

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE QUÍMICA



TESIS

**OBTENCIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE MAGNETITA POR SÍNTESIS VERDE Y SU
APLICACIÓN EN LA REMOCIÓN DE CADMIO, CROMO Y COBRE EN AGUAS
SINTÉTICAS**

PRESENTADO POR:

Br. JEAN PAUL RAUL LOAIZA MIRANDA
Br. VICTOR SABIDT NAVARRETE QUISPE

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE
QUÍMICO**

ASESORA:

Mgt. CORINA FERNANDA ALVAREZ NUÑEZ

CO-ASESORA:

Mgt. SONIA ARAGON MAMANI

CUSCO – PERÚ

2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, Asesor del trabajo de investigación/tesis titulada: Obtención de Nanopartículas de Magueta por Síntesis Verde y su Aplicación en la Remoción de Cadmio, Cromo y cobre en Aguas Sintéticas

presentado por: Jean Paul P. Loiza Miranda con DNI Nro.: 60429339 presentado por: Victor S. Navarrete Quispe con DNI Nro.: 70448968 para optar el título profesional/grado académico de Químico

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 03 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 9 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 02 de Diciembre de 2024

Firma

Post firma Roxana F. Alvarez Nuñez

Nro. de DNI 25310702

ORCID del Asesor 0000-0002-5476-7640

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid: 27259:410316269

Jean Paul Raul Loaiza Miranda Víctor Sabidt Navar...

OBTENCIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE MAGNETITA POR SÍNTESIS VERDE Y SU APLICACIÓN EN LA REMOCIÓN DE CA...

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:410316269

Fecha de entrega

28 nov 2024, 1:12 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

28 nov 2024, 1:29 p.m. GMT-5

Nombre de archivo

TESIS_REVISION_FINAL.pdf

Tamaño de archivo

1.6 MB

119 Páginas

21,559 Palabras

117,206 Caracteres

9% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Exclusiones

- ▶ N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 6%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 6%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



.....
Mgt. Corina Fernanda Álvarez Núñez

Asesor

Departamento Académico de Química

e-mail: corina.alvarez@unsaac.edu.pe



Quím. Sonia Aragón Mamani
CQP: 1020

.....
Mgt. Sonia Aragón Mamani

Co-Asesor

Departamento Académico de Química

e-mail: sonia.aragon@unsaac.edu.pe

DEDICATORIA

A mi madre, Nely, por ser un pilar en mi vida académica y profesional, por enseñarme a nunca darme por vencido. A mi padre, Raúl, cuya fuerza y perseverancia ha sido mi inspiración constante al enseñarme el valor del esfuerzo, la dedicación y el sacrificio. A mi querida Amparo, quien fue un faro de constancia y aliento en cada momento de incertidumbre. A mis hermanos, cómplices de risas, aliados en desafíos y pilares de apoyo. A mis amigos, por hacer de la universidad la mejor época de mi juventud. A Summer, mi fiel compañero y fuente de alegría con cada ladrido. Este logro es para todos ustedes, esperando que se sientan muy orgullosos.

Jean Paul Raul Loaiza Miranda

Con todo mi corazón, dedico este logro a mi madre, Yolinda, la primera persona que apostó por mí. A mi padre, Sabino, cuyo recuerdo es la razón de mi resiliencia. A mis abuelos y segundos padres, Rosa y Sabino, por sus constantes consejos y apoyo incondicional. A mi compañera de vida, Marcela, que me hace sentir fuerte en los días en que soy más vulnerable. A mis tíos, Abelardo y Rosel, brújulas de mi moral e integridad. A mis primos, Rovi, Darwin y Edith, con quienes puedo hablar sobre "The Office". A mis amigos, Eliut, Jean Paul, Andrio, Salvador y Anthony, que han hecho mi vida más emocionante. Y a todas las personas que me apoyaron pero que estas líneas no pudieron alcanzar, este logro es dedicado a ustedes.

Victor Sabidt Navarrete Quispe

AGRADECIMIENTOS

A los metales pesados que se comportaron de manera predecible y a las nanopartículas, que decidieron reaccionar según lo esperado. Mi gratitud a las pruebas exploratorias que fueron un desafío, pero dieron lugar a resultados sorprendentes. A mi familia, que ha sido mi solución saturada de apoyo, y a nuestras asesoras de tesis, cuya paciencia ha sido más estable que un enlace covalente. Gracias a todos por formar parte de esta reacción en cadena que ha sido esta investigación. Sin ustedes, esta tesis hubiera sido más difícil que balancear una ecuación química sin coeficientes adecuados.

Jean Paul Raul Loaiza Miranda

A todos mis profesores, que durante esta investigación y en mi vida han dejado una huella profunda en mi pensamiento y ha sido fundamental para despertar mi amor por la ciencia, y en especial por la Química. Cada uno de ustedes ha contribuido de manera significativa a mi desarrollo intelectual, y estoy agradecido por el regalo invaluable de su enseñanza y orientación.

Victor Sabidt Navarrete Quispe

RESUMEN

Actualmente, la presencia de metales pesados en el agua es motivo de preocupación debido al impacto ambiental que estos producen, por lo cual es importante buscar alternativas que puedan reducir dicho impacto. En esta investigación se sintetizaron nanopartículas de magnetita mediante coprecipitación química a partir de sales de hierro II y III y usando el extracto acuoso del marlo de maíz morado (*Zea mays L.*) como antioxidante, para su aplicación en la remoción de cadmio, cromo y cobre en aguas sintéticas. El extracto acuoso del marlo de maíz morado (*Zea mays L.*) caracterizado por espectroscopía FTIR-ATR, presenta compuestos fenólicos, demostrando la eficacia del método de extracción. Por otro lado, las nanopartículas sintetizadas se caracterizaron mediante espectrofotometría UV-Visible, difracción de rayos X, espectroscopía FTIR-ATR, confirmando la síntesis nanopartículas de magnetita con un rendimiento del 97.73% de hierro total y un tamaño promedio de cristalita de 13.38 nm; además, el área superficial de las nanopartículas de magnetita fue de 107.69 m²/g determinada por el método de adsorción de gas nitrógeno (método BET). También se demostró la efectividad de las nanopartículas sintetizadas en la remoción de cobre, cadmio y cromo logrando un porcentaje de remoción de hasta 79.3 %, 77.8% y 97.6% respectivamente, en 48 horas de exposición. Estos resultados demuestran la viabilidad y el potencial impacto positivo de la aplicación nanopartículas de magnetita en la gestión de la contaminación del agua por metales pesados en entornos industriales, residenciales y agrícolas.

Palabras claves: Nanopartículas, Magnetita, Maíz morado, Remoción, Cadmio, Cromo, Cobre.

ABSTRACT

Currently, the presence of heavy metals in water is a cause for concern due to the environmental impact they produce, making it important to seek alternatives that can reduce this impact. In this research, magnetite nanoparticles were synthesized by chemical co-precipitation from iron II and III salts, using the aqueous extract of purple corn cob (*Zea mays L.*) as an antioxidant, for their application in the removal of cadmium, chromium, and copper from synthetic waters. The aqueous extract of purple corn cob (*Zea mays L.*), characterized by FTIR-ATR spectroscopy, contains phenolic compounds, demonstrating the effectiveness of the extraction method. On the other hand, the synthesized nanoparticles were characterized by UV-Visible spectrophotometry, X-ray diffraction, and FTIR-ATR spectroscopy, confirming the synthesis of magnetite nanoparticles with a total iron yield of 97.73% and an average crystallite size of 13.38 nm; furthermore, the surface area of the magnetite nanoparticles was 107.69 m²/g, determined by nitrogen gas adsorption (BET method). The effectiveness of the synthesized nanoparticles in the removal of copper, cadmium, and chromium was also demonstrated, achieving removal percentages of up to 79.3%, 77.8%, and 97.6%, respectively, after 48 hours of exposure. These results demonstrate the feasibility and potential positive impact of applying magnetite nanoparticles in managing heavy metal contamination in industrial, residential, and agricultural water environments.

Keywords: Nanoparticles, Magnetite, Purple corn, Removal, Cadmium, Chromium, Copper.

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIMBOLOS

NP's = Nanopartículas

NP'sM= Nanopartículas de Magnetita.

[] = Concentración

mL = mililitros

V = Volumen

ppm = Partes por Millón

%T = Porcentaje de Transmitancia.

%A = Porcentaje de Absorbancia.

FTIR–ATR = Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier con Reflectancia Total Atenuada.

TEM = Microscopía Electrónica de Transmisión

SEM = Microscopía de Barrido Electrónico

XRD = Difracción de Rayos X

ABS = Absorbancia

Rep = Repetición

INDICE

RESUMEN.....	V
ABSTRACT	VI
INDICE	VIII
INTRODUCCIÓN.....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
Formulación del problema.....	2
Justificación	3
Viabilidad	3
OBJETIVOS	4
Objetivo General	4
Objetivos Específicos.....	4
CAPITULO I MARCO TEÓRICO	5
1.1. Antecedentes.....	5
1.2. Fundamento teórico.....	8
1.2.1. Maíz morado.....	8
1.2.2. Nanopartículas.....	10
1.2.3. Clasificación de nanopartículas	11
1.2.4. Métodos de síntesis de nanopartículas.....	12
1.2.5. Hierro y óxidos de hierro.....	12
1.2.6. Nanopartículas de magnetita	13
1.2.7. Métodos de síntesis de nanopartículas de magnetita	13

1.2.8. Aplicaciones de las nanopartículas de magnetita	15
1.2.9. Caracterización de nanopartículas.....	15
1.2.10. Metales pesados.....	18
1.2.11. Cadmio	19
1.2.12. Cromo.....	20
1.2.13. Cobre.....	20
1.2.14. Análisis de metales pesados.....	21
1.2.14.1. Cuantificación de Cd ²⁺ y Cu ²⁺ por Espectroscopia de Absorción Atómica (EAA).....	21
1.2.14.2. Cuantificación de Cr ⁶⁺ por espectrofotometría UV-Vis	23
1.2.15. Enfermedades causadas por el cadmio, cromo y cobre.....	23
1.3. Marco conceptual	24
1.3.1. Cristalita.....	24
1.3.2. Síntesis verde de nanopartículas	24
1.3.3. Agua sintética	24
1.3.4. Reactor metálico.....	24
1.3.5. Marlo de maíz	24
1.3.6. Sales Precursoras.....	25
CAPITULO II HIPOTESIS Y VARIABLES.....	26
Hipótesis general	26
Identificación de variables	26
CAPITULO III METODOLOGÍA	27

3.1. Tipo de investigación	27
3.2. Diseño de investigación	27
3.3. Materiales, Equipos y Reactivos	29
3.3.1. Materiales	29
3.3.2. Equipos.....	30
3.3.3. Reactivos	30
3.4. Preparación de soluciones.....	31
3.5. Obtención del extracto acuoso del marlo de maíz morado (<i>Zea mays L.</i>)	32
3.6. Análisis del extracto acuoso del marlo de maíz morado (<i>Zea mays L.</i>)	32
3.6.1. Análisis del extracto acuoso del marlo de maíz morado por espectrometría infrarroja (FTIR-ATR).	32
3.7. Síntesis de NP'sM a partir de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ con extracto acuoso del marlo de maíz morado (<i>Zea mays L.</i>)	32
3.8. Caracterización de NP'sM por espectrofotometría UV-Visible	34
3.9. Determinación del área superficial de las NP's	35
3.10. Caracterización de las NP'sM por Difracción de Rayos X (XRD)	36
3.11. Caracterización de las NP'sM por Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier con Reflectancia Total Atenuada (FTIR-ATR).....	38
3.12. Aplicación de las NP'sM para remoción de cadmio (Cd^{2+}) determinada por absorción atómica.....	38
3.12.1. Preparación de soluciones para realización de curva patrón de cadmio por espectroscopía de absorción atómica.....	38

3.12.2.	Elaboración de la curva patrón de cadmio (Cd^{2+}).....	39
3.12.3.	Remoción de cadmio (Cd^{+2}) con NP'sM	40
3.13.	Aplicación de NP'sM para remoción de cromo (Cr^{+6}) determinada por espectrofotometría UV-Visible.	40
3.13.1.	Preparación de soluciones para realización de curva patrón de cromo por espectrofotometría UV-Visible	40
3.13.2.	Elaboración de la curva patrón para cromo (Cr^{6+}).....	41
3.13.3.	Remoción de cromo (Cr^{6+}) con NP'sM.....	42
3.14.	Aplicación de NP'sM para remoción de cobre (Cu^{+2}) determinada por absorción atómica	43
3.14.1.	Preparación de soluciones para realización de curva patrón de cobre por espectroscopía de absorción atómica.....	43
3.14.2.	Elaboración de la curva patrón para cobre (Cu^{2+}).....	44
3.14.3.	Remoción de cobre (Cu^{+2}) con NP'sM.....	44
CAPITULO IV DISCUSION DE RESULTADOS		46
4.1.	Resultados de la síntesis de Nanopartículas de Magnetita.....	46
4.1.1.	Reacciones químicas de formación de las NP'sM	46
4.1.2.	Porcentaje de rendimiento	50
4.2.	Resultados de la caracterización de las NP'sM.....	51
4.2.1.	Longitud de onda por espectrofotometría UV-Visible.....	51
4.2.2.	Determinación del área superficial.....	52
4.2.3.	Caracterización por Difracción de Rayos X (XRD).....	53

4.2.4. Caracterización por Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)	56
4.3. Remoción de cadmio (Cd^{2+}) analizado por espectrometría de absorción atómica.	58
4.3.1. Porcentaje de remoción de cadmio.....	61
4.4. Remoción de cromo (Cr^{6+}) analizada por espectrofotometría UV-Visible.....	63
4.4.1. Porcentaje de remoción de cromo	65
4.5. Remoción de cobre (Cu^{2+}) analizada por espectrometría de absorción atómica.....	67
4.5.1. Porcentaje de remoción de cobre	70
CONCLUSIONES	72
RECOMENDACIONES.....	73
BIBLIOGRAFÍA.....	74
ANEXOS.....	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Prueba de jarras para la remoción de cobre con nanopartículas	7
Tabla 2 Identificación de antocianinas en salvado de maíz morado.....	10
Tabla 3 Ventajas y desventajas de los diferentes métodos de obtención de nanopartículas.....	14
Tabla 4 Propiedades fisicoquímicas del cadmio.....	19
Tabla 5 Propiedades fisicoquímicas del cromo	20
Tabla 6 Propiedades fisicoquímicas del cobre	21
Tabla 7 Procedimiento general de remoción usando NP'sM en aguas sintéticas de Cd, Cr y Cu	45
Tabla 8 Determinación del tamaño promedio de la cristalita para las NP'sM sintetizadas	56
Tabla 9 Datos de remoción de Cd^{2+} en tiempos de contacto de 24 y 48 horas	59
Tabla 10 Concentración de cadmio (Cd^{2+}) removido después de 24 y 48 horas.....	60
Tabla 11 Porcentaje de cadmio (Cd^{2+}) removido utilizando NP'sM sintetizadas	62
Tabla 12 Datos de remoción de Cr^{6+} en tiempos de contacto de 24 y 48 horas.....	64
Tabla 13 Concentración de cromo (Cr^{6+}) removido después de 24 y 48 horas	64
Tabla 14 Porcentajes de cromo (Cr^{6+}) removido utilizando NP'sM sintetizadas.....	66
Tabla 15 Datos de remoción de Cu^{2+} en tiempos de contacto de 24 y 48 horas	68
Tabla 16 Concentración de cobre (Cu^{2+}) removido después de 24 y 48 horas	68
Tabla 17 Porcentaje cobre (Cu^{2+}) removido utilizando NP'sM sintetizadas	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Espectro de absorción UV-Vis de nanopartículas de magnetita sintetizadas con diferentes concentraciones de cloruro férrico (0.01, 0.04, 0.07 y 0.1 M)	5
Figura 2 Estructura de las antocianinas a diferentes valores de pH.....	8
Figura 3 Estructura química de las antocianinas más comunes en el maíz morado (<i>Zea mays L.</i>)	9
Figura 4 Representación de la interacción entre la muestra y la radiación infrarroja en FTIR-ATR.....	18
Figura 5 Sistema de síntesis de nanopartículas de magnetita	33
Figura 6 Parámetros para la identificación de longitud de onda usando el espectrofotómetro UV-Vis EVOLUTION 300.....	35
Figura 7 Equipo ChemiSorb 2720 HTP	36
Figura 8 Difractograma de las nanopartículas de magnetita sintetizadas	37
Figura 9 Curva patrón de cadmio (Cd^{2+}) por espectroscopía de absorción atómica.	39
Figura 10 Curva patrón de cromo (Cr^{6+}) por espectroscopía UV-Visible.	42
Figura 11 Curva patrón de cobre (Cu^{2+}) por espectroscopía de absorción atómica.....	44
Figura 12 Tipos de estabilización de las nanopartículas de magnetita.....	47
Figura 13 Interacción entre los grupos hidroxilo de las antocianinas y el hierro divalente.	48
Figura 14 Posible mecanismo de reacción de la formación de nanopartículas de magnetita	49
Figura 15 Espectro UV-Visible de NP'sM sintetizadas a partir de FeCl_3 y FeSO_4	51
Figura 16 Difractograma de NP'sM sintetizadas	53
Figura 17 Difractograma de NP's Fe_3O_4 con los índices de Miller.....	54
Figura 18 Diagrama de fases de las NP'sM.....	55

Figura 19 Espectro infrarrojo del extracto acuoso del marlo de maíz morado (<i>Zea mays</i> <i>L.</i>).....	57
Figura 20 Espectro Infrarrojo correspondiente a las NP'sM sintetizadas	57
Figura 21 Espectro FTIR-ATR de las nanopartículas de magnetita sintetizadas por Khalil, 2015.....	58

ÍNDICE DE GRAFICOS

Gráfico 1 Diagrama de flujo de la metodología para la síntesis de nanopartículas de magnetita	28
Gráfico 2 Comparación de la concentración de cadmio (Cd^{2+}) inicial, después de 24 y 48 horas.....	60
Gráfico 3 Porcentajes de remoción de cadmio (Cd^{2+}) en 24 y 48 horas.....	62
Gráfico 4 Comparación de la concentración de cromo (Cr^{6+}) inicial, después de 24 y 48 horas.....	65
Gráfico 5 Porcentajes de remoción de cromo (Cr^{6+}) en 24 y 48 horas	66
Gráfico 6 Comparación de la concentración de cobre (Cu^{2+}) inicial, después de 24 y 48 horas.....	69
Gráfico 7 Porcentajes de remoción de cobre (Cu^{2+}) en 24 y 48 horas	71

INTRODUCCIÓN

Las nanopartículas poseen dimensiones menores a 100 nm, tienen propiedades y características distintas que en el mundo macro, adicionalmente poseen una gran actividad química (Medina et al., 2015). Las nanopartículas magnéticas son una clase de nanopartículas que poseen propiedades magnéticas y entre sus aplicaciones encontramos el tratamiento de aguas residuales y como catalizadores o soporte de catalizadores (Baños et al., 2017).

Frecuentemente, la síntesis de nanopartículas magnéticas implica un alto costo, tanto económico, como energético debido a las condiciones y equipos necesarios (Chamé, 2013), por lo tanto, el objetivo es sintetizar nanopartículas magnéticas de hierro por el método de coprecipitación química partiendo de FeCl_3 y FeSO_4 como sales precursoras, en presencia del extracto acuoso del marlo de maíz morado (*Zea mays L*) como antioxidante; proporcionando una alternativa relativamente fácil, económica y ecoamigable a la síntesis de nanopartículas de magnetita, para posteriormente aplicar dichas nanopartículas en la remoción de cadmio (Cd^{2+}), cromo (Cr^{6+}) y cobre (Cu^{2+}) en aguas sintéticas.

El presente trabajo de investigación consta de tres capítulos, que se describen a continuación:

Capítulo I: Se desarrolla el marco teórico, englobando los antecedentes, bases teóricas y conceptos generales.

Capítulo II: Se muestra la metodología y los parámetros de los diferentes análisis realizados.

Capítulo III: Se muestra y analiza los resultados obtenidos durante la experimentación

En las conclusiones se resalta los resultados obtenidos según los objetivos trazados.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se sabe que el agua es esencial para la vida, pero la presencia de metales a concentraciones elevadas puede tener consecuencias desfavorables para la salud provocando daños en el sistema nervioso, renal, hematopoyético y esquelético, así como efectos cancerígenos, dependiendo de la concentración y el tiempo de exposición. La contaminación del agua por metales puede ocurrir durante las fases de captación, tratamiento y distribución. (Segura et al., 2003).

Por otro lado, los métodos de síntesis de nanopartículas magnéticas usualmente conllevan un gasto energético y económico elevado debido a las condiciones que estos requieren o los equipos utilizados, entre los métodos de síntesis de nanopartículas magnéticas se destaca el método de coprecipitación (López, 2018) que asociado a la síntesis verde resulta en un menor impacto ambiental.

En el ámbito del tratamiento de aguas residuales, las nanopartículas de magnetita juegan un papel crucial. Se utilizan para eliminar compuestos, principalmente metálicos, y también para absorber aceites, disolventes orgánicos y contaminantes emergentes. La nanotecnología ofrece estas nanopartículas magnéticas, que son ampliamente utilizadas en el tratamiento de aguas residuales debido a sus múltiples aplicaciones (Plazas y Garcia, 2020).

Formulación del problema

En el presente trabajo se plantea el siguiente problema de investigación:

¿Las nanopartículas de magnetita obtenidas por síntesis verde removerán el cadmio, cromo y cobre de aguas sintéticas?

Justificación

El agua es una de las sustancias más importantes de la vida, pero puede llegar a ser perjudicial ya que el consumo del agua contaminada con metales pesados desencadena diferentes tipos de enfermedades como cáncer, anemia y daño gastrointestinal en el caso del cromo; alteraciones nerviosas, daños hepáticos y cerebral en el caso del cadmio. Por otro lado el cobre en el organismo causa vómitos, náuseas incesantes, dolor abdominal o diarrea (Correa et al., 2021).

