

# Obtaining iron oxide nanoparticles by green synthesis using aqueous extract of leaves of matico (*Piper Elongatum Poir*)

Arcil Perez-Moscoso<sup>1</sup>; Nicómedes Saavedra-Arancibia<sup>2</sup>; Gonzalo B. Perez-Serrudo<sup>3</sup>  
Darío G. Cruz-Yucra<sup>4</sup>; José Enrique Iglesias<sup>5</sup>; Victor Hinojosa-Padilla<sup>6</sup>

<sup>2,3,4,5,6</sup>Universidad San Francisco Xavier, Bolivia, [saavedra.nicomedes@usfx.bo](mailto:saavedra.nicomedes@usfx.bo), [perez.gonzalo@usfx.bo](mailto:perez.gonzalo@usfx.bo), [cruz.dario@usfx.bo](mailto:cruz.dario@usfx.bo), [iglesias.enrique@usfx.bo](mailto:iglesias.enrique@usfx.bo), [Hinojosa.victor@usfx.bo](mailto:Hinojosa.victor@usfx.bo)

<sup>1,3</sup>Centro de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos-USFX, Bolivia, [perez.arcil@usfx.bo](mailto:perez.arcil@usfx.bo)

**Abstract**– *The green synthesis of iron oxide nanoparticles (IONPs) was carried out using an aqueous extract of Matico leaves, which acts as a reducing, protecting, and stabilizing agent in the synthesis process, allowing for the sustainable production of nanoparticles. The synthesized iron oxide nanoparticles were studied using a Plackett-Burman experimental design and characterized through X-ray Fluorescence Spectrometry (XRF), Scanning Electron Microscopy (SEM), Scanning Probe Microscopy (SPM), Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX), and Elemental Mapping. The experimental analysis identified the most influential variables in the process as the mass of FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O, the volume of extract, the reaction time, and a secondary variable, temperature. The composition determined by XRF ranged from 97,8283 % to 99,9987 %, indicating high purity and crystallization in the synthesis of iron oxide nanoparticles (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> NPs). SEM analysis revealed a heterogeneous formation of nanoparticles with sizes ranging from 50,50 to 179,02 nm, with irregular spherical shapes, demonstrating the formation of agglomerated nanoparticles due to the magnetic fields present in this material. SPM imaging showed the formation of nanoparticles ranging from 10,35 to 160 nm in size. EDS analysis revealed a composition of 73,8 % iron and 24,6 % oxygen in the synthesized IONPs. The synthesized nanoparticles are expected to be a promising material for the treatment of contaminated water (industrial wastewater, dye-containing water), for biomedical treatments, and in fields such as Chemical, Environmental, Electrical, and Mechanical Engineering, as well as agriculture, through a cost-effective, sustainable, and eco-friendly approach.*

**Keywords** -- green synthesis, iron oxide, magnetite nanoparticles, Plackett-Burman, Matico leaf.

# Obtención de nanopartículas de óxido de hierro por síntesis verde usando extracto acuoso de hojas de matico (*Piper Elongatum Poir*)

Arcil Perez-Moscoco<sup>1</sup>; Nicómedes Saavedra-Arancibia<sup>2</sup>; Gonzalo B. Perez-Serrudo<sup>3</sup>;

Darío G. Cruz-Yucra<sup>4</sup>; José Enrique Iglesias<sup>5</sup>; Victor Hinojosa-Padilla<sup>6</sup>

<sup>2,3,4,5,6</sup>Universidad San Francisco Xavier, Bolivia, [saavedra.nicomedes@usfx.bo](mailto:saavedra.nicomedes@usfx.bo), [perez.gonzalo@usfx.bo](mailto:perez.gonzalo@usfx.bo), [cruz.dario@usfx.bo](mailto:cruz.dario@usfx.bo), [iglesias.enrique@usfx.bo](mailto:iglesias.enrique@usfx.bo), [Hinojosa.victor@usfx.bo](mailto:Hinojosa.victor@usfx.bo)

<sup>1,3</sup>Centro de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos-USFX, Bolivia, [perez.arcil@usfx.bo](mailto:perez.arcil@usfx.bo)

**Resumen**– La síntesis verde de nanopartículas de óxido de hierro (IONP) a partir de extracto acuoso de hojas de Matico, el cual actúa como agente reductor, protector y estabilizante en el proceso de síntesis que permite obtener nanopartículas de manera sustentable. Las nanopartículas de óxido de hierro sintetizadas se estudiaron por medio del diseño experimental de Plackett-Burman y se caracterizaron por técnicas de Espectrometría de Fluorescencia de rayos X, Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), Microscopía de Sonda de Barrido (SPM), Espectroscopía de Energía Dispersa (EDX) y por Mapeo Elemental. En el análisis experimental se determinó las variables principales más influyentes en el proceso que son la masa del  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , el volumen del extracto, el tiempo de reacción y una variable secundaria que es la temperatura. La composición que se determinó mediante Espectrometría de Fluorescencia de rayos X del 97,8283-99,9987 % lo que nos indica la alta pureza y cristalización en la síntesis de las nanopartículas (NP) de óxido de hierro ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Mediante Microscopía electrónica de barrido (SEM) se determinó una formación heterogénea de las nanopartículas que van desde los 50,50-179,02 nm de tamaño de forma esféricas irregulares, lo que demostró que se formaron nanopartículas con aglomeraciones debido a los campos magnéticos que presenta este material. Con las imágenes de Microscopía de Sonda de Barrido (SPM) se evidenció la formación de nanopartículas de entre 10,35-160 nm de tamaño. Mediante el análisis EDS se determinó que se tiene un 73,8 % de hierro y 24,6 % de oxígeno de composición en las IONP obtenidas. Se espera que las nanopartículas sintetizadas puedan ser un material prometedor para tratar aguas contaminadas (aguas residuales industriales, aguas con colorantes), para realizar tratamientos biomédicos, en el campo de la ingeniería Química, Ambiental, Eléctrica, Mecánica, la agricultura a través de un enfoque rentable, sostenible y ecológico.

**Palabras clave** — síntesis verde, óxido de hierro, nanopartículas de magnetita, Plackett-Burman, hoja de matico

## I. INTRODUCCIÓN

Las nanopartículas (NP) con propiedades magnéticas altamente controlables han alcanzado un gran aspecto en el campo biológico, principalmente en diversas aplicaciones de diagnóstico y terapéuticas debido a su rango de tamaño nanométrico. Las nanopartículas magnéticas, han llegado a tener mucho interés en el campo de la investigación. Se han

logrado algunas propiedades increíbles como superparamagnéticas y baja toxicidad en las nanopartículas magnéticas y su versatilidad, particularmente las nanopartículas de óxido de hierro, la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), lo que las concluye para varias aplicaciones que se pueden citar varios ejemplos y se ven con frecuencia en la literatura, como el tratamiento del cáncer por hipertermia magnética, la ingeniería de tejidos e implantes médicos, los sustratos de nanomateriales que apoyan el crecimiento de células madre, en el mundo biotecnológico, la administración dirigida de fármacos, resonancia magnética y administración de fármacos [1], [2], en la degradación altamente eficiente de colorantes tartrazina y azul Nilo A [3], para el tratamiento de aguas residuales y la eliminación por adsorción de metales pesados de aguas residuales [4], [5], [6], en adsorción de azul de metileno y naranja de metilo de aguas residuales textiles [7], en actividades biológicas y actividad fotocatalítica [8], en protección ambiental, como la remediación del suelo, la oxidación catalítica fenton para eliminar contaminantes, fertilizantes y antivirales [9], para mejorar el rendimiento de detección del sensor y permitir la selección dirigida de microorganismos [10], y mejoran los antioxidantes enzimáticos y fenólicos a través del cebado de semillas de brotes de trigo sarraceno [11].

