el proceso de síntesis fueron modificadas generando un recubrimiento de la misma. sin embargo, este recubrimiento disminuye las propiedades magnéticas que presenta la partícula, pero también genera un aumento de la vida útil de dicha partícula.
- Para realizar un adecuado proceso de síntesis verde que optimice las propiedades magnéticas de las nanopartículas obtenidas se deben tener en cuenta dos parámetros, lo cuales son una temperatura y tiempo de reacción de 90°C y 120 minutos respectivamente, debido a que con estos dos parámetros se obtiene un mayor diámetro de partícula y así mismo un mayor valor de la saturación de magnetización. Estos resultados se obtuvieron al utilizar extracto de té l-cisteína.
- Se realizó la comprobación teórica del comportamiento magnético que presentan las partículas mediante la utilización de la ecuación de fuerza de magnetización, donde se evidencio que el radio de la partícula generada incide directamente en el aumento de la magnetización, es decir, presenta un comportamiento directamente proporcional.

## Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

---

- Para generar un total de 200 gr de partículas se requiere un reactor de síntesis verde de nanopartículas con un volumen de 4.76 gal siguiendo la metodología de diseño de un reactor Batch.

### 13. REFERENCIAS

1. Mundial I, Unidas N. *No Dejar.*; 2019. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367304?locale=en>.
2. Villegas G, Víctor R, Ale N, et al. EQUILIBRIO DE BIOSORCIÓN DE PLOMO ( II ) Y CARACTERIZACIÓN MEDIANTE FT-IR Y SEM-EDAX EN LEAD ( II ) BIOSORPTION EQUILIBRIUM AND CHARACTERIZATION THROUGH FT-IR AND SEM-EDAX. 2013.
3. Kumar R, Singh N, Pandey SN. Potential of green synthesized zero-valent iron nanoparticles for remediation of lead-contaminated water. *Int J Environ Sci Technol.* 2015;12(12):3943-3950. doi:10.1007/s13762-015-0751-z
4. Lima VC, Prata TS, Landa G, Yannuzzi LA, Rosen RB. Intravitreal triamcinolone and bevacizumab therapy for combined papillophlebitis and central retinal artery occlusion. *Retin Cases Br Reports.* 2010;4(2):125-128. doi:10.1097/ICB.0b013e3181ad3957
5. Shen YF, Tang J, Nie ZH, Wang YD, Ren Y, Zuo L. Preparation and application of magnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles for wastewater purification. *Sep Purif Technol.* 2009;68(3):312-319. doi:10.1016/j.seppur.2009.05.020
6. Herrera Núñez J, Rodríguez Corrales J, Coto Campos JM, Salgado Silva V, Borbón Alpizar H. Evaluación de metales pesados en los sedimentos superficiales del río Pirro. *Rev Tecnol en Marcha.* 2013;26(1):27. doi:10.18845/tm.v26i1.1119
7. Molina C, Ibañez C, Gibon F-M. Proceso de biomagnificación de metales pesados en un lago hiperhalino (Poopó, Oruro, Bolivia): posible riesgo en la salud de consumidores. *Ecol en Bolív Rev del Inst Ecol.* 2012;47(2):99-118.
8. Cano SE. Contaminación con mercurio por la actividad minera. *Biomedica.* 2012;32(3):309-312.
9. Díaz-Arriaga FA. Mercurio en la minería del oro: Impacto en las fuentes hídricas destinadas para consumo humano. *Rev Salud Publica.* 2014;16(6):947-957. doi:10.15446/rsap.v16n6.45406

Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

---

10. Singh S, Barick KC, Bahadur D. Surface engineered magnetic nanoparticles for removal of toxic metal ions and bacterial pathogens. *J Hazard Mater.* 2011;192(3):1539-1547. doi:10.1016/j.jhazmat.2011.06.074
11. Marimón W. INGENIERIA DE NANOPARTICULAS MAGNETICAS PARA LA REMOCION DE MERCURIO (II) EN AGUAS. 2016:1-34.
12. López López, Viviana Paola y Riveros Garcia DA. Recubrimientos elaborados a partir de nanopartículas de TiO<sub>2</sub> con propiedades autolimpiables en vidrios. 2018:1-8.
13. Garcia C, Gonzalez C. OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA DE FILTRACIÓN CON NANOMATERIALES PARA LA MEJORA DE LOS INDICES DE CALIDAD DEL AGUA. 2019:1-78. doi:1037//0033-2909.126.1.78
14. Sánchez F, Sharon C. CAPÍTULO II METALES TÓXICOS EN COLOMBIA: PRESENCIA, ORIGEN, DISTRIBUCIÓN Y CONTAMINACIÓN EN COMPONENTES BIÓTICOS Y ABIÓTICOS Fernanda Sánchez 1 Sharon Corredor 2. 2016. [https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2939/CAPÍTULO II Metales Pesados.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2939/CAPÍTULO%20II%20Metales%20Pesados.pdf?sequence=2&isAllowed=y).
15. U JO, Johnson B, Arguello E. Human exposure to mercury in San Jorge river basin , Colombia ž South America /. 2002.
16. Piedrahita C. El sumergido.
17. Quintero E. OBSERVATORIO CT + i. 2016.
18. Tiwari DK, Behari J, Sen P. Application of Nanoparticles in Waste Water Treatment. 2008;3(3):417-433.
19. Chávez-Lizárraga GA. Nanotecnología una alternativa para el tratamiento de aguas residuales: Avances, Ventajas y Desventajas. *J Selva Andin Res Soc.* 2018;9(1):52-61. doi:10.36610/j.jsars.2018.090100052
20. MARIMON W. INGENIERÍA DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS PARA LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN AGUAS. 2018:160.
21. Enriqueta J, Muñoz C, Guillermo C, Mólgora C. Parte III Calidad del agua , en