Se ha observado que las nanopartículas magnéticas poseen una gran capacidad de remoción de metales pesados como el arsénico (Starbird y Montero, 2015), razón por la cual se busca la remoción de metales pesados como el cadmio, cromo y cobre a través de dichas nanopartículas, así mismo, la síntesis química clásica trae consigo la generación de sustancias peligrosas ya sea durante el diseño, manufactura o en las aplicaciones de productos químicos (Doria, 2009), lo que se busca es reducir la producción de contaminantes a través de “síntesis verde”, que implica el uso del extracto acuoso de marlo de maíz morado (*Zea mays L.*) como agente estabilizante y antioxidante.

Viabilidad

Este estudio fue viable, pues se contaba con los equipos, reactivos y el apoyo del laboratorio de nanotecnología, que incursiona en la síntesis de nanopartículas. Se tuvieron disponibles los antecedentes que muestran la remoción de metales pesados como el arsénico (Starbird y Montero, 2015). Además se aplicó los métodos de cuantificación de metales pesados en aguas expuesto en el libro: “*Standard methods for the examination of water and wastewater*” que ha sido publicado por la Asociación Americana de Salud Pública, Asociación Americana de Obras de Agua y la Federación para el Control de la Contaminación del Agua (APHA et al., 1989). Por lo tanto, la investigación se consideró viable.

OBJETIVOS

Objetivo General

Obtener nanopartículas de magnetita por síntesis verde y aplicar en la remoción de cadmio, cromo y cobre en aguas sintéticas.

Objetivos Específicos

- Obtener el extracto acuoso del marlo de maíz morado (*Zea mays L.*).
- Obtener y caracterizar las nanopartículas de magnetita por síntesis verde usando extracto acuoso del marlo de maíz morado (*Zea mays L.*).
- Evaluar la aplicación de las nanopartículas de magnetita en la remoción de cadmio cromo y cobre en aguas sintéticas.

CAPITULO I

MARCO TEÓRICO

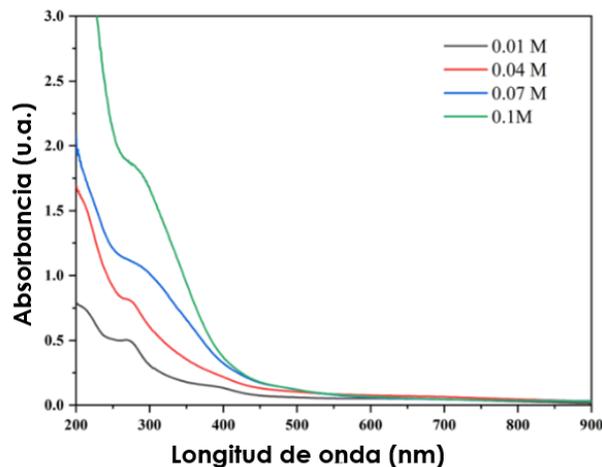
1.1. Antecedentes

Ahmed et al., (2023) sintetizaron nanopartículas de magnetita usando residuos de cebolla, papa, té y moringa, la caracterización de dichas partículas incluyó FT-IR, XRD, XRF y EDX. La absorción de UV en el rango de 190 nm a 340 nm confirmó la formación de nanopartículas de magnetita y el espectro FTIR indicó la formación de nanopartículas de óxido de hierro con los agentes reductores (flavonas); además, reportaron que la intensidad de las bandas de absorción depende del extracto que se utilice.

Abderrhmane et al., (2021) utilizaron extracto de hojas de Artemisia en la síntesis verde de magnetita (Fe_3O_4 -NPs) con el objeto de estudiar el efecto de diferentes concentraciones de cloruro férrico (0.01M - 0.1 M) logrando picos de absorción máxima entre 275-301 nm como se observa en la *Figura 1*.

Figura 1

Espectro de absorción UV-Vis de nanopartículas de magnetita sintetizadas con diferentes concentraciones de cloruro férrico (0.01, 0.04, 0.07 y 0.1 M)



Nota. Tomado de Abderrhmane et al., (2021).

Rajput et al., (2016) utilizaron nanopartículas de magnetita sintetizadas mediante coprecipitación química en la remoción de iones Cr^{6+} y Pb^{2+} en soluciones acuosas. Los experimentos de adsorción se realizaron tomando en cuenta el pH, la temperatura, el tiempo de contacto y la concentración de adsorbato/adsorbente en la adsorción de Cr^{6+} y Pb^{2+} . Se observó que la remoción máxima de Cr^{6+} ocurrió a pH 2.0 y de Pb^{2+} a pH 5.0 con capacidades máximas de adsorción de Langmuir de 34.87 (Cr^{6+}) y 53.11 (Pb^{2+}) mg/g a 45 °C respectivamente.

Das et al., (2020) sintetizaron nanopartículas de magnetita utilizando látex crudo de *Jatropha curcas* (JC) y extracto de hojas de *Cinnamomum tamala* (CT). La caracterización se realizó usando DLS, espectroscopía UV-vis, FTIR, XRD y FE-SEM. Las nanopartículas mostraron tamaños entre 20 - 42 nm (JC- Fe_3O_4) y 26 - 35 nm (CT- Fe_3O_4). Así mismo, estudiaron el efecto de las nanopartículas magnéticas sintetizadas en la eliminación de metales pesados, logrando una capacidad de adsorción máxima de 463.2 mg/g y 543.3 mg/g (aplicando CT- Fe_3O_4 y JC- Fe_3O_4 respectivamente) para el Cu^{2+} y 513 mg/g 501.3 mg/g para Co^{2+} (aplicando CT- Fe_3O_4 y JC- Fe_3O_4 respectivamente).

Macías, (2022) sintetizó magnetita aplicando coprecipitación química, las nanopartículas de magnetita que obtuvo se usaron para crear un ferrofluido con un tamaño promedio de 36 nm y evaluó el nivel de adsorción de arsénico (As) utilizando espectrofotometría de absorción atómica antes y después de los tratamientos alcanzando un porcentaje de adsorción del 36% en 15 min de contacto.

García y González, (2021) sintetizaron nanopartículas de magnetita por el método de coprecipitación química para su aplicación en la remoción de cobre (Cu) utilizando la técnica de jarras (Ver *Tabla 1*). Demostraron que el tratamiento con nanopartículas de magnetita representa una mejor opción en cuanto a un tratamiento para aguas de reinyección, la mejor eficacia se logró con la mayor concentración de nanopartículas, logrando una reducción del 98.68%.

Tabla 1

Prueba de jarras para la remoción de cobre con nanopartículas

Jarra	Muestra de agua de producción (3.82 ppm Cu)	Nanopartículas de magnetita	Agitación
Jarra 1	200 mL	0.06 g	Agitación inicial de
Jarra 2		0.12 g	100 rpm durante un minuto y se continuó
Jarra 3		0.18 g	con una agitación de 20 rpm durante 20 minutos.

Nota. Tomado de García y González, (2021).

Cabe aclarar que García y Gonzales añadieron las nanopartículas directamente a las jarras a diferentes concentraciones para determinar su eficacia en la remoción de cobre. Durante el proceso de agitación cada jarra estuvo expuesta a imanes en su base exterior.

Galeas et al., (2017) demostraron que, al aumentar la velocidad de agitación y el tiempo de reacción en la síntesis de nanopartículas de magnetita por coprecipitación química, se mejoró el rendimiento y se redujo el tamaño de partícula, obteniendo nanopartículas de 7 nm de diámetro promedio con un rendimiento del 94%.

Giraldo y Moreno, (2013) sintetizaron nanopartículas de magnetita mediante el método de coprecipitación, obteniendo tamaños de cristalita entre 20 nm a 25nm, además utilizaron las nanopartículas sintetizadas para tratar agua contaminada con Pt^{2+} y Au^{3+} , logrando una capacidad máxima de adsorción de 86,7 mg/g para Au^{3+} y 76,3 mg/g para Pt^{2+} . Además, mencionan que la capacidad de adsorción depende en gran medida del pH de la solución y la temperatura.

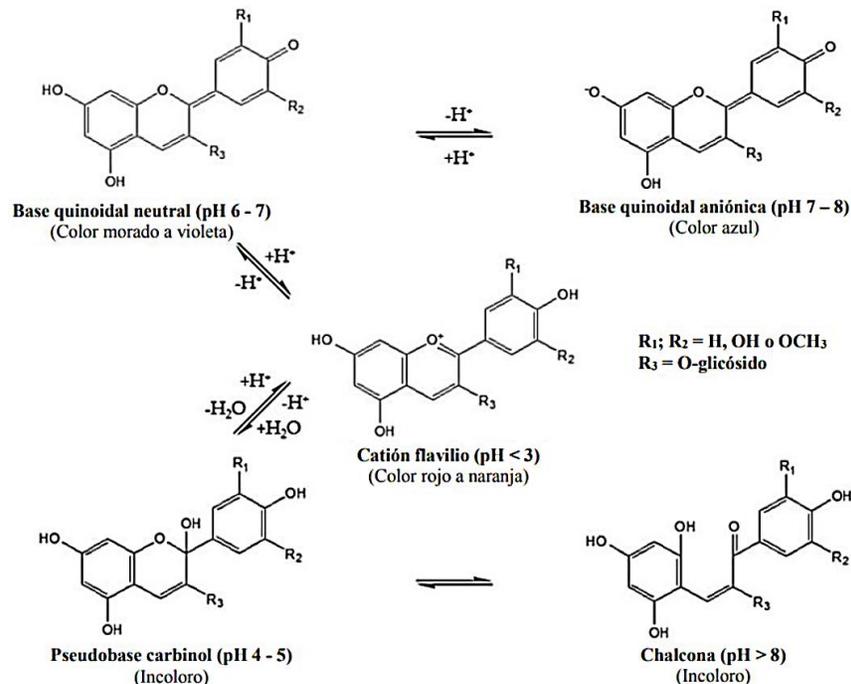
1.2. Fundamento teórico

1.2.1. Maíz morado

El maíz morado (*Zea mays L.*), originario de Perú y México, es conocido por su popularidad en la preparación de la chicha morada. Este cereal presenta una característica pigmentación morada debido a las antocianinas, especialmente concentradas en el marlo. El maíz morado está compuesto en un 85% por granos y 15% por el marlo. Destacando como antioxidante por las antocianinas, ofrece beneficios para la salud humana, incluyendo efectos positivos contra la hipertensión (Guillén et al., 2014).

Figura 2

Estructura de las antocianinas a diferentes valores de pH



Nota. Tomado de Azman et al., (2022)

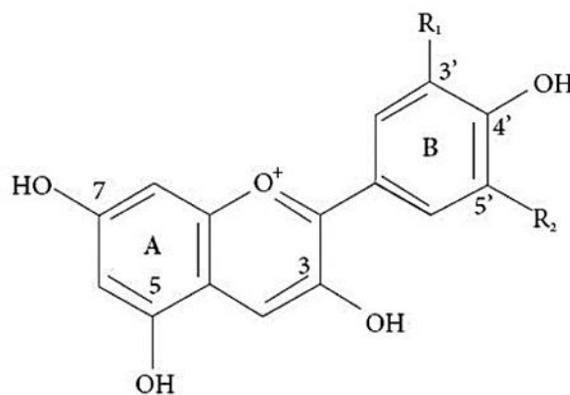
Asimismo, las antocianinas presentes en el maíz morado (*Zea mays L.*) poseen interacciones con el pH, debido a que son de carácter iónico. En la *Figura 2* muestra que en

soluciones acuosas y con valores de pH menores a 3, la coloración será roja debido a que se encuentra en su forma de catión flavilio la cual es más estable, por esta razón la extracción de antocianinas se realiza a pH ácido. Mientras se aumenta el valor de pH (4-5) hay un equilibrio entre la pseudobase hemiacetal también llamado carbinol (incolora) y forma chalcona (coloración amarilla) a pH mayores a 8. Por otro lado, la desprotonación del catión flavilio a pH 6-7 exhibe la formación de una base quinonoidal neutra (con un color púrpura a violeta), que conduce a la formación de una base quinonoidal aniónica a pH 7-8 de color azul (Azman et al., 2022).

Asimismo, las antocianinas son clasificados como flavonoides y tienen una estructura fundamental que consiste en un núcleo de flavona compuesto por dos anillos aromáticos unidos por un puente de tres átomos de carbono, ver *Figura 3* (Salinas et al., 2013).

Figura 3

Estructura química de las antocianinas más comunes en el maíz morado (Zea mays L.)



R ₁	R ₂	Antocianidina
H	H	Pelargonidina
OH	H	Cianidina
OCH ₃	H	Peonidina

Nota. Tomado de Salinas et al., (2013).

En el maíz morado, la mayoría de las antocianinas provienen de la cianidina como se observa en la *Tabla 2*, en los valores de abundancia relativa (AR). Estas antocianinas pueden tener una

estructura básica que incluye la antocianidina y, a menudo, un azúcar unido a la posición 3' de una estructura de tres carbonos. Estas son conocidas como antocianinas no aciladas. Sin embargo, en algunos casos, pueden unirse radicales acilos a la molécula de antocianina, derivados de ácidos orgánicos, ya sean alifáticos o aromáticos. Cuando esto ocurre, se forman antocianinas de tipo aciladas. (Salinas et al., 2013). Tomando en consideración la *Tabla 2*, la presencia de estos grupos acilo en la molécula de antocianina proporciona una mayor estabilidad al pigmento, incluso en condiciones extremas de pH y temperatura (Chen et al., 2017).

Tabla 2

Identificación de antocianinas en salvado de maíz morado

Compuesto	Fragmento			
	Rf	[M] ⁺	(m/z)	AR %
Cianidina-3-O-glucósido	17.79	449	287	45.8
Pelarginidina-3-O-glucósido	19.84	433	271	3.3
Peonidina-3-O-glucósido	21.41	463	301	4.1
Cianidina-3-O-(6-malonilglucosido)	22.61	535	287	40.1
Pelargonidina-3-O-(6-malonilglucósido)	24.46	519	271	1.5
Cianidina-3-O-(3,6-dimalonilglucósido)	25.83	621	287	1.2

Nota. Rf = factor de retención; AR (%) = abundancia relativa en %; [M]⁺ = concentración del ion molecular; m/z = relación masa/carga. Tomado de Chen et al., (2017).

1.2.2. Nanopartículas

Son aquellas partículas con tamaño menor a 100 nm, la Unión Europea recomendó que se definiera como “material natural, secundario o fabricado que consta de partículas, sueltas o formando un agregado o aglomerado y en el que el 50% o más de las partículas en la granulometría numérica presente una o más dimensiones externas en el intervalo de tamaños comprendido entre 1 nm y 100 nm” (Márquez et al., 2021).

1.2.3. Clasificación de nanopartículas

1.2.3.1. Nanopartículas orgánicas

Estas nanopartículas formadas a partir de proteínas, lípidos, carbohidratos u otros compuestos orgánicos con tamaño menor a 100 nm, dentro de estos tenemos a los dendrímeros (moléculas tridimensionales a base de átomos como el nitrógeno, formando una estructura circular mediante múltiples reacciones), micelas (agregados de moléculas en una solución acuosa, con una cabeza hidrofílica en contacto con el solvente y una cola hidrofóbica en el centro de la micela) y liposomas (pequeñas burbujas similar a la membrana celular, requiere mucho cuidado debido a su sensibilidad a la oxidación), este tipo de nanopartículas son usados en biomedicina debido a su capacidad de retener fármacos hasta su liberación en zonas específicas del cuerpo humano (Singh et al., 2021).

1.2.3.2. Nanopartículas inorgánicas

Su característica principal es que no están conformadas por carbono, en este grupo se encuentran las nanopartículas basadas en metales (como aluminio, plata, zinc, cobre, hierro u oro) y las basadas en óxidos metálicos (como óxido de aluminio, óxido de cerio, óxido de hierro, magnetita, dióxido de silicio, óxido de titanio y óxido de zinc), estas nanopartículas poseen propiedades excepcionales (mayor reactividad y eficiencia) en comparación a las nanopartículas basadas en metales (Ealia y Saravanakumar, 2017).

1.2.3.3. Nanopartículas a base de carbón

Son nanopartículas formadas completamente de carbono en este grupo tenemos a los fullerenos, grafeno, nanotubos de carbono, nanofibras de carbono y negro de humo (Ealia y Saravanakumar, 2017), poseen notables propiedades de conductividad térmica y eléctrica, son menos dañinas para el medio ambiente, se utilizan en la fabricación de chipsets para computadoras, en aplicaciones biomédicas como el desarrollo de fármacos y terapias génicas,

también se emplean en baterías para almacenar energía y en la formación de catalizadores debido a su alta eficacia en el diseño estructural (Singh et al., 2021).

1.2.4. Métodos de síntesis de nanopartículas

De forma general es posible sintetizar nanopartículas en base a 2 categorías: top-down y bottom-up (Ealia y Saravanakumar, 2017).

La primera categoría top-down requiere la fragmentación de materiales sólidos a pequeñas piezas mediante la aplicación de fuerza externa utilizando muchas técnicas físicas, químicas y térmicas para proporcionar la energía necesaria para la formación de nanopartículas (Nadaroglu et al., 2017), en esta categoría se encuentran los métodos de molienda mecánica, la nanolitografía, la ablación por láser, la pulverización catódica y la descomposición térmica (Ealia y Saravanakumar, 2017).

La segunda categoría bottom-up se basa en reunir y combinar átomos o moléculas, tiene un enfoque constructivo y es posible obtener nanopartículas de menor tamaño ya que ofrece un mayor control de los tamaños de las nanopartículas (Nadaroglu et al., 2017), en esta categoría se encuentran los métodos de Sol-gel, deposición química de vapor (CVD), pirólisis y biosíntesis (Ealia y Saravanakumar, 2017).

1.2.5. Hierro y óxidos de hierro

El hierro es el cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre posee la característica de ser maleable e interactuar con campos magnéticos a temperatura y presión atmosférica (Frey y Reed, 2012). Los dos estados alotrópicos principales del fierro son α y γ ; este último es no magnético y cristaliza en un sistema cúbico de cara centrada, además se forma entre 900°C y 1400°C, mientras que el α es magnético, cristaliza en un sistema cúbico de cuerpo centrado, disuelve poco carbono y se forma a temperaturas inferiores a 768°C (Samanéz, 1976).

Los óxidos de hierro tienen como componente principal al oxígeno, los óxidos de hierro pueden encontrarse naturalmente en algunos minerales como hematita (color marrón rojizo), magnetita (color negro), maghemita (color marrón), goethita (color marrón amarillo a marrón oscuro), akaganeíta (color marrón pálido a blanco) (Taghizadeh et al., 2020).

1.2.6. Nanopartículas de magnetita

Es la forma nanoparticulada de la magnetita (Fe_3O_4) (Picasso et al., 2012), estas pueden ser organizadas a través de un campo magnético (Lu et al., 2004). Las nanopartículas de magnetita con diámetros inferiores a 30 nm muestran un comportamiento superparamagnético, lo que significa que no tienen una curva de histéresis en su magnetización. Esto implica que, en ausencia de un campo magnético externo, estas partículas no tienen magnetización y tienen menos tendencia a aglomerarse (Gregorio et al., 2012).

1.2.7. Métodos de síntesis de nanopartículas de magnetita

1.2.7.1. Coprecipitación química

Es una forma de sintetizar NP's de magnetita a partir de soluciones acuosas de sales de Fe^{2+} y Fe^{3+} como precursores, adicionando una base en una atmósfera inerte a temperatura ambiente o elevada. Es posible variar las dimensiones de las nanopartículas como el tamaño, la forma, y la composición de las nanopartículas magnéticas variando parámetros como el tipo de sal precursora, la relación entre $\text{Fe}^{2+} / \text{Fe}^{3+}$, la temperatura a la que se trabaje y pH (Smith et al., 2006).

A continuación, se muestra la *Tabla 3* que detalla las ventajas y desventajas de los principales métodos de síntesis para la obtención de óxido de hierro y hierro metálico (Chamé, 2013).

Tabla 3*Ventajas y desventajas de los diferentes métodos de obtención de nanopartículas*

Método de obtención	Ventajas	Desventajas
Molienda mecánica	Obtener gran variedad de equilibrio y fases de desequilibrio, fases metaestables cristalinas y aleaciones amorfas, soluciones sólidas y nanoestructuras.	Se tiene problemas para obtener nanopartículas menores a 10 nm ya que es posible la contaminación del equipo y de las propias nanopartículas.
Condensación de gas inerte	Se tiene un contenido bajo de impurezas.	Contar con el equipo adecuado como una cámara de guantes y un gas inerte.
Sol gel	Permite controlar el crecimiento de las NP`s, permite el crecimiento del núcleo-recubrimiento de las NP`s.	Tiempo de síntesis.
Redox	Es rápido.	Al realizar más de 2 reacciones, parte del material se desperdicia.
Proceso hidrotermal	Es idóneo para el crecimiento de grandes cristales de gran calidad. Manteniendo el control en su composición.	No se puede observar la formación de los cristales durante el proceso, usualmente el equipo necesario (autoclave) es costoso.
Coprecipitación	Es posible tener mayor control en el proceso de síntesis.	Fácilmente se puede contaminar el material obtenido.
Poliol	Se puede obtener nanopartículas finas.	Se usa temperaturas altas y es necesario conocer los puntos de ebullición de los materiales usados

Nota. Tomado de Chamé, (2013).

1.2.8. Aplicaciones de las nanopartículas de magnetita

1.2.8.1. Diagnóstico y tratamiento médico

Las nanopartículas magnéticas son idóneas para algunos tratamientos médicos de manera experimental se utiliza en un tipo de cáncer llamado hipermetría magnética, se utilizan para generar calor colocado en un campo magnético que va alternando (Fatima et al., 2021). Existen otros tratamientos contra el cáncer en donde se utiliza nanopartículas en aquellas células que son cancerosas con la idea de que sean capturadas y llevadas fuera del cuerpo, es un método experimental y ha sido aplicado en ratones (Scarberry et al., 2008).