Existen varios métodos disponibles para la síntesis de nanomateriales, como el método sol-gel, el método de reducción química, la coprecipitación, la síntesis hidrotermal, etc. Los productos químicos utilizados en estos métodos se consideran nocivos para el medio ambiente [12]. Estos métodos de síntesis suelen ser costosos, requieren mucho tiempo y quizás sean perjudiciales para el medio ambiente y los seres vivos. La síntesis verde tiene ventajas sobre los métodos físicos y químicos porque es más económica, ecológicamente amigable y se puede ampliar fácilmente para la síntesis a gran escala. También elimina la necesidad de productos químicos tóxicos, altas temperaturas y procesos que consumen mucha energía y equipos costosos. La síntesis verde ofrece un mejor impacto, control y consistencia sobre el desarrollo cristalino. Las nanopartículas verdes se producen

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### A. Materiales

sintéticamente, son económicas y tienen numerosas aplicaciones científicas [13]. Es muy importante encontrar métodos sostenibles para sintetizar nanopartículas, incorporando extractos naturales de origen vegetal, proporcionando una alternativa biocompatible a los métodos químicos convencionales [14].

La síntesis ecológica de nanopartículas utiliza extracto de plantas como agente reductor y de recubrimiento, eliminando la necesidad de agentes reductores nocivos. El extracto de plantas contiene varios fitoquímicos como polifenoles, flavonoides, terpenoides, ácidos fenólicos, que son responsables de la reducción y formación de nanopartículas estabilizadas [12]. Para sintetizar nanopartículas de óxido de hierro, se pueden utilizar numerosas sales de hierro como  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{FeSO}_4$ ,  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$  como precursores [15]. Las nanopartículas de óxido de hierro sintetizadas utilizando diversas formas y precursores vegetales, estudios recientes han centrado en la síntesis verde a base de: *Carica papaya* [12], *Iris kashmiriana* [13], *Cissus rotundifolia* [16], *Quercus infectoria* [17], *Syzygium aromaticum* [18], *Moringa oleifera* [19], *vitex negundo* [20] y entre otros precursores verdes que sirve de base en la síntesis de nanopartículas de óxido de hierro [11].

El Matico es una planta perenne andina que se conoce desde hace bastante tiempo por pertenecer a una piperácea andina: *Piper angustifolium* (*Piper elongatum Vahl.*). El nombre correcto de esta especie fue dado a conocer por Yuncker, quien la señala sólo para el norte argentino, Bolivia y Perú. El Matico pertenece a la familia de la pimienta o *Piperaceae*. El género *Piper*, que incluye más de 2.000 especies de arbustos, árboles y vid e incluye otras dos plantas de color negro pimienta (*Piper nigrum*) y la kava-java (*Piper methysticum*) [21].

Su componente más importante por el que se atribuye en parte sus virtudes cicatrizantes, es el tanino (polifenol natural), tiene una concentración de 5.7 % y además de numerosos glucósidos, especialmente de tipo flavonoides (luteolina, luteolina 7-glucósido, linarina y derivados del ácido cafeico) con propiedades antioxidantes y protectoras de la membrana celular; también ácido artánico, resinas, esteroides, éster de ácido graso fenólico, terpenos y saponinas. El Matico presenta como compuesto principal a la Canfora (22.68 %), Canfene (21.18 %) e Isoborneol (11.53 %); también contiene alfa pineno, mirceno, limoneno, borneol y terpinol acetato. El aceite esencial contiene 5 metoxi-6(2'-propen)-benzodioxole, dillapiol, etoxidillapiol, mirisicina y piperitona [22].

El objetivo de este estudio fue la obtención de las nanopartículas de óxido de hierro ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) utilizando extracto acuoso de hojas de matico como agente reductor y protector, en presencia del precursor de dos sales de hierro ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), las cuales se sometieron a estudios de caracterización mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X, microscopia electrónica de barrido (SEM), microscopia de sonda de barrido (SPM), espectroscopia de energía dispersa (EDS) y mapeo elemental.

Todos los productos químicos que se utilizaron en este estudio se adquirieron en Industrias Químicas Americana (Cochabamba) y se emplearon sin purificación adicional. Las sales de cloruro férrico hexahidratado ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , 99 % de pureza), el sulfato ferroso heptahidratado ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , 99 % de pureza) e hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ , 99 % de pureza). Se utilizó agua desionizada para todos los procedimientos del estudio. Las hojas de matico (*Piper Elongatum Poir*), se recolectaron en el departamento de Chuquisaca (Bolivia), en el municipio de Huacareta de la provincia Hernando Siles, en la comunidad de Uruguay en las coordenadas 20°29'50.5"S 64°12'40.9"W (Google Maps, 2022).

### B. Preparación del extracto acuoso de las hojas de matico

Las hojas de matico se lavaron tres veces con agua de grifo para quitar las impurezas y/o polvos y se procedió a lavar una cuarta vez con agua desionizada para quitar las impurezas que podría presentar el agua del grifo, se secó a temperatura ambiente por 15 días en la sombra [23], [24], [25]. Las hojas secas se trituraron en un mortero hasta obtener un polvo fino. Para la preparación del extracto se procedió siguiendo el método descrito por [26], [27], con algunas modificaciones donde se agregó 20 gramos del polvo de las hojas de matico a un vaso de precipitado de 2000 ml, al cual se agregó 1000 ml de agua desionizada, luego la mezcla se agito a 800 rpm con un agitador magnético durante 30 minutos a 80 °C. Posterior a esto se enfrió hasta temperatura ambiente para filtrarlo con un papel filtro Whatman Nro. 42, con la ayuda de una bomba de vacío (Lab Tech VP30), el filtrado se almaceno en un recipiente hermético y se refrigeró a una temperatura de 4 °C hasta su posterior aplicación.

### C. Diseño experimental Plackett-Burman

TABLA I  
 VARIABLES DE TRABAJO UTILIZADOS EN EL DISEÑO EXPERIMENTAL DE PLACKETT BURMAN EN LA SÍNTESIS DE NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE HIERRO (IONP) POR SÍNTESIS VERDE

Variable	Factor codificado	Unidad	Nivel inferior (-)	Nivel superior (+)
Temperatura	A	°C	60	80
pH	B		10	11
Tiempo de reacción	C	Minutos	30	60
Tasa de agitación	D	rpm	300	500
Masa $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	E	gr	1,112	3,336
Masa $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	F	gr	0,556	1,112
Volumen del extracto	G	ml	10	15
pH del extracto	H		5,797	6,572
Concentración del NaOH	I	M	0,5	1
Tiempo de secado	J	Minutos	30	60
Temperatura de secado	K	°C	300	400

En este estudio se usó el diseño experimental Plackett-Burman, en el software Design Expert versión 13 para investigar las variables significativas en el proceso de síntesis, las variables de control se muestran en la tabla I, con su nivel inferior (-) y su nivel superior (+) para proceder en la parte experimental.