contacto con zonas de riego que usan agua residual.

22. Prieto Díaz VI, Martínez de Villa Pérez A. La contaminación de las aguas por hidrocarburos: un enfoque para abordar su estudio. *Rev Cubana Hig Epidemiol.* 1999;37(1):13-20. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1561-30031999000100003&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1561-30031999000100003&lng=es&nrm=iso&tlng=es). Accessed July 2, 2020.
23. Chunculluy N. Tratamiento de agua para consumo humano. *Ing Ind.* 2011;29(29):153-170. [http://revistas.ulima.edu.pe/index.php/Ingenieria\\_industrial/article/viewFile/232/208](http://revistas.ulima.edu.pe/index.php/Ingenieria_industrial/article/viewFile/232/208).
24. Tema 8: Química de las aguas naturales. :1-13.
25. Universidad de Coruña. Intercambio iónico (FT-TER-006). 2015:30. <https://www.wateractionplan.com/documents/186210/200858/FT-TER-006-INTERCAMBIO+IONICO+A201515.pdf/7ad263b8-d51c-44b3-a366-9598794c596e>.
26. Osorno HAR. EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COAGULACIÓN – FLOCULACIÓN DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE. *Univ Nac Colomb.* 2009:31-47.
27. Coagulación- EDELPDE. Estudio Del Proceso De Coagulación-Floculación De Aguas Residuales De La Empresa Textil “Desembarco Del Granma” a Escala De Laboratorio. *Tecnol Química.* 2009;XXIX(3):64-73. doi:10.1590/2224-6185.2009.3.
28. TRIANA EJH, BRICEÑO CAC. DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA PLANTA MODELO DE TRATAMIENTO PARA LA POTABILIZACION DE AGUA, SE DISPONDRA EN EL LABORATORIO DE AGUAS DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA. 2017:1-82.
29. ÍÑIGUEZ G, HERNÁNDEZ R. Estudio para la rehabilitación de una planta de tratamiento de vinazas tequileras mediante un floculante polimérico de poliácridamida (PAM) . *Rev Int Contam Ambient* . 2010;26:299-311.
30. Ramsden JJ. What is nanotechnology? *Nanotechnol Perceptions.* 2005;1(1):3-17. doi:10.4024/n03ra05/01.01

Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

31. Yunus IS, Harwin, Kurniawan A, Adityawarman D, Indarto A. Nanotechnologies in water and air pollution treatment. *Environ Technol Rev.* 2012;1(1):136-148. doi:10.1080/21622515.2012.733966
32. M. T. Amin, A. A. Alazba and UM. A Review of Removal of Pollutants from Water/Wastewater Using Different Types of Nanomaterials. 2014:1-24. doi:10.1007/BF02819836
33. Staff R. Nanotecnología, nanopartículas y toxicidad. *Rev Enfermería del Trab.* 2015;5(1):21-27.
34. García Castrillón M. Síntesis de nanopartículas magnéticas y su aplicación en nanocompuestos de matriz polimérica con propiedades magnéticas. *Tesis Dr.* 2012:279. <http://zagan.unizar.es>.
35. Noval VE, Puentes CO, Carriazo JG. Magnetita ( Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ): Una estructura inorgánica con múltiples aplicaciones en catálisis heterogénea Resumen Magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>): An inorganic structure with many applications for heterogeneous catalysis Abstract Magnetita ( Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ): Uma estrutura. *Rev Colomb Química.* 2017;46(1):42-59. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcolquim/article/view/62831/63822>.
36. Sakthivel S, Prasanna Venkatesh R. Solid state synthesis of nano-mineral particles. *Int J Min Sci Technol.* 2012;22(5):651-655. doi:10.1016/J.IJMST.2012.08.010
37. Narayanan KB, Sakthivel N. Biological synthesis of metal nanoparticles by microbes. *Adv Colloid Interface Sci.* 2010;156(1-2):1-13. doi:10.1016/j.cis.2010.02.001
38. Moghaddam AB, Namvar F, Moniri M, Tahir PM, Azizi S, Mohamad R. Nanoparticles biosynthesized by fungi and yeast: A review of their preparation, properties, and medical applications. *Molecules.* 2015;20(9):16540-16565. doi:10.3390/molecules200916540
39. Yang Q, Shan W, Hu L, et al. Uptake and Transformation of Silver Nanoparticles and Ions by Rice Plants Revealed by Dual Stable Isotope Tracing. *Environ Sci Technol.* 2018;53. doi:10.1021/acs.est.8b02471
40. Mittal AK, Chisti Y, Banerjee UC. Synthesis of metallic nanoparticles using

Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

- 
- plant extracts. *Biotechnol Adv.* 2013;31(2):346-356. doi:10.1016/J.BIOTECHADV.2013.01.003
41. Vilchis-Nestor AR, Sánchez-Mendieta V, Camacho-López MA, Gómez-Espinosa RM, Camacho-López MA, Arenas-Alatorre JA. Solventless synthesis and optical properties of Au and Ag nanoparticles using *Camellia sinensis* extract. *Mater Lett.* 2008;62(17-18):3103-3105. doi:10.1016/J.MATLET.2008.01.138
42. Marimón-bolívar W, Toussaint-jimenez N. A review on green synthesis of magnetic nanoparticles ( magnetite ) for environmental applications .
43. Arularasu MV, Devakumar J, Rajendran TV. An innovative approach for green synthesis of iron oxide nanoparticles: Characterization and its photocatalytic activity. *Polyhedron.* 2018;156:279-290. doi:10.1016/J.POLY.2018.09.036
44. El-Kassas HY, Aly-Eldeen MA, Gharib SM. Green synthesis of iron oxide (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) nanoparticles using two selected brown seaweeds: Characterization and application for lead bioremediation. *Acta Oceanol Sin.* 2016;35(8):89-98. doi:10.1007/s13131-016-0880-3
45. Lu W, Shen Y, Xie A, Zhang W. Green synthesis and characterization of superparamagnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles. *J Magn Magn Mater.* 2010;322(13):1828-1833. doi:10.1016/J.JMMM.2009.12.035
46. Fahmy HM, Mohamed FM, Marzouq MH, et al. Review of Green Methods of Iron Nanoparticles Synthesis and Applications. *Bionanoscience.* 2018;8(2):491-503. doi:10.1007/s12668-018-0516-5
47. Das RK, Gogoi N, Babu PJ, Sharma P, Mahanta C, Bora U. The Synthesis of Gold Nanoparticles Using <i>Amaranthus spinosus</i> Leaf Extract and Study of Their Optical Properties. *Adv Mater Phys Chem.* 2012;02(04):275-281. doi:10.4236/ampc.2012.24040
48. Lunge S, Singh S, Sinha A. Magnetic iron oxide (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) nanoparticles from tea waste for arsenic removal. *J Magn Magn Mater.* 2014;356:21-31. doi:https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2013.12.008
49. Njagi E, Huang H, Stafford L, et al. Biosynthesis of Iron and Silver Nanoparticles at Room Temperature Using Aqueous Sorghum Bran Extracts.

*Langmuir*. 2011;27:264-271. doi:10.1021/la103190n

50. Pattanayak M, Nayak PL. Green Synthesis and Characterization of Zero Valent Iron Nanoparticles from the Leaf Extract of *Azadirachta indica* (Neem). *World J Nano Sci Technol*. 2013;2(1):6-09. doi:10.5829/idosi.wjnst.2013.2.1.21132
51. Hernández-Hernández AA, Álvarez-Romero GA, Castañeda-Ovando A, et al. Optimization of microwave-solvothermal synthesis of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles. Coating, modification, and characterization. *Mater Chem Phys*. 2018;205:113-119. doi:10.1016/j.matchemphys.2017.11.009
52. Physics O. Greener synthesis of magnetite nanoparticles using green tea extract and their magnetic properties. *Certain distance degree based Topol indices Zeolite LTA Fram*. 2018;(December 2016):11-14.
53. Cao H, Li J, Shen Y, Li S, Huang F, Xie A. Green synthesis and surface properties of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@SA core-shell nanocomposites. *Appl Surf Sci*. 2014;301:244-249. doi:10.1016/j.apsusc.2014.02.054
54. Baumgartner J, Dey A, Bomans PHH, et al. Nucleation and growth of magnetite from solution. *Nat Mater*. 2013;12(4):310-314. doi:10.1038/nmat3558
55. Piña Piña G, Guzmán Alanis N, Abúndez Pliego A, Rodríguez J, Arellano Cabrera J. Crecimiento y orientación controlada de núcleos en polímeros para implantes biomecánicos. *Cienc ergo-sum*. 2012;19(2):156-162.
56. Tang SCN, Lo IMC. Magnetic nanoparticles: Essential factors for sustainable environmental applications. *Water Res*. 2013;47(8):2613-2632. doi:10.1016/j.watres.2013.02.039
57. Nuñez J., Udeos T. "Diseño, Construcción y Operación de un Reactor Batch para saponificar Acetato de Etilo&." 2015:171. [https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/34064/1/20151SFMA R052801\\_2.PDF](https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/34064/1/20151SFMA R052801_2.PDF).