1.2.8.2. Tratamiento de aguas residuales

En el campo del tratamiento de aguas residuales, las nanopartículas de magnetita forman parte fundamental en estos procesos, puesto que son utilizadas en la remoción de compuestos generalmente metálicos, así mismo permiten la adsorción de aceites, disolventes orgánicos y contaminantes emergentes, es por esto que la nanotecnología que nos brinda las nanopartículas magnéticas son muy aprovechadas en el ámbito del tratamiento de aguas residuales por sus diferentes aplicaciones (Plazas y Garcia, 2020).

1.2.8.3. Imágenes biomédicas

La obtención de imágenes en el sector médico son de gran ayuda al detectar enfermedades y ayudar el posible tratamiento, seleccionando nanopartículas de tamaños específicos para estudiar únicamente el órgano seleccionado, a diferencia del uso de las técnicas de imagen de resonancia magnética convencionales (Gregorio et al., 2012).

1.2.9. Caracterización de nanopartículas

1.2.9.1. Espectrofotometría UV-Vis

Esta técnica de caracterización se basa en la absorción de energía de las moléculas, las cuales experimentan transiciones electrónicas es decir la promoción de electrones de un nivel de energía a otro, se recurre a la radiación electromagnética, de las regiones ultravioleta y visible

del espectro electromagnético, esto abarca una longitud de onda entre 380 nm y 780 nm (Vera, 2018).

Es una técnica relativamente económica y simple (Quevedo et al., 2021), que nos proporciona la siguiente información:

- Evaluación de detección no invasiva y rápida.
- Determinar de forma cualitativa la presencia de NP's.

Para una correcta lectura es necesario tener un blanco para formar una línea base de la muestra, posteriormente se coloca la muestra a analizar en diferentes concentraciones, para posteriormente analizar los datos (Vera, 2018).

Cuando los fotones de luz interactúan con la superficie de las nanopartículas, los electrones oscilan moviéndose a través de la superficie de la nanopartícula causando la separación de carga entre los electrones y el núcleo, formando un dipolo eléctrico, este dipolo produce un campo eléctrico que sirve para volver a los electrones a su posición de equilibrio una vez que se cese el campo eléctrico de la luz, a este fenómeno se le conoce como resonancia plasmónica superficial (SPR) (Soliman et al., 2017). La absorción de luz por parte de las nanopartículas metálicas se puede registrar mediante espectroscopia de absorción UV-Vis, cuando el fenómeno de resonancia ocurre, las intensidades de absorción y dispersión son más altas en comparación a las partículas sin propiedades plasmónicas (Abdallah y Al-Haddad, 2021). La intensidad y longitud de onda de la SPR dependen del tipo de metal, el material de recubrimiento, tamaño y la forma de las nanopartículas (Soliman et al., 2017).

1.2.9.2. Difracción de rayos X (XRD)

Esta técnica de caracterización se realiza a partir del patrón de difracción de rayos X característico para cada muestra. Los materiales se identifican en la base de datos del

International Centre for Diffraction Data que reporta las condiciones del análisis, así como los perfiles de difracción de polvos, las distancias interplanares, etc. (Aparicio et al., 2010).

La difracción de rayos X es una técnica muy útil para estudios en estado sólido y ciencia de materiales, incluyendo los materiales a escala nanométrica. A partir del difractograma podemos tener la siguiente información:

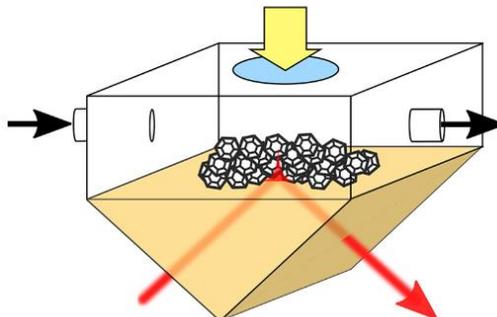
- Ofrecer información sobre el tamaño de la cristalita, en general, picos más anchos se relacionan con una cristalita más pequeña, lo que se puede calcular con la ecuación de Scherrer.
- La distribución de los átomos dentro de la celda unitaria y las cantidades de los compuestos cuando se trata de mezclas que se estiman tomando en cuenta la intensidad de las reflexiones (picos).
- Es posible determinar si la muestra contiene más de una fase cristalina.

1.2.9.3. Espectrometría Infrarrojo con Transformadas de Fourier y Reflectancia Total Atenuada (FTIR-ATR)

Sirve para identificar grupos funcionales de materiales orgánicos o inorgánicos, la técnica de FTIR-ATR se fundamenta en la interacción de la muestra con la radiación infrarroja, donde la muestra se encuentra en contacto con un cristal de alto índice de refracción. En la Figura 4 se muestra que el haz de infrarrojos incide en el cristal ATR y se refleja internamente, formando una onda evanescente que penetra algunos micrómetros en la muestra (Saji et al., 2024), la luz resultante se somete a procesamiento computarizado mediante la Transformación de Fourier, este algoritmo convierte los datos brutos de absorción de luz en espectros mejor analizables, este método es crucial para transformar datos sin procesar, llamados "interferograma", en información útil sobre la absorción de luz para cada longitud de onda (Griffiths y De Haseth, 2007). Una de las ventajas del FTIR-ATR es la mínima preparación de la muestra, lo que facilita el análisis de materiales sólidos y polvos (Petit & Puskar, 2018).

Figura 4

Representación de la interacción entre la muestra y la radiación infrarroja en FTIR-ATR



Nota. Tomado de Petit & Puskar, (2018).

1.2.9.4. Área superficial

El área superficial es la medida total de la superficie expuesta de un material, para el caso de nanopartículas, se refiere a la suma de todas las áreas de las superficies exteriores de las partículas individuales (Mane et al., 2024).

Un método para determinar el área superficial en nanopartículas es emplear la adsorción de un gas inerte, como nitrógeno o criptón, a diversas presiones para formar una monocapa de gas en la superficie de las partículas. La cantidad de gas necesaria para formar esta monocapa y la sección transversal de las moléculas de gas adsorbidas se relacionan mediante la ecuación de Brunauer-Emmett-Teller con la "superficie total" de las partículas, incluyendo poros internos y grietas. En lugar de gases inertes, también se pueden utilizar moléculas orgánicas, como el éter monoetilado de etilenglicol (Stefaniak, 2017).

1.2.10. Metales pesados

Son aquellos metales que poseen una gran densidad, generalmente mayor a 4 g/cm^3 , y tienen un peso atómico mayor a 20 uma (Soto et al., 2020).

Sin embargo, estos metales a pesar de ser agentes contaminantes en el ecosistema considerados como un riesgo, son esenciales tanto para las plantas y animales ya que necesitan estar presentes en cantidades sumamente controladas y adecuadas para el buen desarrollo de estos (Rengifo y Chupillon, 2017).

1.2.11. Cadmio

El cadmio es un elemento del grupo 12 de la tabla periódica, considerado un metal pesado gracias a su densidad de $8,64 \text{ g/cm}^3$ y su peso atómico de 112,41 uma, referente a sus propiedades fisicoquímicas se expresa en la *Tabla 4*:

Tabla 4

Propiedades fisicoquímicas del cadmio

Cadmio (Cd)	
Forma	Metal blanco
Cualidades	Maleable y dúctil
Punto de fusión	$321,1^{\circ}\text{C}$
Punto de ebullición	$766,8^{\circ}\text{C}$
Número atómico	48
Peso atómico	112,41 uma
Densidad	$8,64 \text{ g/cm}^3$

Nota. Tomado de (García, 2019).

Este metal pesado es considerado uno de los metales pesados más peligrosos debido a su presencia en las actividades agrícolas, ya que es encontrada con frecuencia en suelos agrícolas. Mas aun también tienden a presentarse en las aguas de ríos o lagunas, generalmente asociado a la liberación de desechos sólidos como pinturas, barnices o baterías que contengan cadmio en su composición, esto generando la principal causa de la presencia de este metal pesado en el recurso hídrico (Charkiewicz et al., 2023).

1.2.12. Cromo

El cromo es un elemento químico considerado un metal pesado, posee el número atómico 24, con un peso atómico de 51.99 uma y una apariencia de color blanco plateado (Becerra et al., 2011). Sus características fisicoquímicas se pueden encontrar en la *Tabla 5*:

Tabla 5

Propiedades fisicoquímicas del cromo

Cromo (Cr)	
Forma	Metal plateado metálico
Punto de fusión	1875°C
Punto de ebullición	2665°C
Número atómico	24
Peso atómico	51,99 uma
Densidad	7,19 g/cm ³

Nota. Tomado de (Becerra et al., 2011).

Además, se ha concluido que el ion Cr⁶⁺ (cromo hexavalente) es una sustancia potencialmente tóxica para el hígado. La exposición al cromo en entornos ocupacionales y ambientales puede provocar disfunciones en el funcionamiento hepático, de igual manera se demostró que la exposición al cromo hexavalente causa efectos nefrotóxicos, así mismo, la aparición de neuropatías en las personas expuestas a metales pesados es a causa de la exposición por cromo (Becerra et al., 2011).

1.2.13. Cobre

El cobre es un elemento químico de número atómico 29, perteneciente a los metales de transición. Se considera un metal comparativamente pesado (Feoktistova y Clark, 2018), en la *Tabla 6* se observa sus propiedades fisicoquímicas.

Tabla 6

Propiedades fisicoquímicas del cobre

Cobre (Cu)	
Forma	Metal rojizo
Punto de fusión	1083°C
Punto de ebullición	2595°C
Número atómico	29
Peso atómico	63,54 uma
Densidad	8,96 g/cm ³

Nota. Tomado de (Feoktistova & Clark, 2018)..

El cobre desempeña un papel fundamental en la biología, por lo tanto, resulta fundamental comprender cómo opera y las consecuencias que acarrea el exceso de este elemento en el organismo humano.

El cobre es considerado un micronutriente esencial y se encuentra presente en diversos órganos como el hígado, el cerebro, los riñones y el corazón. Este elemento desempeña un papel crucial en el funcionamiento de las células. El desequilibrio en los niveles de cobre, puede traer graves consecuencias para la salud, como las enfermedades de Menkes y Wilson (Feoktistova y Clark, 2018).

1.2.14. Análisis de metales pesados

1.2.14.1. Cuantificación de Cd²⁺ y Cu²⁺ por Espectroscopia de Absorción Atómica (EAA)

También conocido como espectroscopia AA o AAS (por sus siglas en inglés), es utilizada para determinar las concentraciones de elementos metálicos específicos que se encuentran en una mezcla; es decir, este método se emplea para cuantificar la concentración de un elemento particular, conocido como analito, en una muestra (Fernández y Colpas, 1997).

Los principios de cuantificación en AAS se basan en la ley de Lambert- Beer, es decir, que el aumento en la absorbancia (medido como una disminución en la transmitancia) tiene una dependencia directa con la concentración de átomos en fase gaseosa. Cuando una muestra es atomizada (convertida en vapor), los átomos individuales absorben luz a longitudes de onda específicas. Este fenómeno se usa para cuantificar los elementos metálicos de interés (Lagalante, 2007).

El proceso de espectroscopia de absorción atómica consta de varias etapas (Duckworth, 2010) :

1. La muestra líquida se introduce en una llama u horno de grafito donde se volatiliza, separando los átomos.
2. Se selecciona una lámpara de cátodo hueco emite una longitud de onda característica del elemento a analizar y dirige la luz hacia la muestra atomizada.
3. Los átomos gaseosos de la muestra absorben la luz si la longitud de onda de este coincide con su estructura electrónica.
4. Se mide la cantidad de luz absorbida, cuanto mayor es la concentración de átomos del elemento en la muestra, mayor es la cantidad de luz absorbida.

Para la cuantificación de iones Cd^{2+} y Cu^{2+} , una vez que se encuentran en estado gaseoso reducen la intensidad de una luz monocromática específica (228.8 nm para el Cd^{2+} y 327.4 nm para el Cu^{2+}). La luz absorbida es medida y comparada con una curva de calibración (previamente realizada), permitiendo la cuantificación de estos metales. La EAA es una técnica utilizada para la detección de metales pesados debido a su alta selectividad y sensibilidad, especialmente en concentraciones muy bajas (Abdullin et al., 2000).

1.2.14.2. Cuantificación de Cr^{6+} por espectrofotometría UV-Vis

Esta técnica se basa en la absorción de luz ultravioleta y visible por las moléculas de una sustancia, además, dependiendo de la estructura electrónica de la muestra, la luz es absorbida a diferentes longitudes de onda. Entonces cuando una muestra es expuesta a radiación en el rango UV-visible (aproximadamente 390-780 nm), los electrones se excitan y pasan a niveles de energía más altos y según la Ley de Beer-Lambert la cantidad de luz absorbida por la muestra a una longitud de onda particular es directamente proporcional a la concentración de la muestra (De Caro y Haller, 2015).

Mediante este método es posible cuantificar el cromo (Cr^{6+}), para lo cual es necesario adicionar 1,5-difenilcarbazida, este reacciona con el cromo hexavalente en solución acida produciendo un color rojo-violeta, lo cual puede ser medido por un espectrofotómetro, siendo la capacidad de absorción molar de aproximadamente $40.000 \text{ l g}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ a 540 nm (APHA et al., 1989).

1.2.15. Enfermedades causadas por el cadmio, cromo y cobre

El cadmio al ser asimilado en el organismo es transportado hacia diferentes órganos y tejidos, dañando principalmente a los riñones e hígado, provocando fallos en la función renal, asimismo, causa la osteoporosis, enfermedades pulmonares crónicas, carcinogénicas, mutagénicas y en casos extremo la muerte (Charkiewicz et al., 2023).

La inhalación de cromo (Cr^{6+}) irrita la nariz o la boca en humanos, además de causar asma, disfunción renal, cáncer de pulmón y diarrea y úlceras, se ha reportado que la exposición crónica al Cr^{6+} produce perforaciones y ulceraciones del tabique, bronquitis, disminución de la función pulmonar, neumonía, dermatitis y efectos gastrointestinales (Lewicki et al., 2014). El Cr^{6+} es altamente oxidante, lo que lo hace muy tóxico en el torrente sanguíneo y puede dañar las células sanguíneas (Prasad et al., 2021).

La ingestión de Cu puede causar náuseas, vómitos, diarrea, dolor abdominal y, en casos graves, daño hepático o renal, también puede provocar anemia hemolítica y daño en el sistema nervioso, por otro lado, la exposición a vapores de cobre pueden desarrollar enfermedades respiratorias, como neumoconiosis y cáncer de pulmón (Cabrera et al., 2014).

1.3. Marco conceptual

1.3.1. Cristalita

Se refiere a una pequeña región o dominio cristalino dentro de la nanopartícula que tiene una estructura atómica ordenada y repetitiva, es una medida de la dimensión promedio de las regiones cristalinas en la nanopartícula (Aguilar et al., 2001).

1.3.2. Síntesis verde de nanopartículas

Es una técnica de producción de material nanoparticulado junto con material metálico (oro, plata, hierro y óxidos metálicos), que busca ser amigable con el medioambiente (Gómez, 2018)

1.3.3. Agua sintética

Se refiere al agua diseñada para imitar la composición iónica que se está estudiando, pero sin incluir otros componentes como trazas, coloides y sustancias orgánicas. Se utiliza especialmente cuando se requiere una composición química controlada y reproducible para la investigación científica (Smith et al., 2002).

1.3.4. Reactor metálico

Es un equipo utilizado para reacciones químicas o físico-químicas a temperatura y presión elevadas, principalmente fabricado de acero inoxidable o aleaciones metálicas (Cornejo y Hayes, 2021).

1.3.5. Marlo de maíz

Es la parte central de la mazorca del maíz, donde se encuentran incrustados los granos (Soto et al., 2014).

1.3.6. Sales Precursoras

Son compuestos químicos utilizados en síntesis, actuando como fuente de los elementos que forman o se incorporan la estructura final del material (Altammar, 2023).

CAPITULO II

HIPOTESIS Y VARIABLES

Hipótesis general

Las nanopartículas de magnetita obtenidas por síntesis verde remueven significativamente el cadmio, cromo y cobre de aguas sintéticas.

Identificación de variables

- **Variable independiente (X):** Cantidad de nanopartículas de magnetita obtenidas por síntesis verde aplicadas para la remoción.
- **Variable dependiente (Y):** Remoción de cadmio, cromo y cobre.

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1. Tipo de investigación

La investigación tuvo un enfoque cuantitativo, debido a que los datos se recopilaron de forma numérica, además, las variables de investigación se les puede asignar una magnitud. Así mismo, esta investigación tuvo un alcance descriptivo y explicativo, ya que se describió las características y propiedades de las nanopartículas de magnetita sintetizadas, además, el objetivo fue explicar y establecer una relación causa-efecto entre las nanopartículas de magnetita y la remoción de metales pesados, donde se utilizaron métodos para analizar esta relación y entender los mecanismos involucrados en el proceso de remoción de contaminantes.

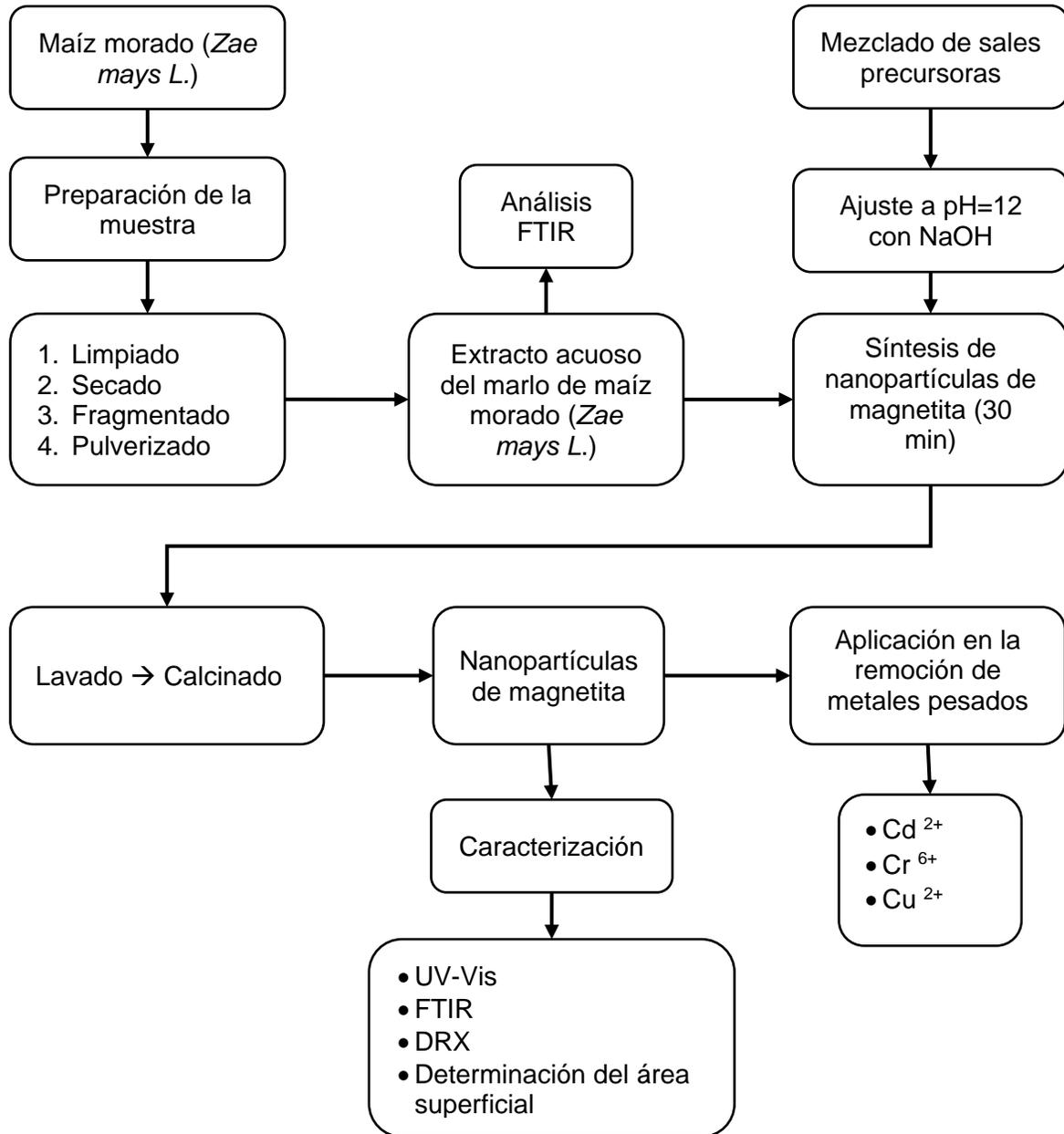
Según su finalidad esta investigación es aplicada, porque se genera conocimiento sobre la síntesis y aplicación de las nanopartículas de magnetita utilizando extracto acuoso de marlo del maíz morado (*Zea mays L.*) que puede ser utilizado de forma práctica para futuras investigaciones. El diseño de la investigación fue de tipo experimental, debido a que se manipuló la variable independiente (X) para observar y medir sus efectos en la variable dependiente (Y).

3.2. Diseño de investigación

La investigación fue de tipo experimental donde se ha sintetizado nanopartículas de magnetita utilizando extracto acuoso del marlo de maíz morado (*Zea mays L.*) y aplicado en la remoción de cadmio (Cd^{+2}), cromo (Cr^{6+}) y cobre (Cu^{2+}) a continuación se presenta el diseño de la metodología empleada:

Gráfico 1

Diagrama de flujo de la metodología para la síntesis de nanopartículas de magnetita



Nota. Elaboración propia.