En este estudio se utilizó el diseño experimental de Plackett Burman para investigar la influencia de las variables de la Temperatura, pH, tiempo de reacción, tasa de agitación, masa de  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , masa de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , volumen del extracto, pH del extracto, concentración del NaOH, tiempo de

secado y temperatura de secado, los rangos de los valores para los diversos parámetros se obtuvieron de la literatura y de las pruebas preliminares. El diseño de Plackett-Burman es un tipo de diseño factorial fraccional que opera bajo la idea de que las interacciones se pueden ignorar por completo y los efectos principales se pueden calcular utilizando experimentos mínimos. Ofrece una forma rápida de seleccionar las variables significativas con menos experimentos de un amplio grupo de variables, ahorrando tiempo con menos variabilidad del proceso y reduce los gastos generales [28], [29].

TABLA II  
VARIABLES DE TRABAJO UTILIZADOS EN EL DISEÑO EXPERIMENTAL DE PLACKETT BURMAN EN LA SÍNTESIS DE NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE HIERRO (IONP) POR SÍNTESIS VERDE

Corridas	Temperatura (°C)	pH	Tiempo de reacción (minutos)	Tasa de agitación (rpm)	Masa $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (gr)	Masa $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (gr)	Volumen de extracto (ml)	pH extracto	Concentración NaOH (M)	Tiempo de secado (minutos)	Temperatura de secado (°C)
1	80	10	60	500	1,112	1,112	15	6,572	0,5	30	300
2	60	11	60	300	3,336	1,112	15	5,797	0,5	30	500
3	60	10	60	300	3,336	1,112	10	6,572	1	60	300
4	80	11	30	300	1,112	1,112	10	6,572	1	30	500
5	60	11	60	500	1,112	0,556	10	6,572	0,5	60	500
6	60	10	30	500	1,112	1,112	15	5,797	1	60	500
7	80	10	30	300	3,336	0,556	15	6,572	0,5	60	500
8	80	11	30	500	3,336	1,112	10	5,797	0,5	60	300
9	80	10	60	500	3,336	0,556	10	5,797	1	30	500
10	60	10	30	300	1,112	0,556	10	5,797	0,5	30	300
11	80	11	60	300	1,112	0,556	15	5,797	1	60	300
12	60	11	30	500	3,336	0,556	15	6,572	1	30	300

De acuerdo al primer experimento como se muestra en la tabla II, se trabajó a 80 °C el tiempo de reacción, a un pH de 10, un tiempo de reacción de 60 minutos, una tasa de agitación de 500 rpm, con una masa de 1,112 gramos de  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , 1.112 gramos de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (1:1), con un volumen de extracto de 15 ml, el pH del extracto de 6.572, 0.5 M de NaOH, con un tiempo de secado de 30 minutos y una temperatura de secado de 300 °C. De esta manera se procedió a realizar las 12 corridas experimentales para la síntesis verde de las nanopartículas de óxido de hierro.

#### D. Síntesis verde de nanopartículas de óxido de hierro

Las nanopartículas de óxido de hierro ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) se sintetizaron con base en el método de coprecipitación en presencia de extracto acuoso de hojas de Matico como agente reductor y protector como se muestra en el diagrama de bloques de la figura 2. De acuerdo a la corrida 1 como se muestra en la tabla II, se agregó 1,112 gramos de  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  a un matraz Erlenmeyer de 250 ml, al cual se agregó 85 ml de

agua desionizada, la mezcla se agito continuamente con una tasa de agitación de 500 rpm, seguido se agregó 1,112 gramos de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , esta mezcla se homogenizo por 10 minutos a una temperatura de 80 °C, luego se agregó 15 ml de extracto de hojas de matico en una bureta gota a gota y se esperó que reaccione por 10 minutos, posterior a esto se agregó gota a gota NaOH al 0,5 M recién preparado hasta obtener un pH de la solución de 10, en lo cual se aprecia a simple vista el cambio de color de verdoso oscuro a negro oscuro que nos indica la formación exitosa de las nanopartículas de óxido de hierro, se dejó completar la reacción por 60 minutos [23], [30], [31]. Después de completar la reacción, las nanopartículas de óxido de hierro se dejaron enfriar hasta temperatura ambiente, posteriormente se procedió a realizar el lavado con agua desionizada por 3 veces con la ayuda de un anillo magnético externo como se muestra en la figura 1 para quitar las impurezas que podrían presentarse.



Fig. 1 Proceso de lavado de las nanopartículas de óxido de hierro.

Y por último las nanopartículas sintetizadas, se agregó todo el precipitado a crisoles de 100 ml para posteriormente poner en la mufla de la marca Nabertherm GmbH, a una temperatura de 300 °C en un tiempo de 30 minutos. Al final las nanopartículas de óxido de hierro producidas se etiquetaron en recipientes herméticos para su posterior análisis. De manera similar se procedió con las demás corridas desde la corrida 2 a la corrida 12 con las condiciones que indica en la matriz de diseño experimental.

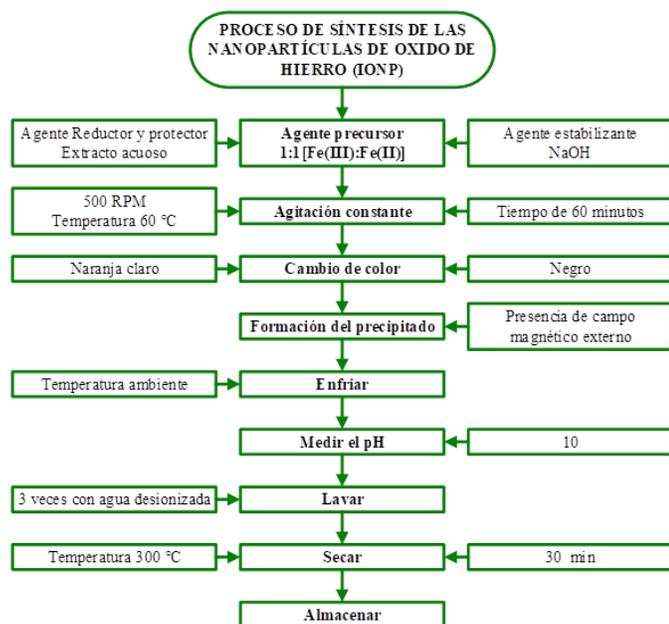


Fig. 2 Diagrama de síntesis de las nanopartículas de óxido de hierro (IONP).