## 14. ANEXOS

### 14.1. TABLAS DE COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR GENERAL.

Types	Application	Overall Heat Transfer Coefficient - U -	
		$W/(m^2 K)$	$Btu/(ft^2 {}^\circ F h)$
Tubular, heating or cooling	Gas at atmospheric pressure inside and outside tubes	5 - 35	1 - 6
	Gas at high pressure inside and outside tubes	150 - 500	25 - 90
	Liquid outside (inside) and gas at atmospheric pressure inside (outside) tubes	15 - 70	3 - 15
	Gas at high pressure inside and liquid outside tubes	200 - 400	35 - 70
	Liquids inside and outside tubes	150 - 1200	25 - 200
	Steam outside and liquid inside tubes	300 - 1200	50 - 200

### 14.2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Y NÚMERO DE POTENCIA DE AGITADORES MECÁNICOS.

Impeller Type	Photograph	Power Number
Flat-bladed turbine (FBT)		3.6
Pitched-blade turbine (45° PBT)		1.26
Pitched-blade turbine with camber (hydrofoil, 3 blades)		0.2-0.3

Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

**14.3. VISCOSIDAD DINÁMICA DEL AGUA LÍQUIDA A VARIAS TEMPERATURAS.**

Temperatura °C	Viscosidad dinámica kg / (m·s)	Temperatura °C	Viscosidad dinámica kg / (m·s)	Temperatura °C	Viscosidad dinámica kg / (m·s)
0	0,001792	34	0,000734	68	0,000416
1	0,001731	35	0,000720	69	0,000410
2	0,001674	36	0,000705	70	0,000404
3	0,001620	37	0,000692	71	0,000399
4	0,001569	38	0,000678	72	0,000394
5	0,001520	39	0,000666	73	0,000388
6	0,001473	40	0,000653	74	0,000383
7	0,001429	41	0,000641	75	0,000378
8	0,001386	42	0,000629	76	0,000373
9	0,001346	43	0,000618	77	0,000369
10	0,001308	44	0,000607	78	0,000364
11	0,001271	45	0,000596	79	0,000359
12	0,001236	46	0,000586	80	0,000355
13	0,001202	47	0,000576	81	0,000351
14	0,001170	48	0,000566	82	0,000346
15	0,001139	49	0,000556	83	0,000342
16	0,001109	50	0,000547	84	0,000338
17	0,001081	51	0,000538	85	0,000334
18	0,001054	52	0,000529	86	0,000330
19	0,001028	53	0,000521	87	0,000326
20	0,001003	54	0,000512	88	0,000322
21	0,000979	55	0,000504	89	0,000319
22	0,000955	56	0,000496	90	0,000315
23	0,000933	57	0,000489	91	0,000311
24	0,000911	58	0,000481	92	0,000308
25	0,000891	59	0,000474	93	0,000304
26	0,000871	60	0,000467	94	0,000301
27	0,000852	61	0,000460	95	0,000298
28	0,000833	62	0,000453	96	0,000295
29	0,000815	63	0,000447	97	0,000291
30	0,000798	64	0,000440	98	0,000288
31	0,000781	65	0,000434	99	0,000285
32	0,000765	66	0,000428	100	0,000282
33	0,000749	67	0,000422		

[www.vaxasoftware.com](http://www.vaxasoftware.com)

Optimización de propiedades magnéticas de nanopartículas de óxido de hierro obtenidas por síntesis verde

**14.4. DENSIDAD DEL AGUA LÍQUIDA A VARIAS TEMPERATURAS.**

Temp. °C	Peso especifico $\gamma$ Nm <sup>2</sup>	Densidad $\rho$ kg/m <sup>3</sup>
0	9806	999.9
5	9807	1000.0
10	9804	999.7
15	9798	999.1
20	9789	998.2
25	9778	997.1
30	9764	995.7
35	9749	994.1
40	9730	992.2
45	9711	990.2
50	9690	988.1
55	9666	985.7
60	9642	983.2
65	9616	980.6
70	9589	977.8
75	9560	974.9
80	9530	971.8
85	9499	968.6
90	9466	965.3
95	9433	961.9
100	9399	958.4