Los experimentos de esta investigación se desarrollaron en las instalaciones de los laboratorios de Físicoquímica y Nanotecnología del Departamento Académico de Química de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, los análisis de metales pesados por Espectroscopía de Absorción Atómica (EAA) se realizaron en las instalaciones del Laboratorio de Cromatografía y Espectrometría de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, por otro lado para el análisis de Difracción de Rayos X de las nanopartículas de magnetita sintetizadas se enviaron muestras al laboratorio de cristalografía de la facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos en la ciudad de Lima.

3.3. Materiales, Equipos y Reactivos

3.3.1. Materiales

- Frascos de color ámbar de 100 mL, 250 mL y 500 mL de capacidad
- Pipetas graduadas de 1 mL, 5 mL, 10 mL y 20 mL
- Fiolas de 100 mL y 50 mL.
- Balón de base redonda con 3 picos para síntesis de 250 mL.
- Pipetas de 20 mL, 10 mL y 5 mL y propipeta
- Micropipetas de 2000 μ L y 5000 μ L
- Vasos de precipitado de 25 mL y 50 mL
- Tubos de ensayo
- Gradilla de PVC
- Baguetas de vidrio
- Probetas de 25 mL, 50 mL y 100 mL
- Matraces de 250 mL
- Plancha calentadora
- Papel filtro de poro fino
- Soporte universal

- Cubetas de cuarzo (paso luz: 10mm, ancho Int.: 10mm, volumen: 3,5ml c / tapa).
- Crisol de porcelana de 100 mL
- Mortero
- Imanes de neodimio
- Placas Petri Pyrex 60 x 15 mm
- Piseta de agua 500 mL
- Cristalizador 600 mL 125 X 63 mm

3.3.2. Equipos

- Espectrómetro de Absorción Atómica, VARIAN AA240FS
- Espectrofotómetro UV-Visible, EVOLUTION 300.
- Espectrómetro Infrarrojo con transformada de Fourier, marca Thermo Nicolet 380 con accesorio ATR (Reflectancia Total Atenuada).
- Difractómetro de Rayos X., Bruker-D8-Eco Advance
- Analizador de Quimisorción Dinámica Básico Chemisorb – 2720
- Balanza analítica, AND HR-250AZ (0.1 mg a 252 g)
- Mufla ThermoLyne FB1310M (100° a 1100°C)
- Estufa Memmert GmbH (+5°C – 220°C)
- Plancha Calefactora, Heidolph MR Hei-Tec (20 – 120°C)
- Agitador magnético, Heidolph MR Hei-Tec (0 – 1400 rpm)
- pHmetro CRISOM pH25+
- Centrifuga ZC (10000 rpm).
- Baño ultrasonido (FanYingSonic) Freq: 40KHz

3.3.3. Reactivos

- Agua destilada.
- Agua desionizada.

- Cloruro de hierro (III) hexahidratado ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), 99.7% Fagalab.
- Sulfato de hierro (II) heptahidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), 99.8% Fagalab.
- Hidróxido de sodio (NaOH), 99.7% Merck.
- Sulfato de cadmio ($3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$), 99.5% Meyer.
- Dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), 99.31% Merck
- Sulfato de cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), 99.79% Merck.
- Ácido clorhídrico concentrado (HCl) Q.P, 37%, $\rho = 1.17 \text{ g/mL}$.
- Ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) Q.P, 98% $\rho = 1.80 \text{ g/mL}$.
- Etanol absoluto (EtOH)
- Magnesio metálico (Mg)
- Hidróxido de Amonio 10% (NH_4OH)
- Cloroformo (CHCl_3) Q.P.
- Difenil carbazida ($\text{C}_{13}\text{H}_{14}\text{N}_4\text{O}$), 97.5% Meyer
- Nitrato de plata (AgNO_3) 0.2M
- Cloruro de bario (BaCl_2) 2M

3.4. Preparación de soluciones

En el **Anexo 1**, se muestran los cálculos realizados para la preparación de las soluciones de:

- Hidróxido de sodio 2N: Se pesó 7.99 g de NaOH y se aforó a 100 mL.
- Cadmio (Cd^{2+}) 500 ppm: Se pesó 1.15 g de $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ y se aforó a 250 mL.
- Cromo (Cr^{6+}) 500 ppm: Se pesó 0.353 g de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ y se aforó a 250 mL.
- Cobre (Cu^{2+}) 500 ppm: Se pesó 0.491 g de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ y se aforó a 250 mL.
- Ácido sulfúrico 0.2N: Se midió 0.136 nL de H_2SO_4 y se aforó a 25 mL.

3.5. Obtención del extracto acuoso del marlo de maíz morado (*Zea mays L.*)

Para la obtención del extracto acuoso del marlo de maíz morado (*Zea mays L.*) se separó el marlo de los granos, posteriormente se seccionó en trozos pequeños, se llevaron a secar en una estufa a 40°C por 24 horas, como indicó Sánchez et al., (2019), posteriormente se pulverizó y tamizó (malla N°20), obteniendo 500 g del marlo de maíz morado pulverizado. En un vaso de precipitados se añadió 250 mL de agua desionizada y se llevó a ebullición con una plancha calefactora a la cual se le añadió 20 gramos del marlo de maíz morado molido, por 10 minutos, se dejó enfriar y se procedió a filtrar, obteniéndose un extracto que se mantuvo refrigerado a 4°C.

3.6. Análisis del extracto acuoso del marlo de maíz morado (*Zea mays L.*)

3.6.1. Análisis del extracto acuoso del marlo de maíz morado por espectrometría infrarroja (FTIR-ATR).

Por analogía al trabajo de Li et al., (2020), se secó 50 mL del extracto acuoso del marlo de maíz morado (*Zea mays L.*) en una estufa a 40°C por 48 horas posteriormente se pesó 0.01 gramos del extracto seco y se analizó en el espectrómetro FTIR-ATR.

3.7. Síntesis de NP'sM a partir de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ con extracto acuoso del marlo de maíz morado (*Zea mays L.*)

Considerando la metodología propuesta por Dhar et al., 2021, en un vaso de precipitado se pesó 10 gramos de cloruro de hierro (III), mientras que en otro se pesó 4 gramos de sulfato de hierro (II). Se montó el sistema de síntesis que se muestra en la *Figura 5*, que consta de un balón de base redonda con tres picos, en el pico derecho se colocó un termómetro, y en el pico central se instaló un condensador de vidrio con reflujo, el balón se dispuso sobre una plancha calefactora equipada con un agitador magnético y un cristizador para crear un baño isotérmico.

Se mezclaron las sales precursoras y se disolvieron en 160 mL de agua desionizada, esta mezcla se añadió al balón de síntesis. A continuación, se agitó la mezcla de sales durante 10 minutos a una temperatura de 70°C y se agregó hidróxido de sodio (NaOH) 2N a goteo constante. Una vez que el pH fue igual a 12, se añadió 160 mL del extracto acuoso del marlo de maíz morado al balón y se continuó con la síntesis por 30 minutos a 70°C, con el fin de estabilizar la reacción y asegurar la formación de NP'sM.

Figura 5

Sistema de síntesis de nanopartículas de magnetita



Nota. Elaboración propia.

Las nanopartículas de magnetita sintetizadas se sometieron a lavado repetido con agua destilada, en una centrifuga, en cada lavado se desechó el sobrenadante y se verificó la presencia de iones cloruros y sulfatos (provenientes de las sales precursoras). Para reconocer la presencia de sulfatos se basa en el método turbidimétrico, donde el ion sulfato (SO_4^{2-}) precipita

en presencia del ion bario (Ba^{2+}), cuando se agrega cloruro de bario ($BaCl_2$) a las aguas de lavado, forma el sulfato de bario ($BaSO_4$), que aparece como precipitado blanco u opalescencia en la solución (Fortes et al., 2008). Por otro lado, la identificación de cloruros se basa en el método argentométrico, donde una solución que contiene iones Ag^+ , como el nitrato de plata ($AgNO_3$), es añadida a la muestra que presenta iones cloruro (Cl^-) formando precipitado blanco correspondiente al cloruro de plata ($AgCl$) (Belcher et al., 1957). Para ambos casos (sulfatos y cloruros), se consideró la formación de precipitado blanco como una reacción positiva a la presencia de los iones cloruros y sulfatos.

Una vez terminado este proceso de lavado las nanopartículas de magnetita se transfirieron a una placa Petri y se dejaron secar en una estufa a $30^{\circ}C$.

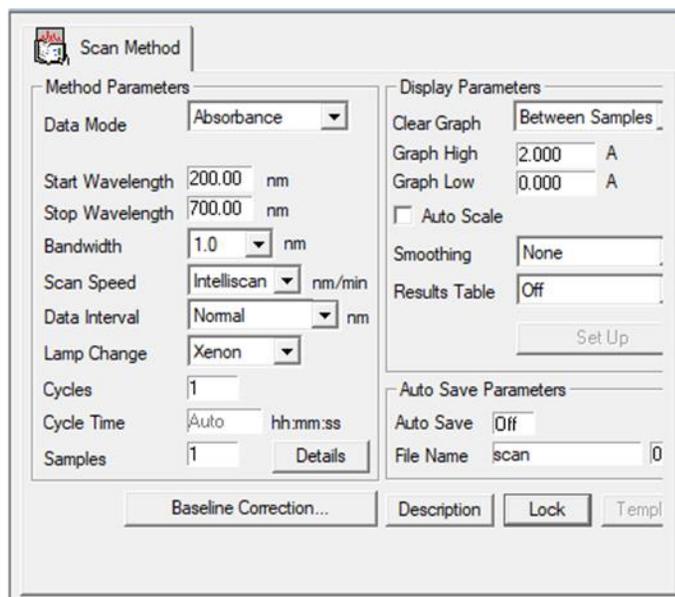
Finalmente, para realizar el proceso de calcinación se transfirió las nanopartículas de magnetita lavadas a un crisol de porcelana, se introdujo a un reactor metálico y se llevó a la mufla a $500^{\circ}C$ por 3 horas.

3.8. Caracterización de NP'sM por espectrofotometría UV-Visible

Se aseguró que la muestra estuviera en suspensión para la lectura en el espectrofotómetro, para ello, se pesó 0.01g de la muestra y se transfirió a un tubo de ensayo seguidamente se añadió 10 mL de agua desionizada y se llevó al sonicador, a una frecuencia de 60 Hz durante 15 minutos. Finalmente se procedió a la lectura utilizando los parámetros de la *Figura 6*.

Figura 6

Parámetros para la identificación de longitud de onda usando el espectrofotómetro UV-Vis EVOLUTION 300



Nota: Elaboración propia.

3.9. Determinación del área superficial de las NP's

Se verificó que el equipo ChemiSorb 2720 HTP estuviera debidamente calibrado y listo para su funcionamiento (ver *Figura 7*) luego, se procedió a pesar la NP's, colocándola en un tubo en forma de U. A continuación, se llevó a cabo la desgasificación de la muestra a una temperatura de 300°C durante un período de 30 minutos.

Posteriormente para la absorción se utilizó nitrógeno líquido (Trampa fría), lo cual permitió que el nitrógeno gaseoso se adhiriese a la superficie de las NP's. Finalmente, se procedió a la etapa de desorción para liberar el nitrógeno previamente adsorbido. Durante todo este proceso se registraron cuidadosamente los datos recopilados para su posterior análisis y evaluación.

Figura 7

Equipo ChemiSorb 2720 HTP



Nota: Elaboración propia.

3.10. Caracterización de las NP'sM por Difracción de Rayos X (XRD)

Las nanopartículas sintetizadas fueron enviadas al laboratorio de cristalografía de la facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos de Lima, este análisis permitió calcular el tamaño promedio de la cristalita de las NP'sM, el porcentaje de pureza y obtener el diagrama de fases correspondiente.

Con los datos obtenidos en esta técnica se pudo determinar el tamaño de cristalita mediante la ecuación de Scherrer, la cual está relacionada con el tamaño de las NP'sM en una muestra sólida.

La ecuación de Scherrer se define de la siguiente forma:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad \dots(1)$$

Donde:

D = Tamaño de la cristalita

K = Constante de tamaño nano = 0.9

λ = Longitud de onda de la radiación de rayos X

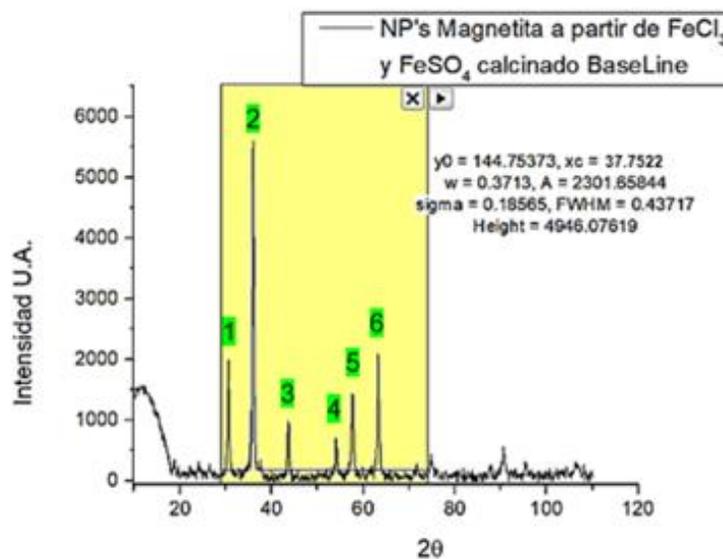
β = Ancho del pico a altura media (FWHM)

θ = Ángulo de difracción

Se usó el software Origin Pro para el procesamiento de los datos del difractograma, se procedió a suavizar y eliminar background mediante las herramientas de Gadgets → Quick Fit → Peak Gauss (System). Se identificó el ancho de banda correspondiente a los 6 picos principales como muestra la (Figura 8).

Figura 8

Difractograma de las nanopartículas de magnetita sintetizadas



Nota: Elaboración propia.

3.11. Caracterización de las NP'sM por Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier con Reflectancia Total Atenuada (FTIR-ATR)

Se aseguró que las NP'sM estuvieran completamente secas y pulverizadas en un mortero de ágata, posteriormente se realizó la medición por FTIR-ATR en el rango de frecuencia específico requerido para la caracterización de las nanopartículas de magnetita, abarcando desde 4000 cm^{-1} hasta 400 cm^{-1} .

Como resultado de este proceso, se obtuvo el espectro FTIR de las nanopartículas de magnetita y se procedió a identificar las bandas de absorción presentes en dicho espectro.

3.12. Aplicación de las NP'sM para remoción de cadmio (Cd^{2+}) determinada por absorción atómica

3.12.1. Preparación de soluciones para realización de curva patrón de cadmio por espectroscopía de absorción atómica

Las disoluciones se hicieron a partir de la solución madre de 1000 ppm de Cd^{2+} (asignada al espectrómetro de absorción atómica VARIAN AA240FS) y se obtuvieron soluciones a las siguientes concentraciones: 0.1 ppm, 0.3 ppm, 0.6 ppm, 0.9 ppm y 1.2 ppm.

Para medir el volumen de la solución inicial más exacto se usaron micropipetas.

- ❖ **Para preparar 0.1 ppm de Cd^{2+} en 250 mL:** Se midió 0.025 mL de la solución madre (1000 ppm Cd^{2+}) y se aforó a 250 mL.
- ❖ **Para preparar 0.3 ppm de Cd^{2+} en 250 mL:** Se midió 0.075 mL de la solución madre (1000 ppm Cd^{2+}) y se aforó a 250 mL.
- ❖ **Para preparar 0.6 ppm de Cd^{2+} en 250 mL:** Se midió 0.15 mL de la solución madre (1000 ppm Cd^{2+}) y se aforó a 250 mL.

- ❖ **Para preparar 0.9 ppm de Cd²⁺ en 250 mL:** Se midió 0.225 mL de la solución madre (1000 ppm Cd²⁺) y se aforó a 250 mL.
- ❖ **Para preparar 1.2 ppm de Cd²⁺ en 250 mL:** Se midió 0.30 mL de la solución madre (1000 ppm Cd²⁺) y se aforó a 250 mL.

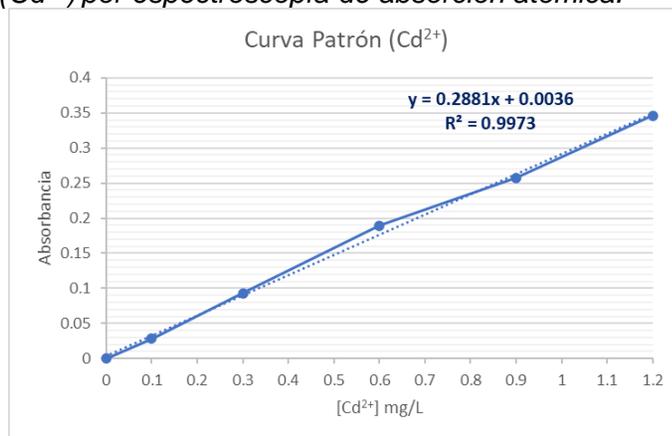
3.12.2. Elaboración de la curva patrón de cadmio (Cd²⁺)

Se encendió y calibró el espectrómetro de absorción atómica (modelo VARIAN AA240FS) para asegurar mediciones precisas. Luego, se procedió a seleccionar la lámpara apropiada para el cadmio Cd²⁺.

Se purgó el equipo de posibles interferencias derivadas de lecturas anteriores, utilizando agua desionizada. A continuación, se seleccionó la longitud de onda específica asociada al cadmio 228.8 nm, posteriormente se introdujeron las soluciones patrón en el espectrómetro de absorción atómica para su lectura.

Figura 9

Curva patrón de cadmio (Cd²⁺) por espectroscopía de absorción atómica.



Nota: Curva patrón obtenido con los datos reportados del análisis por espectroscopía de absorción atómica VARIAN AA240FS. Elaboración propia.

De acuerdo a la curva patrón obtenida (ver Figura 9) se tiene la siguiente ecuación de correspondencia $Y_1 = 0.2881(X_1) + 0.0036$ con un coeficiente de determinación lineal $R^2 = 0.9973$

3.12.3. Remoción de cadmio (Cd^{2+}) con NP'sM

Se pesó 0.01g de NP'sM, y se transfirió a un matraz de 100 mL. A continuación, se añadió 50 mL de una solución de 9 ppm de cadmio (Cd^{2+}) y se sometió a agitación magnética durante 15 minutos utilizando una plancha de agitación a 1400 rpm, al término de la agitación se midió el pH ($\text{pH}\approx 5.5$).

Se evaluó el tiempo de contacto de 24 horas y 48 horas, posteriormente se separaron las nanopartículas de la solución empleando un imán de neodimio para facilitar la captura de las nanopartículas magnéticas cargadas con cadmio.

Finalmente, se tomó una alícuota de 10 mL del sobrenadante y se realizó la lectura en el espectrómetro de absorción atómica. Se determinó la concentración de cadmio por interpolación usando la curva patrón correspondiente.

Este mismo procedimiento se realizó para las cantidades de 0.05g y 0.1g de NP'sM y de igual forma se evaluó la remoción a 24h y 48h de contacto.

3.13. Aplicación de NP'sM para remoción de cromo (Cr^{6+}) determinada por espectrofotometría UV-Visible.

3.13.1. Preparación de soluciones para realización de curva patrón de cromo por espectrofotometría UV-Visible

Partiendo de una solución patrón de 500 ppm de Cr^{6+} se hicieron diluciones para obtener concentraciones de 10 ppm, 20 ppm, 50 ppm y 100 ppm.

- ❖ **Para preparar 10 ppm de Cr^{6+} en 25 mL:** Se midió 0.5 mL de la solución madre (500 ppm Cr^{6+}) y se aforó a 25 mL.
- ❖ **Para preparar 20 ppm de Cr^{6+} en 25 mL:** Se midió 1.0 mL de la solución madre (500 ppm Cr^{6+}) y se aforó a 25 mL.

- ❖ **Para preparar 50 ppm de Cr⁶⁺ en 25 mL:** Se midió 2.5 mL de la solución madre (500 ppm Cr⁶⁺) y se aforó a 25 mL.
- ❖ **Para preparar 100 ppm de Cr⁶⁺ en 25 mL:** Se midió 5 mL de la solución madre (500 ppm Cr⁶⁺) y se aforó a 25 mL.

3.13.2. Elaboración de la curva patrón para cromo (Cr⁶⁺)

Se encendió y calibró el Espectrofotómetro UV-Visible (modelo EVOLUTION 300), para asegurar mediciones precisas.

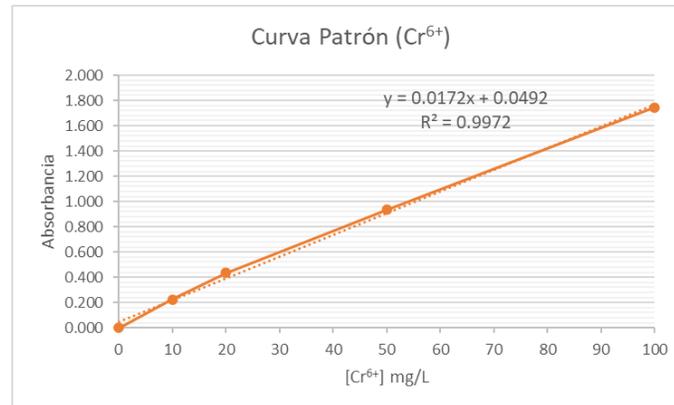
Primero, se identificó la longitud de onda máxima de absorción para lo cual, en una cubeta de cuarzo de 1 cm de ancho, se colocó la solución de cromo 50 ppm (agua sintética), se le agregó 0.15 mL de solución de 1,5-difenilcarbazida y 0.15 mL de ácido sulfúrico (H₂SO₄) 0.2N. Se realizó el escaneo para identificar la longitud de onda máxima de absorción del cromo (Cr⁶⁺) encontrándose en 546 nm, que es muy cercano a la longitud de onda teórico de 540 nm, que es la longitud de onda máxima de absorción del complejo de cromo Cr⁶⁺ (Hua et al., 2009).