### E. Caracterización

Para analizar los compuestos fitoquímicos que presenta el extracto de las hojas de matico se analizó utilizando el Espectrofotómetro en relación a quercetina, modelo ESPECTROQUANT PHARO 300, para identificar Flavonoides Totales que contiene el extracto acuoso. La determinación de la composición elemental de las nanopartículas sintetizadas se usó el espectrómetro de fluorescencia de rayos X (ELVAX) de mesa. Para identificar

la morfología y tamaño de las nanopartículas de óxido de hierro obtenidas se caracterizaron mediante Microscopio de Sonda de Barrido (SPM) marca NATSYCO y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) de 3ra generación de TESCAN VEGA 3. Además, se utilizó en el mismo SEM de TESCAN VEGA 3, para los análisis de la Espectrometría de rayos X de energía dispersa (EDX) para determinar la composición de las nanopartículas de óxido de hierro obtenidas y el mapeo elemental ya que estos dos últimos vienen acoplados al SEM de TESCAN VEGA 3.

## III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### A. Análisis del extracto acuoso de las hojas de matico

El estudio de espectrofotometría del extracto acuoso de las hojas del Matico se identificó la presencia de Flavonoides totales, ya que estos son uno de los fitoquímicos más importantes en la síntesis verde de las nanopartículas de óxido de Hierro (Magnetita), donde se llegaron a identificar que el extracto que se preparó con agua con una presencia de 0,087 mgEQ/mL (miligramos equivalentes de Quercetina/milímetros de extracto) del extracto con una desviación estándar de 0,001.

### B. Preparación de las nanopartículas de $Fe_3O_4$

El esquema de la síntesis de las nanopartículas de óxido de hierro se muestra en la figura 3. Los diversos fitoquímicos como ser fenilpropanoides y terpenoides, que son subgrupos de los compuestos fenólicos y terpenos [32], alcaloides, compuestos fenólicos, esteroides y flavonoides [33], [34], presentes en el extracto acuoso de las hojas de matico actúan como agentes reductores y estabilizantes en la síntesis de las nanopartículas de óxido de hierro. Las nanopartículas se sintetizaron en dos volúmenes diferentes de extractos acuoso de hojas de matico que van desde los 10 ml a 15 ml, se observó el cambio de color en la mezcla de las sales de hierro de color amarillo mostaza a color verde oscuro después de agregar el extracto gradualmente, posterior a esto se agrega el NaOH al 0,5 M para ayudar a estabilizar la reacción hasta un pH alcalino de 10 en la cual se formó un precipitado magnético de color negro completando las reacción en la formación de las nanopartículas de óxido de hierro [35]. La formación del precipitado al final de la reacción de color negro nos indica que se produjo la interacción entre estos fitoquímicos (flavonoides, polifenoles, taninos) del extracto acuoso de las hojas del matico y los iones metálicos de las sales, lo que garantiza la formación de las nanopartículas de óxido de hierro ( $Fe_3O_4$ ) [36].

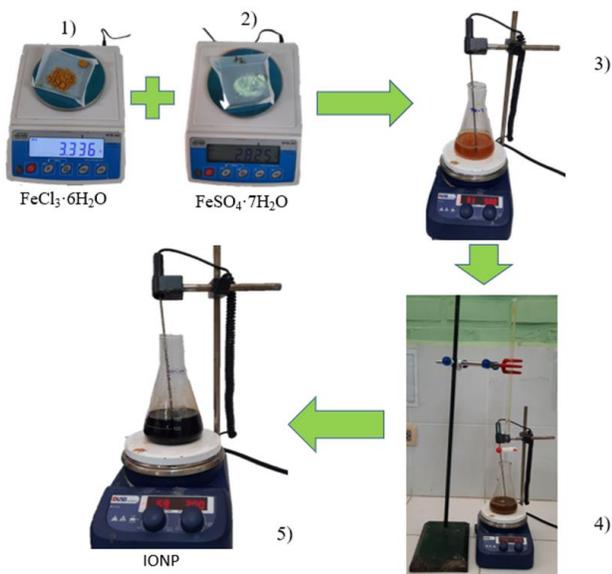


Fig. 3 Ilustración esquemática de la preparación de las nanopartículas de óxido de hierro a partir de extracto de hoja de matico, 1) Pesado de la sal  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , 2) Pesado de la sal  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , 3) Agregar el extracto acuoso de hoja de matico, 4) Agregar el  $\text{NaOH}$  al 0,5 M, 5) Terminado la reacción de síntesis de las nanopartículas de óxido de hierro.

### C. Análisis de la composición de hierro en las nanopartículas de $\text{Fe}_3\text{O}_4$ por espectrometría de fluorescencia de rayos X

Las IONP (2-3 gr por muestra) se escanearon en el Espectrómetro XRF profesional para análisis de alta precisión-ElvaX Pro, lo que permitió cuantificar la concentración del elemento en la muestra [37]. Los resultados obtenidos indican que la señal de fluorescencia correspondiente a Fe se encuentra dentro del rango característico de la magnetita, confirmando su presencia como fase mayoritaria. El espectro de XRF revelaron un pico intenso y uno menos intenso como se muestra en la figura 4, en las longitudes de onda asociadas a la emisión característica del hierro, lo que sugiere una alta pureza en la muestra. Además, el análisis cuantitativo mostró un contenido de Fe consistente de las 12 pruebas que van desde 98,8283 hasta 99,9965 % en composición de hierro. La baja intensidad de señales asociadas a otros elementos sugiere una síntesis controlada con mínima contaminación. Estos resultados concuerdan con análisis previos reportados en la literatura, lo que respalda la efectividad del método de síntesis empleado.

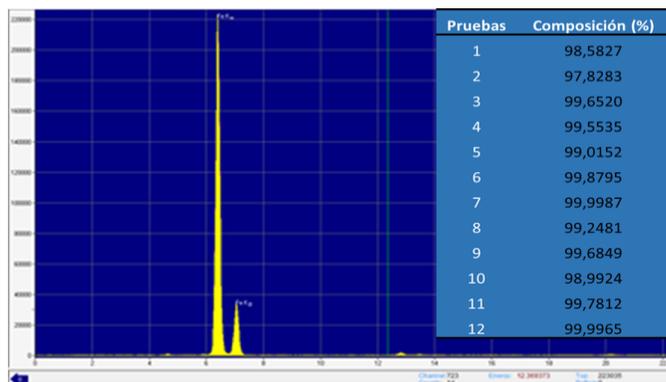


Fig. 4 Composición de las nanopartículas de óxido de hierro (IONP).

### D. Análisis del diseño experimental de Plackett-Burman en la síntesis de IONP

El diseño de Plackett-Burman (PBD) es una técnica de selección muy eficaz que se utiliza para discernir componentes significativos de una amplia gama de factores que influyen en un proceso determinado. El proceso de modelado matemático utilizó el modelo polinomial de primer orden de la siguiente manera:

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i \quad (1)$$

En la ecuación 1, Y representa la respuesta esperada,  $\beta_0$  denota la intersección del modelo,  $\beta_i$  representa el coeficiente lineal y  $X_i$  representa el nivel de la variable independiente [38]. Se utilizó el programa estadístico Design Expert versión 13 para el análisis posterior. En la tabla III, se presentan en la columna 1, las 12 corridas experimentales realizadas, en la columna 2 la variable de respuesta que es el tamaño de las nanopartículas se obtuvo a partir del análisis del SPM y en la columna 3 se tiene la desviación estándar.