Segundo, se preparó una cubeta de cuarzo con 2 mL de agua desionizada, a la cual se añadió 0.15 mL de solución de 1,5-difenilcarbazida y 0.15 mL de H₂SO₄ 0.2N, esta cubeta se utilizó como referencia o blanco.

Tercero, se llenaron cubetas de cuarzo con 2 mL con la solución patrón para poder realizar la lectura desde la concentración más baja hacia la más alta. A cada una de estas soluciones patrón se le añadió 0.15 mL de solución de 1,5-difenilcarbazida y 0.15 mL de H₂SO₄ 0.2N, posteriormente se realizó la lectura a la longitud de onda de absorción máxima identificada (546 nm). Finalmente, los datos recopilados se procesaron para generar la curva patrón, proporcionando así una ecuación matemática para la posterior cuantificación de concentraciones de cromo (Cr⁶⁺).

Figura 10

Curva patrón de cromo (Cr^{6+}) por espectroscopía UV-Visible.



Nota: Curva patrón obtenido con los datos reportados por el análisis de espectrofotometría de UV – Visible EVOLUTION 300. Elaboración propia.

De acuerdo a la curva patrón obtenida (ver Figura 10) se tiene la siguiente ecuación de correspondencia $Y_2 = 0.0172(X_2) + 0.0492$ con un coeficiente de determinación lineal $R^2 = 0.9972$

3.13.3. Remoción de cromo (Cr^{6+}) con NP'sM

Para llevar a cabo el proceso de remoción de cromo (Cr^{6+}) y la posterior medición de la concentración residual, se pesó 0.01g de NP'sM y se transfirió a un matraz de 100 mL.

A continuación, se procedió a añadir 50 mL de la solución de 10 ppm de cromo (Cr^{6+}), en seguida, se sometió a agitación magnética durante 15 minutos utilizando una plancha de agitación magnética a 1400 rpm, al término de la agitación se midió el pH (pH \approx 6).

Para la separación de las nanopartículas de la solución, se empleó un imán de neodimio, facilitando así el proceso de captura de las nanopartículas magnéticas cargadas con cromo (Cr^{6+}).

Posteriormente, se procedió a encender y calibrar el Espectrofotómetro UV-Visible (modelo EVOLUTION 300), seguidamente, se prepararon cubetas de cuarzo en las cuales se

colocaron 2 mL del sobrenadante de la remoción, para cada medida se añadió 0.15 mL de solución de 1,5-difenilcarbazida y 0.15 mL de ácido sulfúrico (H₂SO₄) 0.2N. Finalmente, usando la curva patrón correspondiente y se determinó la concentración de cromo (Cr⁶⁺) por interpolación.

Es importante destacar que este proceso se realizó para las cantidades de 0.05g y 0.1g de NPSM y de igual forma se evaluó la remoción a 24h y 48h de contacto.

3.14. Aplicación de NPSM para remoción de cobre (Cu²⁺) determinada por absorción atómica

3.14.1. Preparación de soluciones para realización de curva patrón de cobre por espectroscopía de absorción atómica

Partiendo de una solución patrón de 500 ppm de Cu²⁺ (asignada al espectrómetro de absorción atómica VARIAN AA240FS) se hicieron diluciones para las concentraciones de 0.5 ppm, 1.5 ppm, 3 ppm, 6 ppm y 9 ppm.

- ❖ **Para preparar 0.5 ppm de Cu²⁺ en 250 mL:** Se midió 0.125 mL de la solución madre (1000 ppm Cu²⁺) y se aforó a 250 mL
- ❖ **Para preparar 1.5 ppm de Cu²⁺ en 250 mL:** Se midió 0.375 mL de la solución madre (1000 ppm Cu²⁺) y se aforó a 250 mL
- ❖ **Para preparar 3.0 ppm de Cu²⁺ en 250 mL:** Se midió 0.75 mL de la solución madre (1000 ppm Cu²⁺) y se aforó a 250 mL.
- ❖ **Para preparar 6.0 ppm de Cu²⁺ en 250 mL:** Se midió 1.5 mL de la solución madre (1000 ppm Cu²⁺) y se aforó a 250 mL
- ❖ **Para preparar 9.0 ppm de Cu²⁺ en 250 mL:** Se midió 2.25 mL de la solución madre (1000 ppm Cu²⁺) y se aforó a 250 mL

3.14.2. Elaboración de la curva patrón para cobre (Cu^{2+})

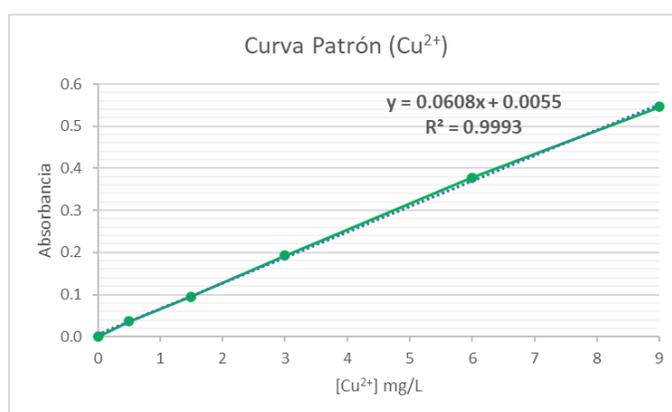
Se encendió y calibró el espectrómetro de absorción atómica (modelo VARIAN AA240FS) y se procedió a la selección de la lámpara adecuada diseñada para la detección del cobre (Cu^{2+}).

Para evitar cualquier tipo de interferencia que pudiera afectar las lecturas, se purgó el equipo con agua desionizada, eliminando cualquier residuo o contaminación que pudiera provenir de lecturas anteriores. Posteriormente se seleccionó la longitud de onda específica de absorción relacionada al cobre (Cu^{2+}) a 327.4 nm.

Con las condiciones adecuadas establecidas, se procedió a la introducción de las soluciones preparadas para la realización de la curva patrón.

Figura 11

Curva patrón de cobre (Cu^{2+}) por espectroscopía de absorción atómica.



Nota: Curva patrón obtenido con los datos reportados del análisis por espectroscopía de absorción atómica VARIAN AA240FS. Elaboración propia.

De acuerdo a la curva patrón obtenida (Ver Figura 11) se tiene la siguiente ecuación de correspondencia $Y_3 = 0.0608(X_3) + 0.0055$ con un coeficiente de determinación lineal $R^2 = 0.9993$

3.14.3. Remoción de cobre (Cu^{2+}) con NP'sM

Se pesó 0.01g de NP'sM y se transfirió a un matraz de 100 mL, como se detalla en la *Tabla 8*. Posteriormente, se añadió 50 mL de una solución de 8.7 ppm de cobre (Cu^{2+}), se agitó

durante 15 minutos utilizando una plancha de agitación magnética a 1400 rpm, al término de la agitación se midió el pH (pH≈6). Tras esta fase de agitación, se esperó 24 horas y 48 horas; para separar las nanopartículas de la solución se utilizó un imán de neodimio, lo que facilitó la captura de las nanopartículas magnéticas cargadas con cobre.

Posteriormente, se tomó una alícuota de 10 mL del sobrenadante y se llevó al espectrómetro de absorción atómica (modelo VARIAN AA240FS). Finalmente, usando la curva patrón correspondiente y se determinó la concentración de cobre por interpolación.

Es importante destacar que mismo procedimiento se realizó para las cantidades de 0.05g y 0.1g de NP'sM y de igual forma se evaluó la remoción a 24h y 48h de contacto.

Tabla 7

Procedimiento general de remoción usando NP'sM en aguas sintéticas de Cd, Cr y Cu

VASO	VOLUMEN DE AGUA SINTÉTICA	NP'S MAGNETITA (g)	AGITACIÓN	TIEMPO DE CONTACTO	SEPARACIÓN
VASO 1	50 mL	0.01	Utilizando un agitador magnético a 1400 rpm por 10 minutos.	24h y 48h	Se hizo la separación con ayudas de imanes de neodimio y tomando el sobrenadante para las lecturas correspondientes.
VASO 2		0.05			
VASO 3		0.1			

Nota: Se muestra el procedimiento empleado de forma general para la remoción de Cd²⁺, Cr⁶⁺ y Cu²⁺ utilizando en todos los casos NP's de magnetita. Elaboración Propia.

Este procedimiento se realizó por separado para el Cd²⁺, Cr⁶⁺ y Cu²⁺ con el fin de determinar la eficiencia de las nanopartículas en la remoción de estos metales.

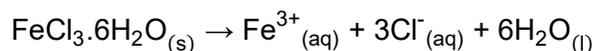
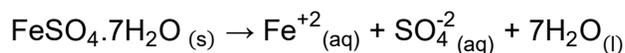
CAPITULO IV

DISCUSION DE RESULTADOS

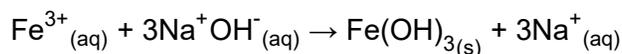
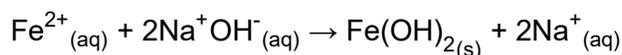
Resultados de la síntesis de Nanopartículas de Magnetita

4.1.1. Reacciones químicas de formación de las NP'sM

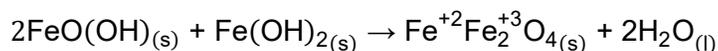
A continuación, se muestran las reacciones químicas propuestas para el mecanismo de síntesis de nanopartículas de magnetita. En primera instancia, se disolvieron las sales precursoras, de donde se obtienen los iones Fe^{2+} y Fe^{3+} :



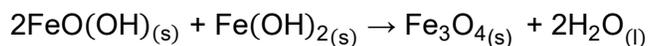
Posteriormente, se procedió a la formación de hidróxidos de hierro:



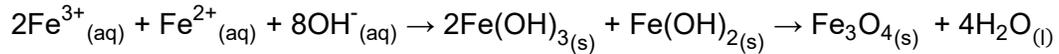
En una siguiente etapa, se sometió a un aumento de temperatura, donde el hidróxido de hierro (III) sufre una descomposición y deshidratación, para dar lugar al oxido-hidroxido de hierro $\text{FeO}(\text{OH})$. Finalmente, la nanopartícula de magnetita se formó mediante una reacción en estado sólido entre $\text{FeO}(\text{OH})$ y el hidróxido de hierro (II) (Dudchenko et al., 2022):



Equivalente a:



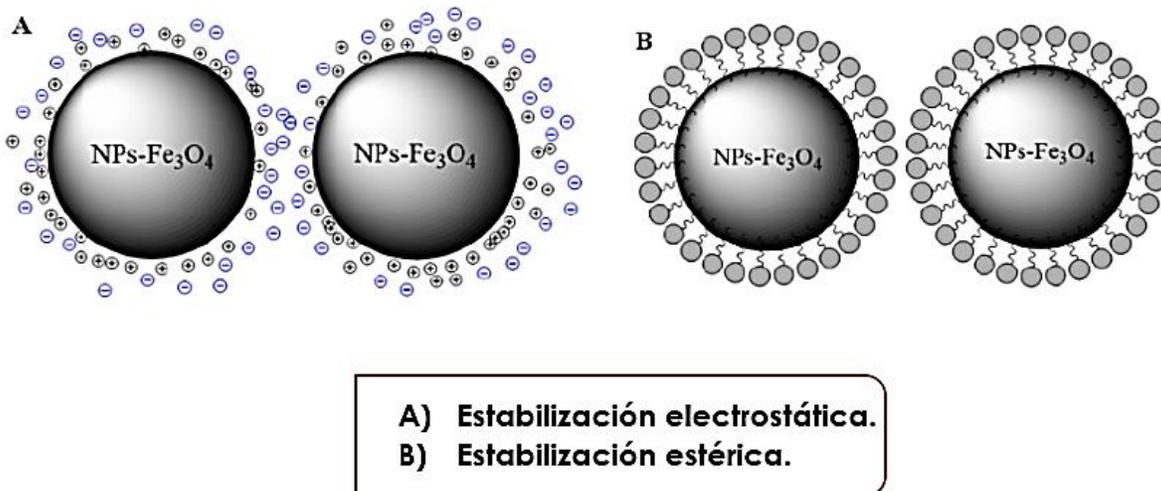
La reacción general queda de la forma:



Las antocianinas presentes en el maíz morado (*Zea mays L.*) son de gran relevancia para la síntesis de magnetita debido a su capacidad antioxidante y estabilizante, la estabilización es tanto de naturaleza electrostática como estérica. Esta combinación de mecanismos estabilizadores da lugar a un surfactante iónico con cadenas largas en sus extremos y una cabeza polar (ver Figura 12). Como resultado, se forma una doble capa eléctrica alrededor de las NP's, lo que a su vez genera una repulsión estérica dentro de las NP's, generando así un sistema de estabilización mutua. (Valenzuela et al., 2023).

Figura 12

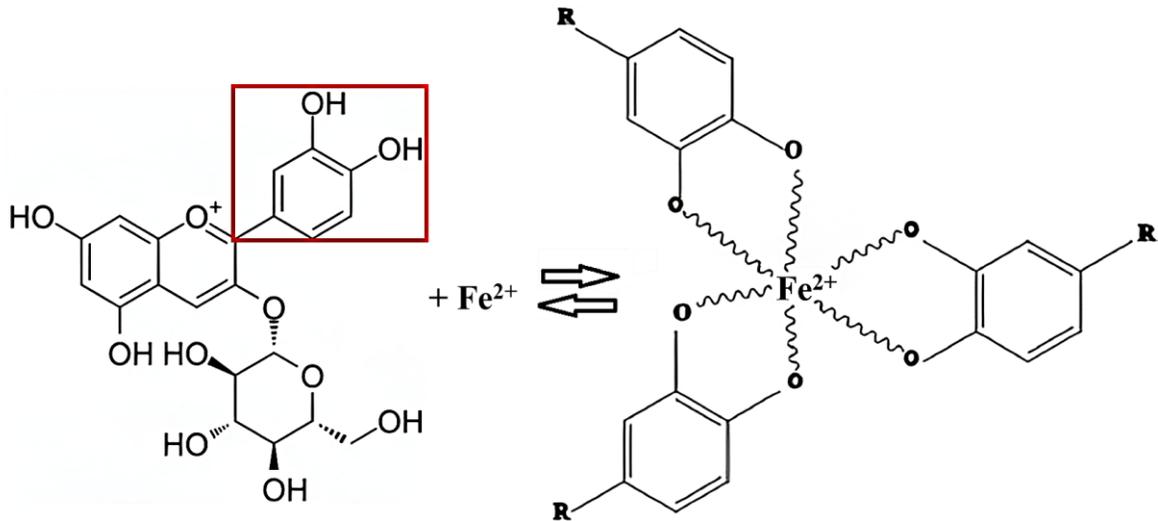
Tipos de estabilización de las nanopartículas de magnetita



Nota, Tomado de Wang et al., 2015.

Figura 13

Interacción entre los grupos hidroxilo de las antocianinas y el hierro divalente.



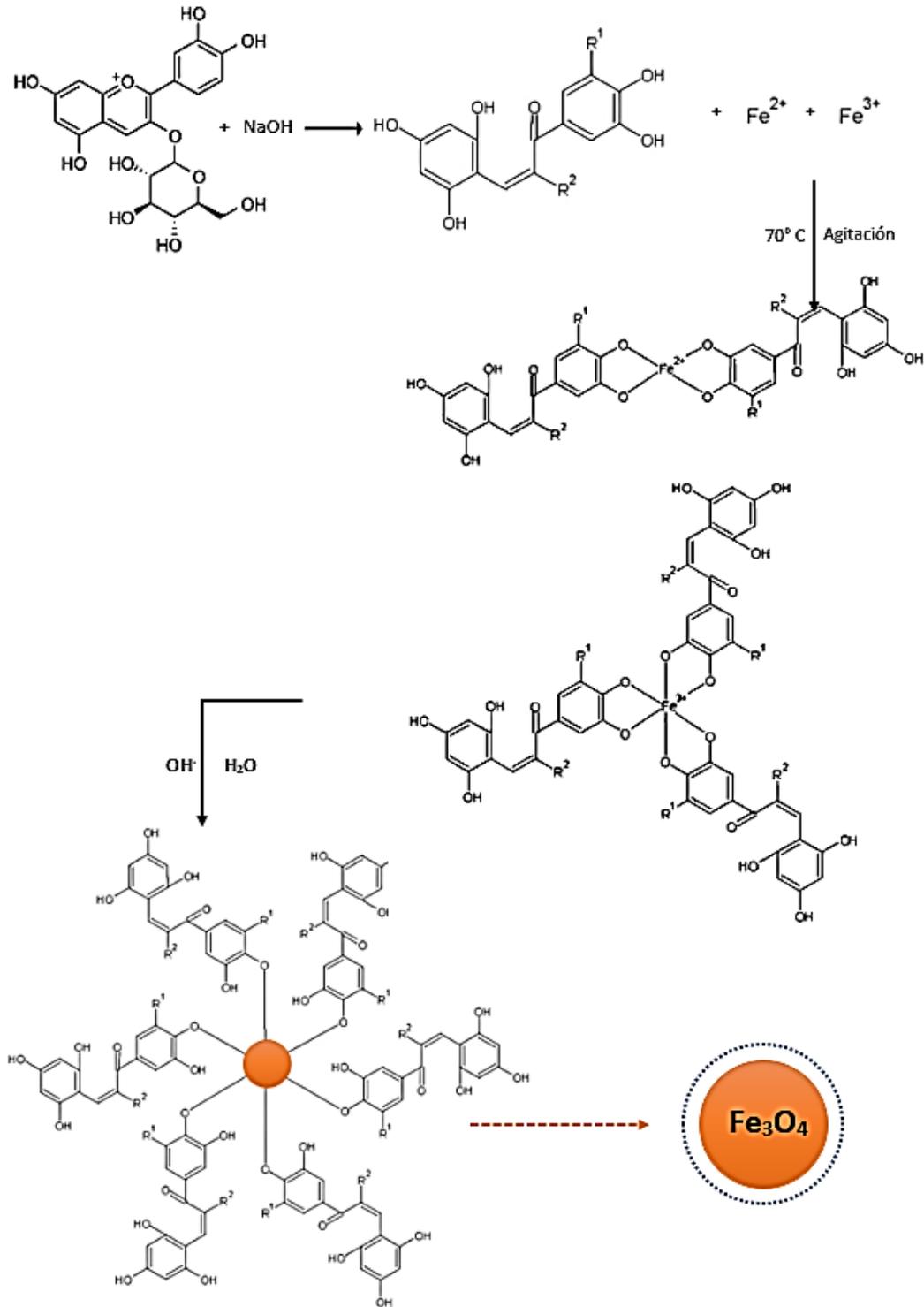
Nota: Elaboración propia.

La complejidad de esta estabilización estérica se origina debido a la interacción entre las NP's y los compuestos fenólicos involucrados en el proceso de síntesis. Un ejemplo ilustrativo de esto se encuentra en el estudio realizado por Wang, Fang y Mallavarapu, donde proponen la formación de una estructura de hierro-polifenoles (ver *Figura 13*).

En este estudio, los polifenoles desempeñan un papel crucial como agentes antioxidantes y estabilizadores durante la síntesis de las NPs. Estos compuestos permiten la estabilización del Fe²⁺ dada por los ligandos generados por los polifenoles, siendo estos los más susceptibles a ser oxidados (Wang et al., 2015).

Figura 14

Posible mecanismo de reacción de la formación de nanopartículas de magnetita



Nota. Elaboración propia

En la Figura 14 se presenta el posible mecanismo de reacción que se ha propuesto para la formación de nanopartículas de magnetita, el cual parte desde una de las antocianinas con mayor proporción en el maíz morado, el cual con un acondicionamiento de pH a 12 con el hidróxido de sodio cambia su estructura a la de una chalcona, aperturando el anillo central de la cianidina-3-O-glucosido (Azman et al., 2022), el cual al reaccionar con los iones hierro divalente y trivalente, forman un complejo hierro-polifenol, formando enlaces de coordinación de tipo tetraédrico y octaédrico respectivamente y debido a los procesos de nucleación durante la síntesis se logra la conformación de las nanopartículas de magnetita, encontrándose estables por la presencia de los compuestos polifenólicos (Wang et al., 2015).

4.1.2. Porcentaje de rendimiento

Para el porcentaje de rendimiento se realizó comparando la cantidad de hierro total antes y después de la síntesis. Entonces se usó 4g de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y 10g de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ para la síntesis lo que equivale a 2.871 g.

Por otro lado, se obtuvo 5.0155 g de magnetita sintetizada la cual fue analizada por EAA, dando como resultado 2.806 g de hierro total posterior a la síntesis. Entonces el porcentaje de rendimiento en función al hierro total esta dado de la siguiente manera:

$$\text{Porcentaje de rendimiento} = \frac{\text{Valor experimental}}{\text{Valor teórico}} \times 100\% \dots(2)$$

$$\text{Porcentaje de rendimiento} = \frac{2.806\text{g}}{2.871\text{g}} \times 100\%$$

$$\text{Porcentaje de rendimiento} = 97.73\%$$

El porcentaje de rendimiento fue 97.73% lo cual indicó que el método de síntesis verde usado es eficaz para la obtención de magnetita.