TABLA III  
DISEÑO Y RESPUESTA DE PLACKETT-BURMAN PARA LA OBTENCIÓN DE LAS NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE HIERRO

Corrida	Tamaño NP (nm)	Desviación Estándar
1	160	±28,284
2	151	±60,811
3	93,50	±72,832
4	112,50	±82,731
5	22,50	±19,092
6	25,75	±15,910
7	10,38	±8,853
8	28,50	±37,477
9	123,50	±71,418
10	49,50	±61,518
11	80	±56,569
12	46,93	±25,884

Las principales variables que influyen en el proceso de obtención de las nanopartículas de óxido de hierro se representan visualmente mediante el diagrama de Pareto [38]. El efecto estandarizado de cada parámetro solo o el efecto combinado de los parámetros se muestra en la Figura 5, se tiene 3 variables principales que son la masa del  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , el volumen del extracto y el tiempo de reacción son las variables principales que sobrepasan el límite de Bonferroni de 5,74651 son estadísticamente significativas siendo las variables principales que impactaron directamente en los resultados que se obtuvieron, la temperatura está dentro del rango del límite del valor t de 2,77645, lo cual es una variable que llega a influir en el error estándar y es un factor probablemente significativo, los demás factores no son significativos. El grado en el que los factores experimentales pueden explicar la variabilidad en los valores de respuesta observados se muestra mediante el valor  $R^2$ . Se descubrió que el valor  $R^2$  para el proceso de obtención de las nanopartículas de óxido de hierro usando extracto acuoso de hojas de matico fue de 98,36 %. Además, el  $R^2$  ajustado 95,50 % que es excepcionalmente alto lo que indica la importancia en la obtención de las nanopartículas de óxido de hierro.

#### Tamaño de las nanopartículas

- A: Temperatura
- B: pH
- C: Tiempo de reacción
- D: Tasa de agitación
- E: Masa  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
- F: Masa  $\text{FeSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
- G: Volumen extracto
- H: pH del extracto
- J: Concentración NaOH
- K: Tiempo de secado
- L: Temperatura de secado

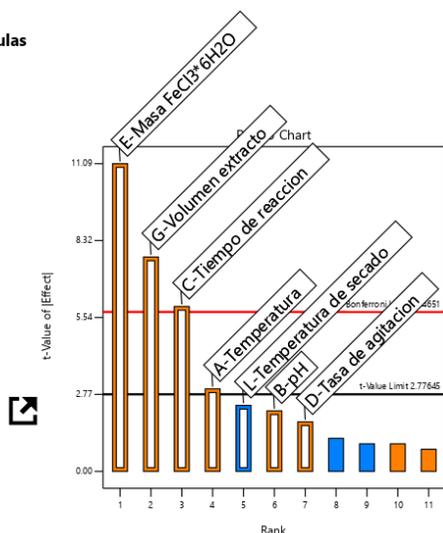


Fig. 5 Diagrama de Pareto que indica los parámetros significados en la obtención de las IONP.

En la tabla IV, se puede apreciar el ANOVA, los valores que se obtuvieron son significativos para el modelo general un valor F de 33,34 implica que el modelo es significativo. Solo hay un 0.21 % de posibilidad de que se produzca un valor F tan grande debido al ruido. Los valores P inferiores a 5 % indican que el modelo es significativo. En este caso A, C, E y G son términos significativos del modelo. Los valores superiores a 0,1000 indican que los términos del modelo no son significativos.

TABLA IV  
ANÁLISIS DE LA VARIANZA (ANOVA) EN LA OBTENCIÓN DE LAS NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE HIERRO

Fuente	Suma de cuadrados	df	Cuadrado medio	F-valor	P-valor	
Modelo	2042,67	7	291,81	34,33	0,0021	significativo
A- Temperatura	75	1	75	8,82	0,0411	*
B-pH	40,33	1	40,33	4,75	0,0949	*
C-Tiempo de reacción	300	1	300	35,29	0,004	*
D-Tasa de agitación	27	1	27	3,18	0,1493	*
E-Masa $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1045,33	1	1045,33	122,98	0,0004	*
G-Volumen extracto	507	1	507	59,65	0,0015	*
L- Temperatura de secado	48	1	48	5,65	0,0763	*
Residual	34	4	8,5	*	*	*
Cor Total	2076,67	11	*	*	*	*

#### E. Caracterización mediante SEM

La morfología de las nanopartículas de óxido de hierro se muestra en la figura 6, mediante el análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) se empleó para determinar el tamaño, forma y las dimensiones de las nanopartículas de óxido de hierro. Dentro de las imágenes del SEM, la imagen de las nanopartículas indica que la síntesis fue exitosa en la obtención de las nanopartículas de óxido de hierro que van en la prueba 1 con un rango de tamaño desde 50,50-95,82 nm de tamaño y para la prueba 2 con un rango de tamaño desde 77,32-179,02 nm de tamaño, estas nanopartículas exhibieron una morfología esféricas irregulares que muestran tendencias a aglomeraciones observada en las imágenes probablemente se atribuye a interacciones electrostáticas entre las superficies de las nanopartículas y al campo magnético que presentan estas nanopartículas de óxido de hierro como lo reportaron distintos autores en sus estudios que llevaron a cabo la caracterización por SEM [39], [40], [41].

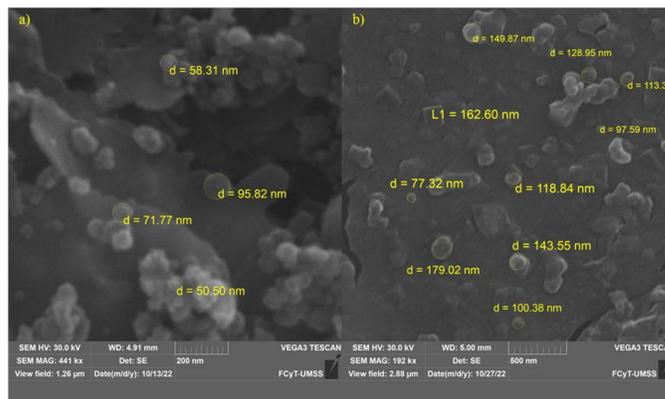


Fig. 6 Micrografías del tamaño de las nanopartículas de óxido de hierro (IONP) analizadas por microscopía electrónica de barrido (SEM), a) prueba experimental 1, b) prueba experimental 2.

### F. Caracterización mediante SPM

En la figura 7 se puede apreciar el análisis por microscopia de sonda de barrido (SPM) para la corrida 5, a) el histograma del tamaño de las nanopartículas que se tienen, entre un rango de 12-30 nm de tamaño con una media de 21 nm de tamaño aproximadamente para lo cual presenta dos picos característicos que pueden darse debido a las fluctuación en la medición de la muestra, b) se observó en la imagen de 2D de 160,2 x 160,2 nm de resolución analizada, la formación de nanopartículas de entre 4,12-12,64 nm de tamaño con una tendencia a formar cadenas o agrupaciones que es común en este tipo de nanopartículas, c) se puede observar las superficies del material analizado a escala atómica de 4,12-12,64 nm, pudiéndose apreciar las formas de las nanopartículas de esferas irregulares aproximadamente con presencia de algunas aglomeraciones presentes debido al material que presenta un campo magnético, d) se puede observar la imagen mejorada con el software de análisis de micrográficas de SPM Gwyddion, en la cual se aprecia con más claridad las formas de las nanopartículas que van de esferas irregulares a formar semillas con una dirección bien definida en la formación de bandas o franjas podría indicar una tendencia a la agregación o formación de cadenas de nanopartículas. Este comportamiento es común en nanopartículas magnéticas debido a las interacciones dipolares que presentan.

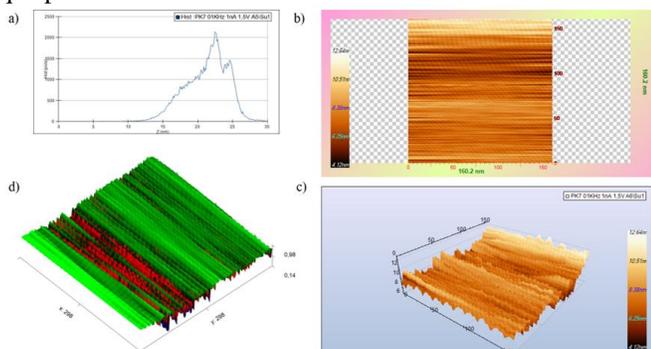


Fig. 7 Imágenes mediante el SPM, a) Histograma, b) Micrografía en 2D, c) Micrografía en 3D, d) Imagen mejorada con Gwyddion de Microscopia de Sonda de Barrido (SPM).

### G. Caracterización mediante espectroscopia de energía dispersa (EDX)

El análisis EDX de las nanopartículas nos muestra el estado cualitativo y cuantitativo en la fabricación de las nanopartículas de óxido de hierro. Este análisis mostro que el espectro EDX contenía picos intensos de Fe y O, además de picos menores de Zn y Si. Los picos de Fe y O se podrían haberse originado a partir de las sales precursoras de Hierro que se usaron en la síntesis y los picos de Zn y Si podrían haberse originado debido a la presencia de compuestos fenólicos en el extracto de las hojas de matico [42]. En la figura 8, en el análisis de espectroscopia de energía dispersa (EDX) de las nanopartículas de óxido de hierro (IONP), se puede apreciar la composición elemental en un 73,8 % de

Hierro y un 24,6 % de Oxígeno, llegando a formarse el óxido de hierro más conocido como Magnetita [43]. Estos valores también podrían ser útiles para observar el contenido atómico en la superficie y cerca de la región de la superficie de las nanopartículas producidas.

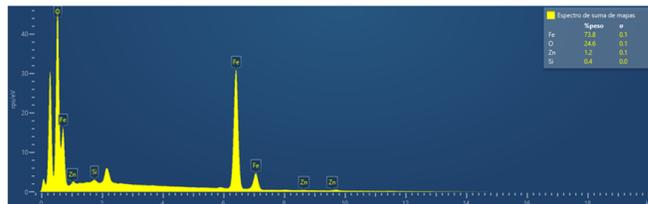


Fig. 8 Análisis de espectroscopia de rayos X de energía dispersa (EDX) de las nanopartículas de óxido de hierro (IONP).

### H. Análisis mediante mapeo elemental

En la figura 9, muestra en el mapeo elemental donde se puede observar una señal alta de Hierro, seguido por Oxígeno, más algunas trazas de otros elementos como ser el Oro que puede ser a consecuencia del recubrimiento que se realizó en la preparación de la muestra, Carbono puede ser la presencia del extracto o de la cinta de los pings en la preparación de la muestra y cloro por las sales de hierro que aún quedan trazas.

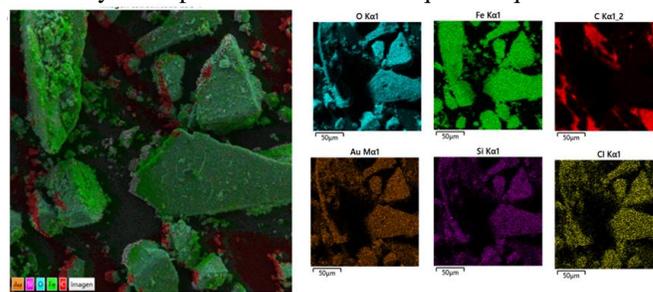


Fig. 9 Mapeo elemental de las nanopartículas de óxido de hierro (IONP), Generado por el software Essence™ de TESCAN.

## IV. CONCLUSIONES

Se ha demostrado la obtención de nanopartículas magnéticas de óxido de hierro a partir del uso de extracto acuoso de hojas de matico, donde los parámetros más influyentes fueron la masa de cloruro férrico hexahidratado, el volumen del extracto acuoso de las hojas de matico, el tiempo de reacción y la temperatura de reacción de acuerdo al análisis experimental de Plackett-Burman. La presencia de flavonoides totales en el extracto fue verificada por espectrofotometría, lo que sugiere su papel en la reducción y estabilización de las nanopartículas de óxido de hierro. La morfología y el tamaño de las nanopartículas de óxido de hierro se verifico mediante el uso de un SEM de 50,50 nm las más pequeñas, y las más grandes de 179,02 nm y con SPM en los cuales se verifico que van desde los 10,38 nm hasta los 160 nm de tamaño con formas de esferas con irregulares que muestran tendencias a aglomeraciones observada en las imágenes probablemente se atribuye a interacciones electrostáticas entre las superficies de las nanopartículas y al campo magnético que presentan estas nanopartículas de óxido de hierro, la diferencia de tamaños en

ambos equipos se puede dar debido a que son diferentes las técnicas de medición y el SPM es un equipo académico con relación al SEM es un equipo de investigación en su clase 3. Además, el análisis EDX y el mapeo elemental permitieron constatar la composición química de las nanopartículas, revelando un contenido de 73,8 % de hierro y 24,6 % de oxígeno, lo que indica una adecuada formación y cristalización durante la fabricación de las nanopartículas de óxido de hierro (magnetita).

#### AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen a la Universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, al Centro de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos de la Facultad de Ciencias y Tecnología (CIDPROQ) por la realización de las pruebas experimentales.