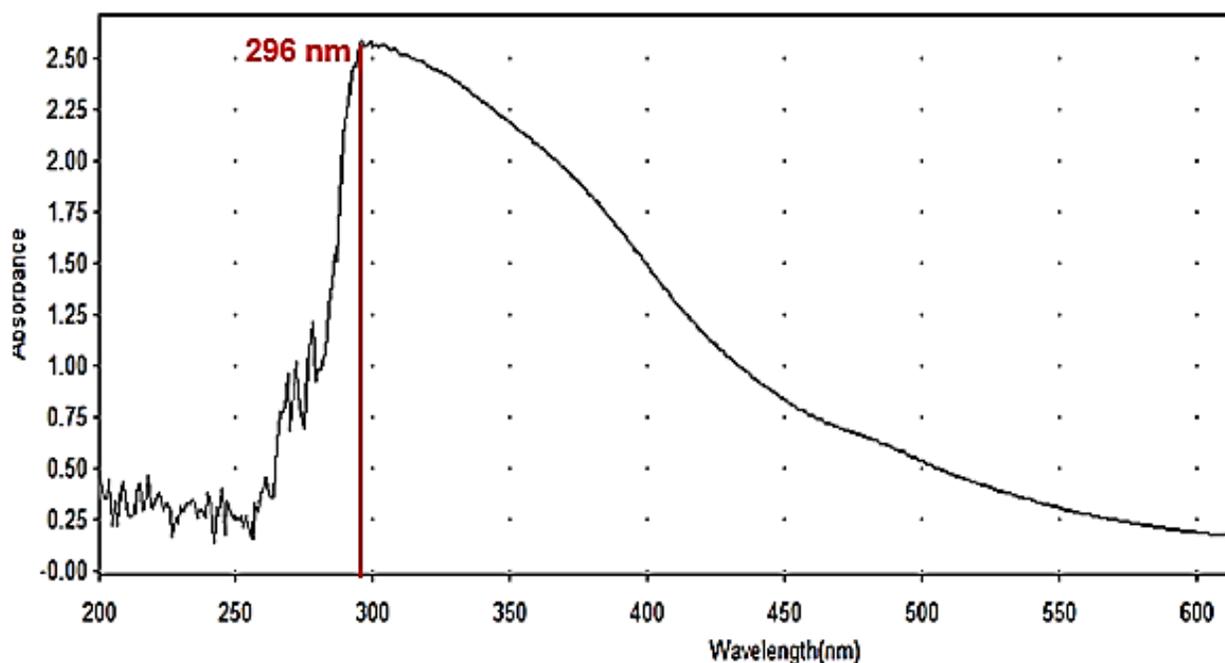
4.2. Resultados de la caracterización de las NP'sM

4.2.1. Longitud de onda por espectrofotometría UV-Visible

Observando la *Figura 15* para las NP'sM sintetizadas a partir de FeCl_3 y FeSO_4 usando extracto del marlo de maíz morado (*Zea mays L.*) se obtiene un pico de absorción a la longitud de onda de 296 nm, quedando dentro del rango de la magnetita expuesto en la investigación de Ahmed y asociados.

Figura 15

Espectro UV-Visible de NP'sM sintetizadas a partir de FeCl_3 y FeSO_4



Nota. Elaboración propia.

Esta banda de absorción en la longitud de onda de 296 nm evidencia la presencia de nanopartículas, debido al fenómeno de resonancia de plasmón superficial así lo demostró Abdallah y Al-Haddad, (2021) indicando que la absorbancia de resonancia plasmónica superficial (SPR) de nanopartículas de magnetita ocurre en el rango de longitud de onda entre 290 nm – 519 nm la cual es asociada a nanopartículas esféricas monodispersas.

Por su parte, Ahmed y sus asociados, confirmaron que la formación de nanopartículas de magnetita ocurre en longitudes de onda entre 190 nm y 340 nm (Ahmed et al., 2023).

4.2.2. Determinación del área superficial

El área superficial de las NP'sM sintetizadas fue 107.69 m²/g, este alto valor se le puede atribuir al proceso de calcinado ya que permite eliminar impurezas residuales provocando la reducción en el tamaño de las partículas dando como resultado el incremento del área superficial específica, es decir, a medida que las nanopartículas se vuelven más pequeñas, la cantidad de superficie disponible en relación con su volumen aumenta, lo que, a su vez, influye en la modificación de la porosidad de las nanopartículas y contribuye a un aumento en el área superficial (Shukla et al., 2022).

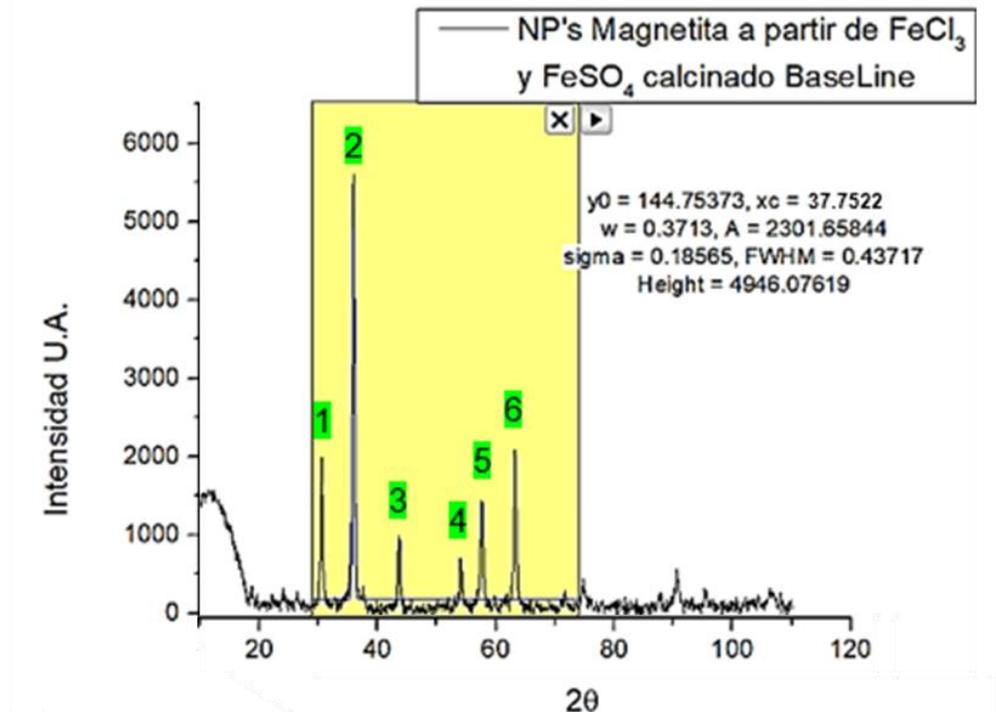
Las nanopartículas sintetizadas en la presente investigación poseen un área superficial de 107.69 m²/g, este resultado concuerda con otros valores del área superficial de las nanopartículas de magnetita como 52 m²/g (Belletini et al., 2024), 80 m²/g (Rana et al., 2025), 100 m²/g (Iconaru et al., 2016) e incluso 152 m²/g (Lin et al., 2024).

4.2.3. Caracterización por Difracción de Rayos X (XRD)

En la *Figura 16* se observa el difractograma obtenido

Figura 16

Difractograma de NP'sM sintetizadas

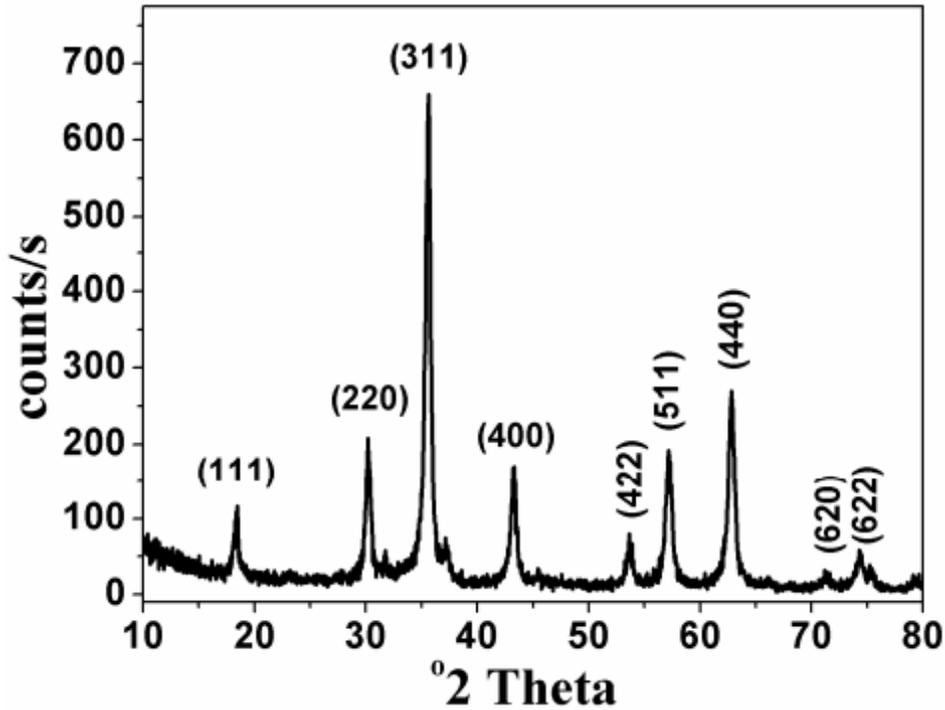


Nota. Elaboración propia, obtenida con el software Origin Pro.

En la *Figura 16* se observa la presencia de 6 picos correspondiente a la magnetita Fe₃O₄ en los ángulos 2θ (30.35, 35.74, 43.42, 53.90, 57.43 y 63.06), se seleccionaron estos picos ya que corresponden a los índices de Miller (220, 311, 400, 422, 511 y 440) característicos de la magnetita, comparando con la *Figura 17* (El Ghandoor et al., 2012), de esta manera solo se tomó en cuenta los picos que coinciden en el ángulo 2θ y se consideró sus anchos de pico a la altura media FWHM (Full Width at Half Maximum) correspondientes a 0.65, 0.89, 0.54, 0.51, 0.63, 0.71; usando la ecuación de Scherrer, se calculó los tamaños de cristalita para las NP'sM sintetizadas resultando: 12.66 nm, 9.38 nm, 15.84 nm, 17.47 nm, 14.38 nm y 13.13 nm, el promedio de tamaño de cristalita fue 13.81 nm.

Figura 17

Difractograma de NP's Fe_3O_4 con los índices de Miller.



Nota. Tomado de El Ghandoor et al., (2012).

El tamaño promedio de cristalita de 13.81 nm se encuentra dentro de los valores presentados en los estudios de Picasso y sus asociados, quienes obtuvieron el tamaño de cristalita en el rango de 2 nm a 20 nm (Picasso et al., 2012).

Aunque no se dispone de información detallada sobre las condiciones específicas de síntesis de este tamaño de cristalita en particular (13.81 nm), es plausible sugerir que involucra la combinación de factores que moderan el crecimiento cristalino, esto resaltaría el efecto que tienen las condiciones de síntesis en el tamaño de cristalita.

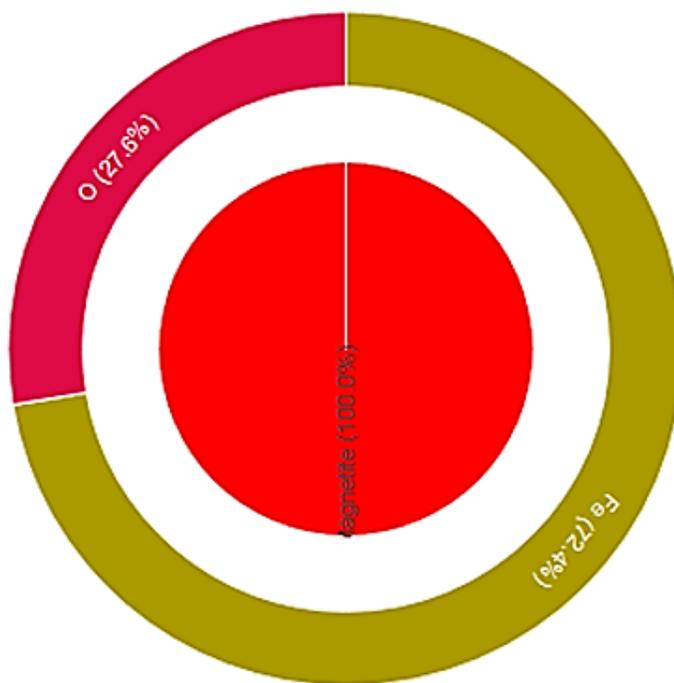
4.2.3.1. Diagrama de fases

Teniendo en cuenta los polimorfismos de óxido de hierro como la magnetita (Fe_3O_4), maghemita ($\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_3$) y la hematita (Fe_2O_3), se realizó el análisis del difractograma obtenido utilizando el software Match y se confirmó la relación estequiométrica entre el hierro (72.4% Fe_3) y oxígeno (27.6% O_4) propia de la magnetita (Fe_3O_4) como se muestra en la Figura 18, además, el diagrama de fases muestra que la composición porcentual de la magnetita (Fe_3O_4) fue del 100%.

Figura 18

Diagrama de fases de las NP'sM

Amounts of Phases and Elements (Weight %)



Nota. Elaboración propia, obtenida del software Match.

4.2.3.2. Determinación del tamaño de cristalita de NP'sM

Utilizando la ecuación de Scherrer se calculó el tamaño promedio de cristalita de las NP'sM sintetizadas, resultando en 13.81 nm, en la *Tabla 8* se muestra con mayor detalle.

Tabla 8

Determinación del tamaño promedio de la cristalita para las NP'sM sintetizadas

K	λ	Posición del Pico 2θ (°)	FWHM β (°)	Tamaño Cristalita (nm)	Tamaño Promedio (nm)
0.9	0.15406	30.35	0.65	12.66	13.81
		35.74	0.89	9.38	
		43.42	0.54	15.84	
		53.90	0.51	17.47	
		57.43	0.63	14.38	
		63.06	0.71	13.13	

Fuente: Elaboración propia.

El método de síntesis de las NP'sM planteada en la presente investigación ha sido favorable para obtener tamaños promedio de cristalita de escala nanométrica.

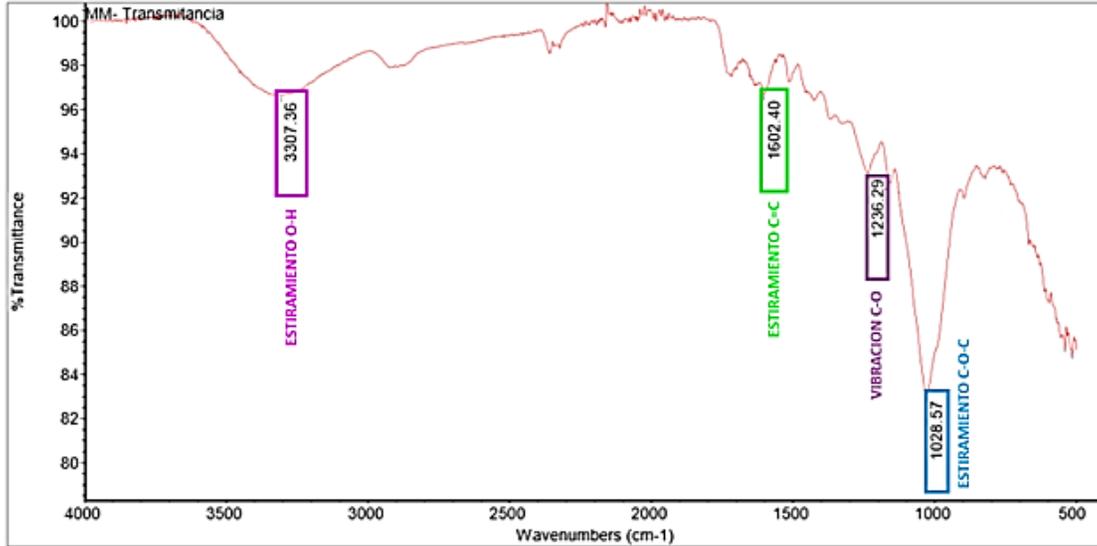
4.2.4. Caracterización por Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR-ATR)

4.2.4.1. Caracterización por FTIR-ATR del extracto acuoso del marlo de maíz morado (*Zea mays L.*)

Como se puede observar en la *Figura 19* se tiene el espectro infrarrojo del extracto acuoso del marlo de maíz morado, utilizando el equipo de FTIR-ATR, realizando el rastreo de bandas con el software OMNIC 9.0 se observó que el extracto acuoso del marlo de maíz morado presenta en 1028.57 cm^{-1} una banda correspondiente al estiramiento C-O-C característico de los enlaces glicosídicos, así mismo, la señal en 126.29 cm^{-1} corresponde a la vibración C-O característico de los éteres o esteres, también se identificó en 1602.40 cm^{-1} una señal correspondiente al estiramiento C=C propio de los anillos aromáticos (presente en los polifenoles), y por último en 3307.36 cm^{-1} , correspondiente a los grupos O-H (Wade, 2004).

Figura 19

Espectro infrarrojo del extracto acuoso del marlo de maíz morado (*Zea mays L.*)



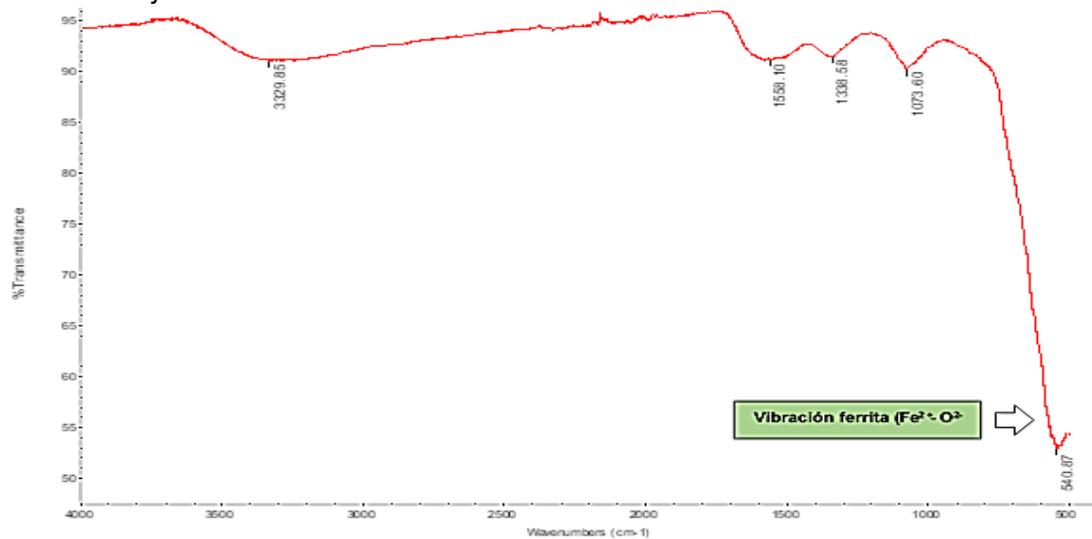
Nota. Elaboración propia, obtenida con el software OMNIC 9.0.

4.2.4.2. Caracterización por FTIR-ATR de las NP'sM.

En la *Figura 20* se observa el espectro infrarrojo de las nanopartículas de magnetita sintetizadas.

Figura 20

Espectro infrarrojo de las NP'sM sintetizadas

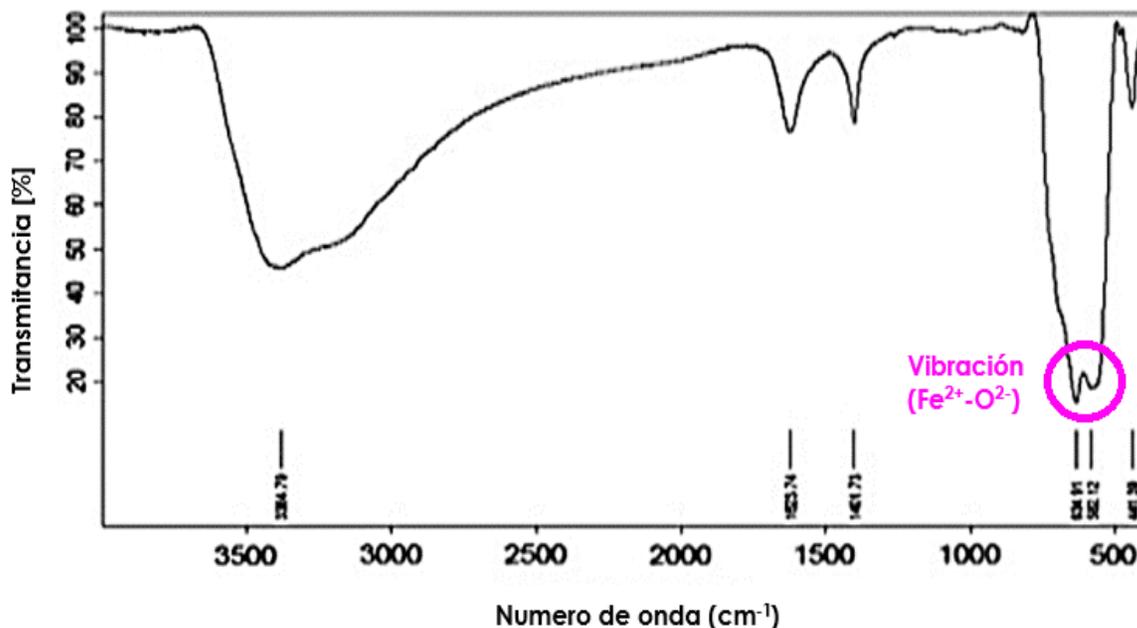


Nota. Elaboración propia, obtenida con el software OMNIC 9.0.

Posterior al rastreo de bandas con el programa OMNIC 9 se identificó a 540.87 cm^{-1} la señal característica de la magnetita y que corresponden a vibración de las ferritas ($\text{Fe}^{2+}\text{-O}^{2-}$) (Khalil, 2015) como muestra la Figura 21.

Figura 21

Espectro FTIR-ATR de las nanopartículas de magnetita sintetizadas por Khalil, 2015



Nota. Tomado de Khalil, 2015.

4.3. Remoción de cadmio (Cd^{2+}) analizado por espectrometría de absorción atómica.

En la Tabla 9 corresponde a la concentración de cadmio (Cd^{2+}) analizada por espectrometría de absorción atómica (análisis realizado por triplicado) después de aplicar las nanopartículas de magnetita sintetizadas (en diferentes cantidades), en esta tabla se muestran las absorbancias obtenidas en el espectrómetro de absorción atómica, también se muestra la desviación estándar para cada muestra.

Las concentraciones se calcularon con la ecuación de correspondencia obtenida en la curva patrón:

$$Y_1 = 0.2881(X_1) + 0.0036 \dots (3)$$

Donde:

X_1 = Concentración (Cd^{2+})

Y_1 = Absorbancia leída

Tabla 9

Datos de remoción de Cd^{2+} en tiempos de contacto de 24 y 48 horas

Remoción de (Cd^{2+}) 24 horas						
Muestra	ABS Promedio	ABS Rep 1	ABS Rep 2	ABS Rep 3	Concentración (Cd^{2+})	Desviación estándar
M1	1.934	1.936	1.931	1.935	6.7 mg/L	± 0.0026
M2	0.954	0.955	0.955	0.952	3.3 mg/L	± 0.0017
M3	0.868	0.866	0.869	0.869	3 mg/L	± 0.0017
Remoción de (Cd^{2+}) 48 HORAS						
Muestra	ABS Promedio	ABS Rep 1	ABS Rep 2	ABS Rep 3	Concentración (Cd^{2+})	Desviación estándar
M1	1.588	1.586	1.589	1.589	5.5 mg/L	± 0.0017
M2	0.753	0.753	0.751	0.755	2.6 mg/L	± 0.0020
M3	0.580	0.58	0.581	0.579	2 mg/L	± 0.0010

Nota. Se realizó 3 repeticiones para cada muestra y se calculó la desviación estándar, elaboración propia.

Así mismo en la Tabla 10 se presenta las concentraciones removidas de iones cadmio (Cd^{2+}) en tiempos de contacto de 24 y 48 horas.

Tabla 10

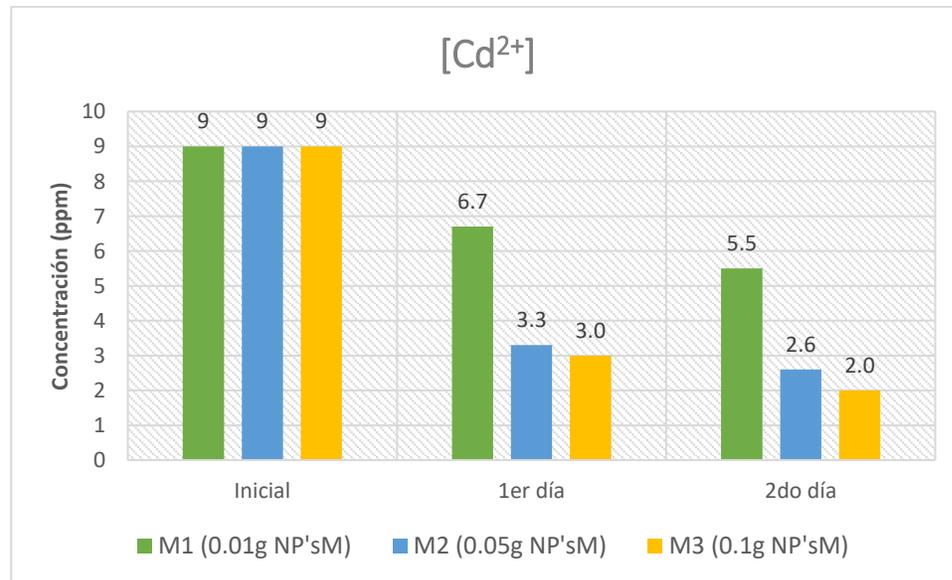
Concentración de cadmio (Cd^{2+}) removido después de 24 y 48 horas

MUESTRA	Cantidad NP'sM añadidas (g)	Cadmio (Cd^{2+})				
		$[Cd^{2+}]_{Inicial}$ (ppm)	$[Cd^{2+}]_{24horas}$ (ppm)	$[Cd^{2+}]_{24horas}$ REMOVIDO (ppm)	$[Cd^{2+}]_{48horas}$ (ppm)	$[Cd^{2+}]_{48horas}$ REMOVIDO (ppm)
M1	0.01	9	6.7	2.3	5.5	3.5
M2	0.05	9	3.3	5.7	2.6	6.4
M3	0.1	9	3	6	2	7

Nota. Elaboración propia.

Gráfico 2

Comparación de la concentración de cadmio (Cd^{2+}) inicial, después de 24 y 48 horas



Nota. Elaboración propia.

En el Gráfico 2 se compara la concentración de cadmio inicial frente a los procesos de remoción en 24 y 48 horas, partiendo de 9 ppm de Cd^{2+} , obteniendo para 24 horas de contacto concentraciones de 6.7 ppm, 3.3 ppm y 3 ppm para los experimentos M1, M2 y M3 con

cantidades de NP'sM de 0.01 g, 0.05 g y 0.1 g añadidas respectivamente, y para 48 horas de contacto se obtuvo concentraciones de 5.5 ppm, 2.6 ppm y 2 ppm para los experimentos M1, M2 y M3 respectivamente, en los tres experimentos la remoción se realizó a pH igual a 5.5 y a temperatura ambiente (20 °C).

4.3.1. Porcentaje de remoción de cadmio (Cd^{2+})

El porcentaje de remoción de cadmio se realizó mediante la siguiente formula:

$$\text{Porcentaje de remoción} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \quad \dots(4)$$

Donde:

C_i = Concentración inicial de cadmio (Cd^{2+})

C_f = Concentración final de cadmio (Cd^{2+})

En la *Tabla 11* y *Gráfico 3* se muestran los porcentajes de remoción obtenidos, a 24 horas de tiempo de contacto los porcentajes de remoción fueron 25.6%, 63.3% y 66.7% para los experimentos M1, M2 y M3 con cantidades de NP'sM de 0.01 g, 0.05 g y 0.1 g añadidas respectivamente, y para 48 horas de tiempo de contacto los porcentajes de remoción fueron 38.9%, 71.1% y 77.8% para los experimentos M1, M2 y M3.

Tabla 11

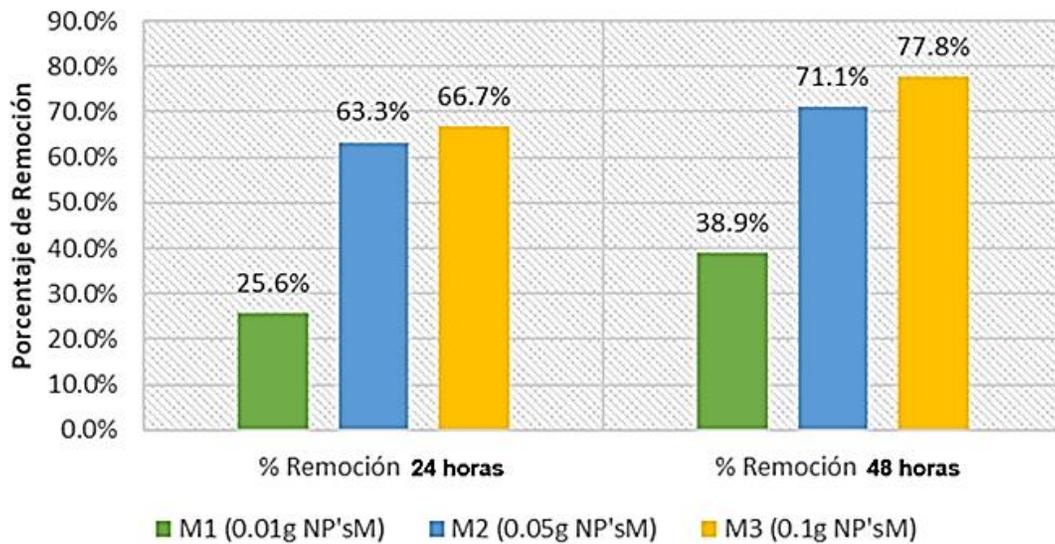
Porcentaje de cadmio (Cd^{2+}) removido utilizando NP'sM sintetizadas

Cadmio (Cd^{2+})						
MUESTRA	Cantidad NP'sM añadidas (g)	$[Cd^{2+}]_{inicial}$ (ppm)	$[Cd^{2+}]_{24horas}$ REMOVIDO (ppm)	% Remoción 24 horas	$[Cd^{2+}]_{48horas}$ REMOVIDO (ppm)	% Remoción 48 horas
M1	0.01	9	2.3	25.6	3.5	38.9
M2	0.05	9	5.7	63.3	6.4	71.1
M3	0.1	9	6	66.7	7	77.8

Nota. Elaboración propia.

Gráfico 3

Porcentajes de remoción de cadmio (Cd^{2+}) en 24 y 48 horas



Nota. Elaboración propia.

La investigación realizada por J. Lin y sus socios evidenció la remoción del 98.5% de cadmio al utilizar nanopartículas de magnetita sintetizadas con extracto de *Excoecaria*

cochinchinensis Lour (J. Lin et al., 2018). Además, el equipo de M. H. Ehrampoush mostró porcentajes máximos de remoción de cadmio iguales al 89.6% utilizando nanopartículas de magnetita modificadas con diferentes surfactantes (Ehrampoush et al., 2015).

El porcentaje máximo de remoción de cadmio fue del 77.8% en la presente investigación, este resultado se encuentra en tendencia con los trabajos reportados.

4.4. Remoción de cromo (Cr⁶⁺) analizada por espectrofotometría UV-Visible.

En la Tabla 12 se muestra las concentraciones de cromo (Cr⁶⁺) analizada por espectrofotometría UV-Visible (análisis realizado por triplicado) después de aplicar las nanopartículas de magnetita sintetizadas (en diferentes cantidades), en esta tabla se muestran las absorbancias obtenidas en el espectrómetro de absorción atómica, también se muestra la desviación estándar para cada muestra.

Las concentraciones se hallaron calculando con la ecuación de correspondencia siguiente, obtenida en la curva patrón:

$$Y_2 = 0.0172(X_2) + 0.0492 \dots (5)$$

Donde:

X₂ = Concentración (Cr⁶⁺)

Y₂ = Absorbancia leída

Tabla 12

Datos de remoción de Cr⁶⁺ en tiempos de contacto de 24 y 48 horas

Remoción de (Cr⁶⁺) 24 horas						
Muestra	ABS Promedio	ABS Rep 1	ABS Rep 2	ABS Rep 3	Concentración (Cr⁶⁺)	Desviación estándar
M1	0.154	0.157	0.153	0.152	6.1 mg/L	± 0.0026
M2	0.094	0.095	0.092	0.095	2.6 mg/L	± 0.0017
M3	0.066	0.066	0.063	0.069	1 mg/L	± 0.0030
Remoción de (Cr⁶⁺) 48 HORAS						
Muestra	ABS Promedio	ABS Rep 1	ABS Rep 2	ABS Rep 3	Concentración (Cr⁶⁺)	Desviación estándar
M1	0.132	0.134	0.129	0.133	4.8 mg/L	± 0.0026
M2	0.068	0.066	0.067	0.071	1.1 mg/L	± 0.0026
M3	0.053	0.051	0.052	0.056	0.2 mg/L	± 0.0026

Nota. Se realizó 3 repeticiones para cada muestra y se calculó la desviación estándar, elaboración propia.

Así mismo en la Tabla 13 se muestran los resultados de remoción para cromo (Cr⁶⁺) analizada por espectrofotometría UV-Visible

Tabla 13

Concentración de cromo (Cr⁶⁺) removido después de 24 y 48 horas

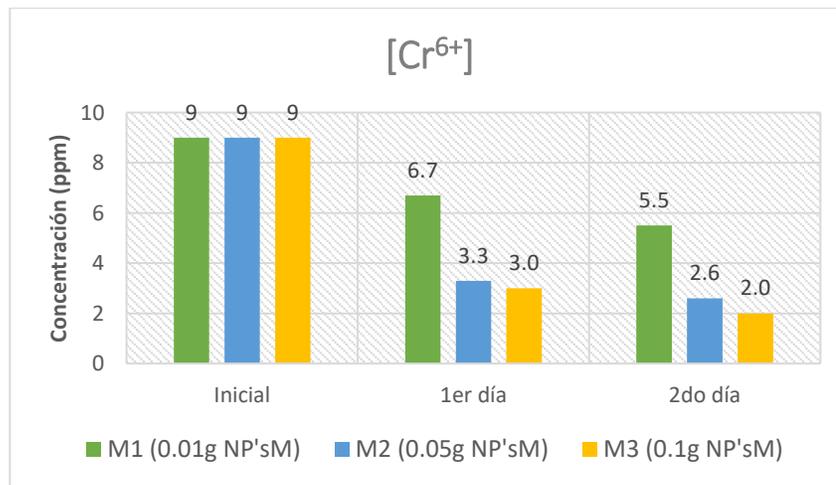
Cromo (Cr⁶⁺)						
MUESTRA	Cantidad NP'sM añadidas (g)	[Cr⁶⁺]_{Inicial} (ppm)	[Cr⁶⁺]_{24horas} (ppm)	[Cr⁶⁺]_{24horas} REMOVIDO (ppm)	[Cr⁶⁺]_{48horas} (ppm)	[Cr⁶⁺]_{48horas} REMOVIDO (ppm)
M1	0.01	10	6.1	3.9	4.8	5.2
M2	0.05	10	2.6	7.4	1.1	8.9
M3	0.1	10	1.0	9	0.2	9.8

Nota. Elaboración propia.

En el *Gráfico 4* se compara la concentración del cromo inicial frente a los procesos de remoción en 24 y 48 horas, partiendo de 10 ppm de Cr⁶⁺, obteniendo para 24 horas de contacto concentraciones de 6.1 ppm, 2.6 ppm y 1.0 ppm para los experimentos M1, M2 y M3 con cantidades de NP'sM de 0.01 g, 0.05 g y 0.1 g añadidas respectivamente, y para 48 horas de contacto se obtuvo concentraciones de 4.8 ppm, 1.1 ppm y 0.2 ppm para los experimentos M1, M2 y M3 respectivamente, en los tres experimentos la remoción se realizó a pH igual a 6.0 y a temperatura ambiente (20 °C).

Gráfico 4

Comparación de la concentración de cromo (Cr⁶⁺) inicial, después de 24 y 48 horas



Nota. Elaboración propia.

4.4.1. Porcentaje de remoción de cromo

El porcentaje de remoción de cromo se realizó mediante la siguiente formula:

$$\%Remoción = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \quad \dots(6)$$

Donde:

C_i = Concentración inicial de cromo (Cr⁶⁺)

C_f = Concentración final de cromo (Cr⁶⁺)

La *Tabla 14* y *Gráfico 5* muestran los porcentajes de remoción obtenidos, a 24 horas de tiempo de contacto los porcentajes de remoción fueron 39.0%, 73.7% y 89.7% para los experimentos M1, M2 y M3 con cantidades de NP'sM de 0.01 g, 0.05 g y 0.1 g añadidas respectivamente, y para 48 horas de tiempo de contacto los porcentajes de remoción fueron 52.3%, 89.0% y 97.6% para los experimentos M1, M2 y M3.

Tabla 14

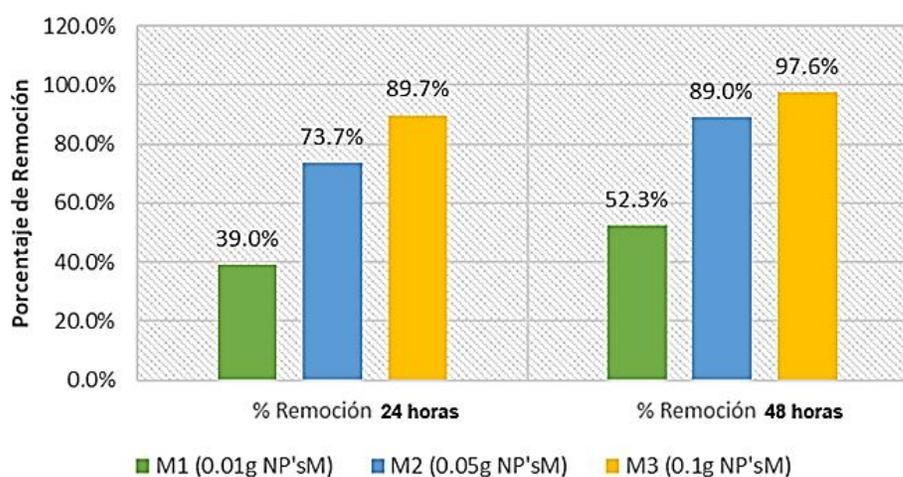
Porcentajes de cromo (Cr^{6+}) removido utilizando NP'sM sintetizadas

MUESTRA	Cromo (Cr^{6+})					
	Cantidad NP'sM añadidas (g)	$[Cr^{6+}]_{Inicial}$ (ppm)	$[Cr^{6+}]_{24horas}$ REMOVIDO (ppm)	% Remoción 24 horas	$[Cr^{6+}]_{48horas}$ REMOVIDO (ppm)	% Remoción 48 horas
M1	0.01	10	3.9	39.0	5.2	52.3
M2	0.05	10	7.4	73.7	8.9	89.0
M3	0.1	10	9	89.7	9.8	97.6

Nota. Elaboración propia.

Gráfico 5

Porcentajes de remoción de cromo (Cr^{6+}) en 24 y 48 horas



Nota. Elaboración propia.

Los resultados obtenidos de la remoción de cromo (Cr^{6+}) utilizando NP'sM sintetizadas fueron elevados, logrando el porcentaje de remoción máximo de 97.6%, lo cual concuerda con los porcentajes de remoción de 69.9% y 98.3% presentado en el estudio de J. Hu, I. M. C. Lo y G. Chen (Hu et al., 2004). Así mismo, en la investigación de J. Ye y su equipo lograron el 89.2% de remoción máxima de cromo (Cr^{6+}) (Ye et al., 2021).

4.5. Remoción de cobre (Cu^{2+}) analizada por espectrometría de absorción atómica

En la Tabla 15 se muestran las concentraciones de cobre (Cu^{2+}) analizada por espectrometría de absorción atómica (análisis realizado por triplicado) después de aplicar las nanopartículas de magnetita sintetizadas (en diferentes cantidades), en esta tabla se muestran las absorbancias obtenidas en el espectrómetro de absorción atómica, también se muestra la desviación estándar para cada muestra.

Las concentraciones se hallaron calculando con la ecuación de correspondencia siguiente, obtenida en la curva patrón:

$$Y_3 = 0.0608(X_3) + 0.0055 \dots (7)$$

Donde:

X_3 = Concentración (Cu^{2+})

Y_3 = Absorbancia leída

Tabla 15

Datos de remoción de Cu²⁺ en tiempos de contacto de 24 y 48 horas

Remoción de (Cu²⁺) 24 horas						
Muestra	ABS Promedio	ABS Rep 1	ABS Rep 2	ABS Rep 3	Concentración (Cu²⁺)	Desviación estándar
M1	0.334	0.335	0.336	0.334	5.4 mg/L	± 0.0010
M2	0.261	0.262	0.263	0.258	4.2 mg/L	± 0.0026
M3	0.145	0.145	0.143	0.147	2.3 mg/L	± 0.0020
Remoción de (Cu²⁺) 48 HORAS						
Muestra	ABS Promedio	ABS Rep 1	ABS Rep 2	ABS Rep 3	Concentración (Cu²⁺)	Desviación estándar
M1	0.303	0.301	0.304	0.304	4.9 mg/L	± 0.0017
M2	0.230	0.23	0.229	0.231	3.7 mg/L	± 0.0010
M3	0.115	0.116	0.117	0.112	1.8 mg/L	± 0.0026

Nota. Se realizó 3 repeticiones para cada muestra y se calculó la desviación estándar, elaboración propia.

Así mismo en la Tabla 16 se muestran los resultados de remoción para cobre (Cu²⁺) analizada por espectrometría de absorción atómica.

Tabla 16

Concentración de cobre (Cu²⁺) removido después de 24 y 48 horas

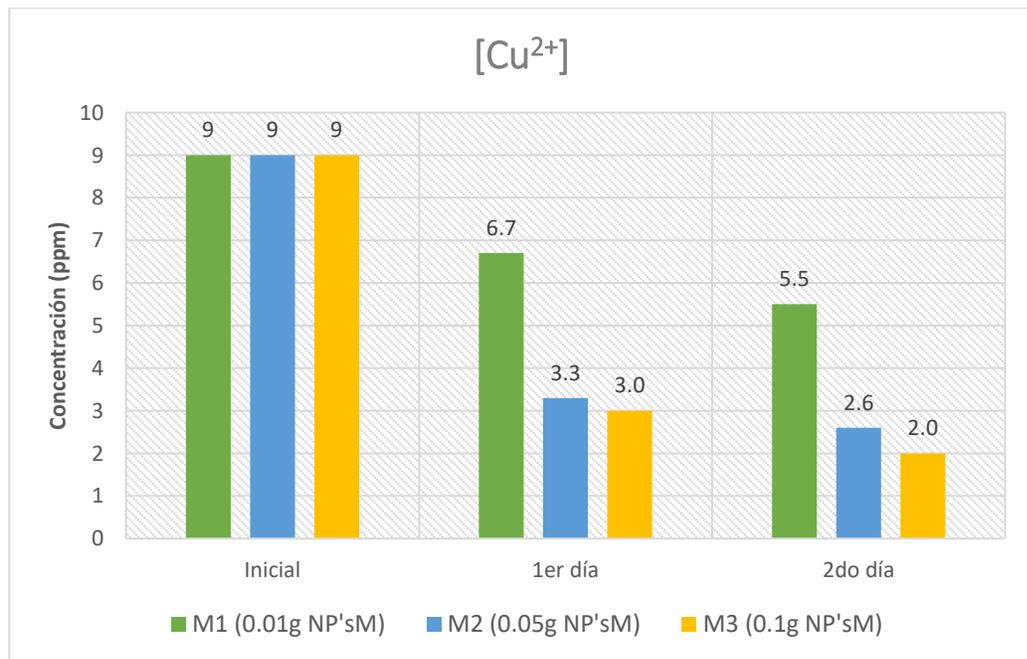
Cobre (Cu²⁺)						
MUESTRA	Cantidad NP'sM añadidas (g)	[Cu²⁺]_{Inicial} (ppm)	[Cu²⁺]_{24horas} (ppm)	[Cu²⁺]_{24horas} REMOVIDO (ppm)	[Cu²⁺]_{48horas} (ppm)	[Cu²⁺]_{48horas} REMOVIDO (ppm)
M1	0.01	8.7	5.4	3.3	4.9	3.8
M2	0.05	8.7	4.2	4.5	3.7	5
M3	0.1	8.7	2.3	6.4	1.8	6.9

Nota. Elaboración propia.