#### REFERENCIAS

- [1] R. Dawn *et al.*, "Origin of Magnetization in Silica-coated Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanoparticles Revealed by Soft X-ray Magnetic Circular Dichroism," *Brazilian Journal of Physics*, vol. 52, no. 3, pp. 1–12, Jun. 2022, doi: 10.1007/S13538-022-01102-X/FIGURES/7.
- [2] C. Martins *et al.*, "Enhancing the magnetic properties of superparamagnetic iron oxide nanoparticles using hydrothermal treatment for magnetic hyperthermia application," *Mater Adv*, vol. 6, no. 5, pp. 1726–1743, Feb. 2025, doi: 10.1039/D4MA01120A.
- [3] M. El Ghanjaoui, A. Soufi, Y. Kadmi, N. Barka, and H. Tounsadi, "Sustainable synthesized iron oxide nanoparticles as a highly efficient material for degradation of dyes: Characterization and statistical optimization approach," *Chemosphere*, vol. 376, p. 144266, May 2025, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2025.144266.
- [4] B. E. Keshta *et al.*, "State of the art on the magnetic iron oxide Nanoparticles: Synthesis, Functionalization, and applications in wastewater treatment," *Results Chem*, vol. 7, p. 101388, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.RECHEM.2024.101388.
- [5] P. Chauhan, D. Kumar, and R. Sharma, "Biogenic magnetic iron oxide nanoparticles for multifunctional applications in environmental remediation and biomedical field," *J Environ Chem Eng*, vol. 13, no. 2, p. 115646, Apr. 2025, doi: 10.1016/J.JECE.2025.115646.
- [6] P. Chauhan, D. Kumar, and R. Sharma, "Biogenic magnetic iron oxide nanoparticles for multifunctional applications in environmental remediation and biomedical field," *J Environ Chem Eng*, vol. 13, no. 2, p. 115646, Apr. 2025, doi: 10.1016/J.JECE.2025.115646.
- [7] C. Alex Mbach, A. Kamoru Babayemi, T. Chinedu Egbosiuba, J. Ifeanyi-chukwu Ike, I. Jacinta Ani, and S. Mustapha, "Green synthesis of iron oxide nanoparticles by Taguchi design of experiment method for effective adsorption of methylene blue and methyl orange from textile wastewater," *Results in Engineering*, vol. 19, p. 101198, Sep. 2023, doi: 10.1016/J.RINENG.2023.101198.
- [8] A. Imtiyaz, A. Singh, and A. Bhardwaj, "Green synthesis of iron oxide nanoparticles from Iris kashmiriana (Mazar-Graveyard) Plant Extract its characterization of biological activities and photocatalytic activity," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 143, pp. 538–551, Mar. 2025, doi: 10.1016/J.JIEC.2024.09.004.
- [9] Z. Tao, Q. Zhou, T. Zheng, F. Mo, and S. Ouyang, "Iron oxide nanoparticles in the soil environment: Adsorption, transformation, and environmental risk," *J Hazard Mater*, vol. 459, p. 132107, Oct. 2023, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2023.132107.
- [10] J. Yang, M. Du, W. Wu, Q. Chen, J. Niu, and Z. Zhang, "Polyaniline-modified iron oxide nanoparticles to improve the overall performance of MFC-BOD sensors," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 71, p. 107189, Mar. 2025, doi: 10.1016/J.JWPE.2025.107189.
- [11] S. Ashrafi-Saiedlou, M. H. Rasouli-Sadaghiani, and M. Fattahi, "Green synthesis of iron oxide nanoparticles using Thymus migricus for multifunctional applications in antioxidant, antimicrobial, photocatalytic, and seed priming processes," *Heliyon*, vol. 11, no. 5, p. e42933, Mar. 2025, doi: 10.1016/J.HELIYON.2025.E42933.
- [12] M. S. H. Bhuiyan *et al.*, "Green synthesis of iron oxide nanoparticle using Carica papaya leaf extract: application for photocatalytic degradation of remazol yellow RR dye and antibacterial activity," *Heliyon*, vol. 6, no. 8, p. e04603, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.HELIYON.2020.E04603.
- [13] A. Imtiyaz, A. Singh, and A. Bhardwaj, "Green synthesis of iron oxide nanoparticles from Iris kashmiriana (Mazar-Graveyard) Plant Extract its characterization of biological activities and photocatalytic activity," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 143, pp. 538–551, Mar. 2025, doi: 10.1016/J.JIEC.2024.09.004.
- [14] R. Shanmugam, S. Shree B, J. Anandan, T. Abalkhail, A. M. S. Alqahtani, and A. Roy, "Green synthesis of iron oxide nanoparticles using Cissus rotundifolia and its antibacterial activity against wound pathogens," *Journal of the Indian Chemical Society*, vol. 102, no. 3, p. 101599, Mar. 2025, doi: 10.1016/J.JICS.2025.101599.
- [15] N. C. Nkosi, A. K. Basson, Z. G. Ntombela, N. G. Dlamini, and R. V. S. R. Pullabhotla, "Green synthesis and characterization of iron nanoparticles synthesized from biofloculant for wastewater treatment: A review," *Biotechnology Notes*, vol. 6, pp. 10–31, Jan. 2025, doi: 10.1016/J.BIOTNO.2024.12.001.
- [16] R. Shanmugam, S. Shree B, J. Anandan, T. Abalkhail, A. M. S. Alqahtani, and A. Roy, "Green synthesis of iron oxide nanoparticles using Cissus rotundifolia and its antibacterial activity against wound pathogens," *Journal of the Indian Chemical Society*, vol. 102, no. 3, p. 101599, Mar. 2025, doi: 10.1016/J.JICS.2025.101599.
- [17] A. M. Ali *et al.*, "Green and chemical synthesis of iron oxide nanoparticles: Comparative study for antimicrobial activity and toxicity concerns," *J Drug Deliv Sci Technol*, vol. 103, p. 106434, Jan. 2025, doi: 10.1016/J.JDDST.2024.106434.
- [18] J. Yadav, P. Chauhan, R. K. Rawat, S. K. Pathak, and S. Srivastava, "Syzygium aromaticum-mediated green synthesis of iron oxide nanoparticles for efficient heavy metal removal from aqueous solutions," *Journal of the Indian Chemical Society*, vol. 101, no. 8, p. 101201, Aug. 2024, doi: 10.1016/J.JICS.2024.101201.
- [19] G. A. Alamu, P. S. Ayanlola, K. K. Babalola, O. Adedokun, Y. K. Sanusi, and G. R. Fajinmi, "Green synthesis and characterizations of magnetic iron oxide nanoparticles using Moringa oleifera extract for improved performance in dye-sensitized solar cell," *Chemical Physics Impact*, vol. 8, p. 100542, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.CHPHI.2024.100542.
- [20] T. Vigneswari, G. Kanthimathi, and L. Muthulakshmi, "Superparamagnetic properties of iron oxide nanoparticles using vitex negundo leaf extract by green synthesis method and its antimicrobial activity against wound pathogen," *Mater Today Proc*, Jul. 2023, doi: 10.1016/J.MATPR.2023.06.293.
- [21] Y. G. Lopez Gavincha, "Evaluación de la toxicidad aguda y subaguda en ratones de los extractos hidroalcohólicos de las especies vegetales: urtiga urens l. (Ortiga) y piper elongatum poir. (Matico), utilizados tradicionalmente en Bolivia para afecciones inflamatorias, reumáticas e infecciosas," 2012.
- [22] A. Ruiz Rodríguez, J. T. Huaman, D. Dante, and C. Flores, "Piper aduncum L. (matico) utilizado como tratamiento para el daño pulmonar y Covid-19," *Revista de investigación en salud*, vol. 4, no. 1, pp. 534–549, 2021, doi: 10.33996/revistavive.v4i12.111.
- [23] A. V. Ramesh, D. Rama Devi, S. Mohan Botsa, and K. Basavaiah, "Facile green synthesis of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles using aqueous leaf extract of Zanthoxylum armatum DC. for efficient adsorption of methylene blue," *Journal of Asian Ceramic Societies*, vol. 6, no. 2, pp. 145–155, Apr. 2018, doi: 10.1080/21870764.2018.1459335.
- [24] F. Nadeem *et al.*, "Characterization, Antiplasmodial and Cytotoxic Activities of Green Synthesized Iron Oxide Nanoparticles Using Nephrolepis exaltata Aqueous Extract," *Molecules*, vol. 27, no. 15, p. 4931, Aug. 2022, doi: 10.3390/MOLECULES27154931.
- [25] A. Adhikari, K. Chhetri, D. Acharya, B. Pant, and A. Adhikari, "Green Synthesis of Iron Oxide Nanoparticles Using Psidium guajava L. Leaves Extract for Degradation of Organic Dyes and Anti-microbial Applications," *Catalysts*, vol. 12, no. 10, p. 1188, Oct. 2022, doi: 10.3390/CATAL12101188/S1.
- [26] K. Motene, L. M. Mahlaule-Glory, N. M. Ngoepe, M. M. Mathipa, and N. C. Hintsho-Mbita, "Photocatalytic degradation of dyes and removal of

- bacteria using biosynthesised flowerlike NiO nanoparticles,” *Int J Environ Anal Chem*, Jan. 2021, doi: 10.1080/03067319.2020.1869730.
- [27] L. M. Mahlaule-Glory, S. Mapetla, A. Makofane, M. M. Mathipa, and N. C. Hintsho-Mbita, “Biosynthesis of iron oxide nanoparticles for the degradation of methylene blue dye, sulfisoxazole antibiotic and removal of bacteria from real water,” *Heliyon*, vol. 8, no. 9, p. e10536, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.HELİYON.2022.E10536.
- [28] M. M. Fazil, A. Gul, and H. Jawed, “Optimization of silver nanoparticles synthesis via Plackett–Burman experimental design: in vitro assessment of their efficacy against oxidative stress-induced disorders,” *RSC Adv*, vol. 14, no. 29, pp. 20809–20823, Jun. 2024, doi: 10.1039/D4RA02774D.
- [29] A. Asfaram, M. Ghaedi, and A. Goudarzi, “Optimization of ultrasound-assisted dispersive solid-phase microextraction based on nanoparticles followed by spectrophotometry for the simultaneous determination of dyes using experimental design,” *Ultrason Sonochem*, vol. 32, pp. 407–417, Sep. 2016, doi: 10.1016/J.ULTSONCH.2016.04.009.
- [30] N. D. S. Zambri, N. I. Taib, F. A. Latif, and Z. Mohamed, “Utilization of Neem Leaf Extract on Biosynthesis of Iron Oxide Nanoparticles,” *Molecules*, vol. 24, no. 20, p. 3803, Oct. 2019, doi: 10.3390/MOLECULES24203803.
- [31] P. K. Dhar, P. Saha, M. K. Hasan, M. K. Amin, and M. R. Haque, “Green synthesis of magnetite nanoparticles using *Lathyrus sativus* peel extract and evaluation of their catalytic activity,” *Clean Eng Technol*, vol. 3, pp. 1001–1017, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.CLET.2021.100117.
- [32] O. Lock and R. Rojas, “Vista de Química y Farmacología del Piper aduncum L. (‘Matico’),” *Química*, vol. 1, no. 1, pp. 1–6, 2004, Accessed: Feb. 05, 2025. [Online]. Available: <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/18713/18954>
- [33] M. Rodrigues Lizana and W. W. Ochoa Yupanqui, “Actividad biocida del extracto crudo etanólico crudo del *Piper elongatum* ‘Matico’ en cervicitis en mujeres en edad fértil, como alternativa terapéutica,” *Journal of the Selva Andina Research Society*, vol. 11, no. 1, pp. 1–20, 2020, doi: 10.36610/j.jsars.2020.110100029.
- [34] A. Ruiz Rodríguez, T. Huaman Jovencio, D. D. Corrilla Flores, and Ore Areche. Franklin, “Piper Aduncum L. (matico) utilizado como tratamiento para el daño pulmonar y Covid-19,” *Revista de Investigación en Salud*, vol. 4, no. 12, pp. 1–16, 2021, doi: 10.33996/revistavive.v4i12.111.
- [35] G. Alamu Ayinde, P. Ayanlola Sola, K. Babalola Kuburat, O. Adedokun, Y. Sanusi Kolawole, and G. R. Fajinmi, “Green synthesis and characterizations of magnetic iron oxide nanoparticles using *Moringa oleifera* extract for improved performance in dye-sensitized solar cell,” *Chemical Physics Impact*, vol. 8, p. 100542, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.CHPHI.2024.100542.
- [36] M. S. H. Bhuiyan *et al.*, “Green synthesis of iron oxide nanoparticle using *Carica papaya* leaf extract: application for photocatalytic degradation of remazol yellow RR dye and antibacterial activity,” *Heliyon*, vol. 6, no. 8, pp. e04-603, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.HELİYON.2020.E04603.
- [37] P. Sosa, G. Guild, G. Burgos, M. Bonierbale, and T. zum Felde, “Potential and application of X-ray fluorescence spectrometry to estimate iron and zinc concentration in potato tubers,” *Journal of Food Composition and Analysis*, vol. 70, pp. 22–27, Jul. 2018, doi: 10.1016/J.JFCA.2018.03.004.
- [38] O. Larabi, A. Amara-Rekkab, A. Didi, and M. A. Didi, “Plackett-Burman and Box-Wilson designs for the removal of mercury (II) by cypress pines and leaves, optimizing the surrounding conditions,” *Desalination Water Treat*, vol. 318, p. 100342, Apr. 2024, doi: 10.1016/J.DWT.2024.100342.
- [39] S. Zafar, A. Farooq, S. Batoool, T. Tariq, M. Hasan, and G. Mustafa, “Green synthesis of iron oxide nanoparticles for mitigation of chromium stress and anti-oxidative potential in *Triticum aestivum*,” *Hybrid Advances*, vol. 5, p. 100156, Apr. 2024, doi: 10.1016/J.HYBADV.2024.100156.
- [40] A. Şahin, Ş. Altınsoy, and K. Kızılbey, “An approach for cationic dyes removal from wastewater: Green synthesis of iron nanoparticles using *Prunus avium* stems extracts,” *Kuwait Journal of Science*, vol. 51, no. 3, p. 100226, Jul. 2024, doi: 10.1016/J.KJS.2024.100226.
- [41] S. Bhaskar, K. V. Apoorva, S. Ashraf, and T. Athul Devan, “Synthesis and application of iron nanoparticles from scrap metal for triclosan degradation in water via Fenton and Sono-Fenton oxidation,” *Waste Management Bulletin*, vol. 3, no. 1, pp. 293–300, Apr. 2025, doi: 10.1016/J.WMB.2025.01.012.
- [42] H. F. Kiwumulo, H. Muwonge, C. Ibingira, M. Lubwama, J. B. Kirabira, and R. T. Ssekitoleko, “Green synthesis and characterization of iron-oxide nanoparticles using *Moringa oleifera*: a potential protocol for use in low and middle income countries,” *BMC Res Notes*, vol. 15, no. 1, pp. 1–8, Dec. 2022, doi: 10.1186/S13104-022-06039-7/FIGURES/2.
- [43] S. T. Shah *et al.*, “Surface Functionalization of Magnetite Nanoparticles with Multipotent Antioxidant as Potential Magnetic Nanoantioxidants and Antimicrobial Agents,” *Molecules* 2022, Vol. 27, Page 789, vol. 27, no. 3, p. 789, Jan. 2022, doi: 10.3390/MOLECULES27030789.