En el *Gráfico 6* se compara de la concentración de cobre inicial frente a los procesos de remoción en 24 y 48 horas, partiendo de 8.7 ppm de Cu^{2+} y obteniendo para 24 horas de contacto concentraciones de 5.4 ppm, 4.2 ppm y 2.3 ppm para los experimentos M1, M2 y M3 con cantidades de NP'sM de 0.01 g, 0.05 g y 0.1 g añadidas respectivamente, y para 48 horas de contacto se obtuvo concentraciones de 4.9 ppm, 3.7 ppm y 1.8 ppm para los experimentos M1, M2 y M3 respectivamente, en los tres experimentos la remoción se realizó a pH igual a 6.0 y a temperatura ambiente (20 °C).

Gráfico 6

Comparación de la concentración de cobre (Cu^{2+}) inicial, después de 24 y 48 horas



Nota. Elaboración propia.

4.5.1. Porcentaje de remoción de cobre

El porcentaje de remoción de cobre se realizó mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{Remoción} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \quad \dots(8)$$

Donde:

C_i = Concentración inicial de cobre (Cu^{2+})

C_f = Concentración final de cobre (Cu^{2+})

En la *Tabla 17* y *Gráfico 7* se muestran los porcentajes de remoción obtenidos, para 24 horas de tiempo de contacto los porcentajes de remoción fueron 37.9%, 51.7% y 73.6% para los experimentos M1, M2 y M3 con cantidades de NP'sM de 0.01g, 0.05g y 0.1 g añadidas respectivamente, y para 48 horas de tiempo de contacto los porcentajes de remoción fueron 43.7%, 57.5% y 79.3% para los experimentos M1, M2 y M3.

Tabla 17

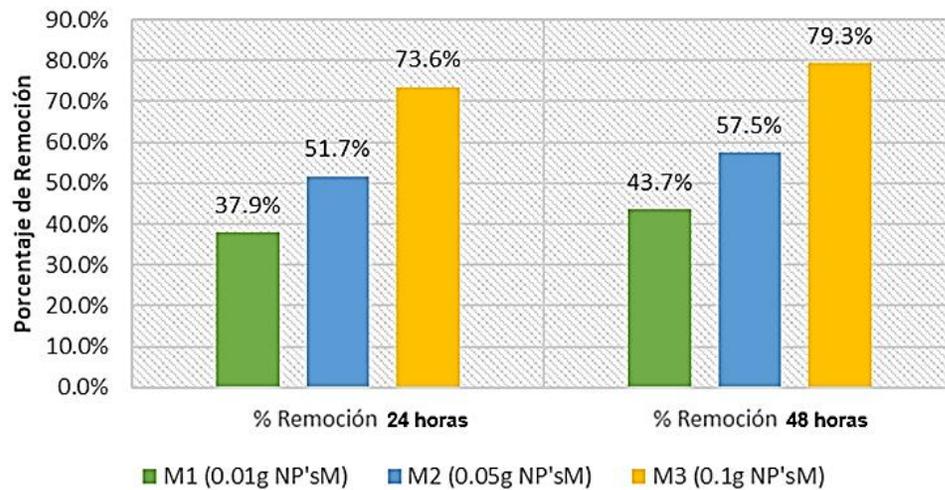
Porcentaje cobre (Cu^{2+}) removido utilizando NP'sM sintetizadas

Cobre (Cu^{2+})						
MUESTRA	Cantidad NP'sM añadidas (g)	[Cu]^{inicial} (ppm)	[Cu²⁺]_{24horas} REMOVIDO (ppm)	% Remoción 24 horas	[Cu²⁺]_{48horas} REMOVIDO (ppm)	% Remoción 48 horas
M1	0.01	8.7	3.3	37.9	3.8	43.7
M2	0.05	8.7	4.5	51.7	5	57.5
M3	0.1	8.7	6.4	73.6	6.9	79.3

Nota. Elaboración propia.

Gráfico 7

Porcentajes de remoción de cobre (Cu^{2+}) en 24 y 48 horas



Nota. Elaboración propia.

Se obtuvo el porcentaje de remoción máximo de 79.3%, por su parte, Iconaru y sus socios, obtuvieron el porcentaje de remoción del 69.5% al usar nanopartículas de óxido de hierro sintetizadas a partir de extractos de plantas para la remoción del cobre de aguas residuales (Iconaru et al., 2016). Esta variación podría deberse a las diferentes condiciones experimentales en la remoción, así mismo, como al tamaño y área superficial de la nanopartícula, lo que influiría en la capacidad de adsorción del cobre (Cu^{2+}).

CONCLUSIONES

1. Se obtuvo el extracto acuoso del marlo de maíz morado (*Zea mays L.*) y se verificó la presencia de compuestos fenólicos, tales como antocianinas, lo que se pudo comprobar mediante el análisis de FTIR que permitió observar los picos característicos asociados a estos compuestos fenólicos.
2. Se logró la síntesis de nanopartículas de magnetita usando extracto acuoso del marlo de maíz morado (*Zea mays L.*), lo que se evidenció mediante el diagrama de fases, encontrándose un rendimiento del 97.73% en función al hierro total, con 13.81 nm de tamaño promedio de cristalita y un área superficial de 107.69 m²/g.
3. Las NP's de magnetita removieron cadmio hasta en un 77.8%, cromo en un 97.6% y cobre en 79.3%, por lo que, las NP'sM sintetizadas usando extracto acuoso del marlo de maíz morado (*Zea mays L.*) demostraron que es posible su aplicación en la remoción de metales pesados, siendo más selectiva con la remoción del cromo.

RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda realizar las mediciones del cromo por espectroscopía de absorción atómica con las lámparas adecuadas, así mismo realizar caracterizaciones como Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM), Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y Dispersión de Luz Dinámica (DLS), las cuales nos ayudarán a reconocer el tamaño de la nanopartícula sintetizada, así como la morfología.
- ✓ Se recomienda el uso de materiales completamente limpios, uso de agua triplemente destilada y/o agua químicamente pura, así mismo el uso de bibliotecas que tengan los espectros de interés en las caracterizaciones de FTIR.
- ✓ Esta investigación proporciona información valiosa para desarrollar métodos más efectivos y sostenibles que contribuyan a abordar el problema de la contaminación del agua de manera más eficaz y respetuosa con el medio ambiente. Se recomienda profundizar esta investigación con el propósito de aplicarlo en la remoción de metales pesados en aguas residuales

BIBLIOGRAFÍA

- Abdallah, R., & Al-Haddad, R. (2021). Optical and Morphology Properties of the Magnetite (Fe_3O_4) Nanoparticles Prepared by Green Method. *Journal of Physics: Conference Series*, 1829, 012022.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1829/1/012022>
- Abderrhmane, B., Salah Eddine, L., Khelef, A., Tedjani, M., & Guemari, F. (2021). Effect of Ferric Chloride Concentration on the Type of Magnetite (Fe_3O_4) Nanoparticles Biosynthesized by Aqueous Leaves Extract of Artemisia and Assessment of Their Antioxidant Activities. *Journal of Cluster Science*, 32.
<https://doi.org/10.1007/s10876-020-01868-7>
- Abdullin, I. F., Turova, E. N., & Budnikov, G. K. (2000). Determination of copper and cadmium by atomic absorption spectrometry with electrochemical and sorption preconcentration. *Journal of Analytical Chemistry*, 55(6), 567-569.
<https://doi.org/10.1007/BF02757814>
- Aguilar, D., Torres-Gonzalez, L., Torres-Martínez, L., Lopez Goerne, T., & Quintana, P. (2001). A Study of the Crystallization of ZrO_2 in the Sol-Gel System: $\text{ZrO}_2\text{-SiO}_2$. *Journal of Solid State Chemistry - J Solid State Chem*, 158, 349-357.
<https://doi.org/10.1006/jssc.2001.9126>
- Ahmed, H. M., El-khateeb, M. A., Sobhy, N. A., Hefny, M. M., & Abdel-Haleem, F. M. (2023). Green Synthesis of Magnetite Nanoparticles Using Waste Natural Materials and Its Application for Wastewater Treatment. *Environmental Sciences Proceedings*, 25(1), Article 1.
<https://doi.org/10.3390/ECWS-7-14181>
- Altammar, K. A. (2023). A review on nanoparticles: Characteristics, synthesis, applications, and challenges. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1155622.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1155622>

- Aparicio Ceja, M. E., Carbajal Arizaga, G. G., Aparicio Ceja, M. E., & Carbajal Arizaga, G. G. (2010). Utilidad de la difracción de rayos x en las nanociencias. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 3(2), 62-72.
- APHA, AWWA, & WPCF. (1989). *Metodos noramlizados para el análisis de aguas potables y residuales* (M. Franson, Ed.; 17.^a ed.). Díaz De Santos.
- Azman, E. M., Yusof, N., Chatzifragkou, A., & Charalampopoulos, D. (2022). Stability Enhancement of Anthocyanins from Blackcurrant (*Ribes Nigrum* L.) Pomace through Intermolecular Copigmentation. *Molecules*, 27(17), Article 17.
<https://doi.org/10.3390/molecules27175489>
- Baños, J. G. C., Lara, V. E. N., & Puentes, C. O. (2017). Magnetita (Fe_3O_4): Una estructura inorgánica con múltiples aplicaciones en catálisis heterogénea. *Revista Colombiana de Química*, 46(1), Article 1.
<https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v46n1.62831>
- Becerra Torres, S., Soria Fregozo, C., Jaramillo Juárez, F., & Moreno Hernández-Duque, J. (2011). Trastornos a la salud inducidos por cromo y el uso de antioxidantes en su prevención o tratamiento. *Journal of Pharmacy & Pharmacognosy Research*, 2, 19-30.
https://doi.org/10.56499/jppres14.015_2.2.19
- Belcher, R., Macdonald, A. M. G., & Parry, E. (1957). On mohr's method for the determination of chlorides. *Analytica Chimica Acta*, 16, 524-529.
[https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)89979-1](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)89979-1)
- Bellettini, G. C., Nieves, L. J. J., & Bernardin, A. M. (2024). Synthesis of magnetite nanoparticles by controlled precipitation under oxidative atmosphere. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 590, 171633.
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.171633>

- Cabrera Marutz, C. D., Velásquez Alcalá, S., & Vrhovac Biljesko, J. (2014). Enfermedades profesionales en la industria del cobre: Extracción, manufactura y reciclaje. *Medicina y Seguridad del Trabajo*, 60(237), 756-778.
<https://doi.org/10.4321/S0465-546X2014000400010>
- Chamé Fernández, K. (2013). *Síntesis y Caracterización de Nanopartículas Magnéticas*.
<https://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1002/559>
- Charkiewicz, A. E., Omeljaniuk, W. J., Nowak, K., Garley, M., & Nikliński, J. (2023). Cadmium Toxicity and Health Effects-A Brief Summary. *Molecules*, 28(18), Article 18.
<https://doi.org/10.3390/molecules28186620>
- Chen, L., Yang, M., Mou, H., & Kong, Q. (2017). Ultrasound-assisted extraction and characterization of anthocyanins from purple corn bran. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(1), e13377.
<https://doi.org/10.1111/jfpp.13377>
- Cornejo, I., & Hayes, R. E. (2021). A Review of the Critical Aspects in the Multi-Scale Modelling of Structured Catalytic Reactors. *Catalysts*, 11(1), Article 1.
<https://doi.org/10.3390/catal11010089>
- Correa Cuba, O., Fuentes Bernedo, F. E., Coral Surco, R. G., Correa Cuba, O., Fuentes Bernedo, F. E., & Coral Surco, R. G. (2021). Contaminación por metales pesados de la microcuena agropecuaria del río Huancaray-Perú. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 87(1), 26-38.
<https://doi.org/10.37761/rsqp.v87i1.320>
- Das, C., Sen, S., Singh, T., Ghosh, T., Paul, S. S., Kim, T. W., Jeon, S., Maiti, D. K., Im, J., & Biswas, G. (2020). Green Synthesis, Characterization and Application of Natural Product Coated Magnetite Nanoparticles for Wastewater Treatment. *Nanomaterials*, 10(8), Article 8.
<https://doi.org/10.3390/nano10081615>

- De Caro, C., & Haller, C. (2015). *UV/VIS Spectrophotometry Fundamentals and Applications*.
- Dhar, P. K., Saha, P., Hasan, Md. K., Amin, Md. K., & Haque, Md. R. (2021). Green synthesis of magnetite nanoparticles using Lathyrus sativus peel extract and evaluation of their catalytic activity. *Cleaner Engineering and Technology*, 3, 100117. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100117>
- Doria Serrano, M. del C. (2009). Química verde: Un nuevo enfoque para el cuidado del medio ambiente. *Educación química*, 20(4), 412-420.
- Duckworth, D. C. (2010). Atomic Spectroscopy, Forensic Science Applications. En J. C. Lindon (Ed.), *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry (Second Edition)* (pp. 84-90). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374413-5.00001-4>
- Dudchenko, N., Pawar, S., Perelshtein, I., & Fixler, D. (2022). Magnetite Nanoparticles: Synthesis and Applications in Optics and Nanophotonics. *Materials*, 15(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/ma15072601>
- Ealia, S. A. M., & Saravanakumar, M. P. (2017). A review on the classification, characterisation, synthesis of nanoparticles and their application. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 263(3), 032019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/263/3/032019>
- Ehrampoush, M. H., Miria, M., Salmani, M. H., & Mahvi, A. H. (2015). Cadmium removal from aqueous solution by green synthesis iron oxide nanoparticles with tangerine peel extract. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 13(1), 84. <https://doi.org/10.1186/s40201-015-0237-4>
- El Ghandour, H., Zidan, H. M., Khalil, M. M. H., & Ismail, M. I. M. (2012). Synthesis and Some Physical Properties of Magnetite (Fe₃O₄) Nanoparticles. *International Journal of Electrochemical Science*, 7(6), 5734-5745. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)19655-6](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)19655-6)

- Fatima, H., Charinpanitkul, T., & Kim, K.-S. (2021). Fundamentals to Apply Magnetic Nanoparticles for Hyperthermia Therapy. *Nanomaterials*, 11(5), Article 5.
<https://doi.org/10.3390/nano11051203>
- Feoktistova Victorava, L., & Clark Feoktistova, Y. (2018). El metabolismo del cobre. Sus consecuencias para la salud humana. *MediSur*, 16(4), 579-587.
- Fernández Maestre, R., & Colpas Castillo, F. (1997). *Espectroscopia de Absorción Atómica. Manual teórico-practico* [Thesis, Universidad de Cartagena].
<https://hdl.handle.net/11227/5459>
- Fortes, P. R., Feres, M. A., & Zagatto, E. A. G. (2008). An expert flow system involving in-line prior assay for turbidimetric determination of chloride and sulphate in natural waters. *Talanta*, 77(2), 571-575.
<https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.03.019>
- Frey, P. A., & Reed, G. H. (2012). The Ubiquity of Iron. *ACS Chemical Biology*, 7(9), 1477-1481.
<https://doi.org/10.1021/cb300323q>
- Galeas Hurtado, S. G., Alvear Ortiz, F. D., Guerrero Barragán, V. H., & Debut, A. (2017). Síntesis y Caracterización de Nanopartículas de Magnetita. *Revista Politécnica*, 39(2), Article 2.
- García Mesa, M. P., & González Reyes, J. A. (2021). *Evaluación del desempeño de nanopartículas de magnetita en la remoción de cobre respecto al método convencional de precipitación alcalina para el tratamiento de aguas de producción del campo "B" a nivel de laboratorio con fines de reinyección*.
<https://hdl.handle.net/20.500.11839/8634>
- García Rios, J. N. (2019). Comparación de la concentración de cadmio en plantaciones de cacao en los distritos de Huicungo y San Martín de Alao 2018. *Repositorio Institucional - UCV*.
<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/39344>
- Giraldo, L., & Moreno-Piraján, J. C. (2013). *Synthesis of magnetite nanoparticles and exploring their application in the removal of Pt^{2+} and Au^{3+} ions from aqueous solutions*.

<https://www.academia.edu/124180640>

Gómez Garzón, M. (2018). Nanomateriales, Nanopartículas y Síntesis verde. *Revista Repertorio de Medicina y Cirugía*, 27(2), Article 2.

<https://doi.org/10.31260/RepertMedCir.v27.n2.2018.191>

Gregorio Jáuregui, K. M., Rivera Salinas, J. E., Saade, H., López Campos, R. G., Martínez Hernández, J. L., & Ilina, A. (2012). *Las nanopartículas magnéticas y sus múltiples aplicaciones*.

Griffiths, P. R., & De Haseth, J. A. (2007). *Fourier Transform Infrared Spectrometry*. John Wiley & Sons.

Guillén Sánchez, J., Mori Arismendi, S., & Paucar Menacho, L. M. (2014). Características y propiedades funcionales del maíz morado (*Zea mays* L.) var. Subnigroviolaceo. *Scientia Agropecuaria*, 5(4), 211-217.

<https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2014.04.05>

Hu, J., Lo, I. M. C., & Chen, G. (2004). Removal of Cr(VI) by magnetite. *Water Science and Technology*, 50(12), 139-146.

<https://doi.org/10.2166/wst.2004.0706>

Hua, L., Chan, Y. C., Wu, Y. P., & Wu, B. Y. (2009). The determination of hexavalent chromium (Cr⁶⁺) in electronic and electrical components and products to comply with RoHS regulations. *Journal of Hazardous Materials*, 163(2), 1360-1368.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.150>

Iconaru, S. L., Guégan, R., Popa, C. L., Motelica-Heino, M., Ciobanu, C. S., & Predoi, D. (2016). Magnetite (Fe₃O₄) nanoparticles as adsorbents for As and Cu removal. *Applied Clay Science*, 134, 128-135.

<https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.08.019>

Khalil, M. (2015). Co-precipitation in aqueous solution synthesis of magnetite nanoparticles using iron (III) salts as precursors. *Arabian Journal of Chemistry*, 85.

- <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.02.008>
- Khalil, M. I. (2015). Co-precipitation in aqueous solution synthesis of magnetite nanoparticles using iron(III) salts as precursors. *Arabian Journal of Chemistry*, 8(2), 279-284.
<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.02.008>
- Lagalante, A. (2007). Atomic Absorption Spectroscopy: A Tutorial Review*. *Applied spectroscopy reviews*, 34(3), 173-189.
<https://doi.org/10.1081/ASR-100100844>
- Lewicki, S., Zdanowski, R., Krzyżowska, M., Lewicka, A., Dębski, B., Niemcewicz, M., & Goniewicz, M. (2014). The role of Chromium III in the organism and its possible use in diabetes and obesity treatment. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 21(2), 331-335.
<https://doi.org/10.5604/1232-1966.1108599>
- Li, R., Wang, X., Lin, Q., Yue, F., Liu, C., Wang, X., & Ren, J. (2020). Structural Features of Lignin Fractionated From Industrial Furfural Residue Using Alkaline Cooking Technology and Its Antioxidant Performance. *Frontiers in Energy Research*, 8, 83.
<https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00083>
- Lin, C. C., Wu, Y.-C., & Wu, K.-Y. (2024). Feasibility of using chemical co-precipitation and a high-gravity reactor with blade packings for continuous production of magnetite nanoparticles. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 162, 105620.
<https://doi.org/10.1016/j.jtice.2024.105620>
- Lin, J., Su, B., Sun, M., Chen, B., & Chen, Z. (2018). Biosynthesized iron oxide nanoparticles used for optimized removal of cadmium with response surface methodology. *Science of The Total Environment*, 627, 314-321.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.170>
- López Mencía, A. (2018). *Síntesis y funcionalización de nanopartículas magnéticas* [Master thesis, Universidad de Oviedo].

- <https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/47759>
- Lu, A.-H., Schmidt, W., Matoussevitch, N., Bönnemann, H., Spliethoff, B., Tesche, B., Bill, E., Kiefer, W., & Schüth, F. (2004). Nanoengineering of a Magnetically Separable Hydrogenation Catalyst. *Angewandte Chemie*, 116(33), 4403-4406.
- <https://doi.org/10.1002/ange.200454222>
- Macías Erazo, K. E. (2022). *Aplicación de nanopartículas magnéticas de hierro (magnetita) en la adsorción de arsénico en aguas contaminadas*.
- <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/16939>
- Mane, P. V., Rego, R. M., Yap, P. L., Losic, D., & Kurkuri, M. D. (2024). Unveiling cutting-edge advances in high surface area porous materials for the efficient removal of toxic metal ions from water. *Progress in Materials Science*, 146, 101314.
- <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2024.101314>
- Márquez Durán, E., Hernández Moreno, D., Míguez Santiyán, M. P., Soler Rodríguez, F., & Pérez López, M. (2021). *Las nanopartículas y sus aplicaciones*. Universidad de Extremadura, Servicio de Publicaciones.
- <https://dehesa.unex.es:8443/handle/10662/11784>
- Medina M., M. E., Galván R., L. E., & Reyes G., R. E. (2015). Las nanopartículas y el medio ambiente. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 19(74), 49-58.
- Nadaroglu, H., Güngör, A. A., & İnce, S. (2017). Synthesis of Nanoparticles by Green Synthesis Method. *International Journal of Innovative Research and Reviews*, 1(1), Article 1.
- Petit, T., & Puskar, L. (2018). FTIR spectroscopy of nanodiamonds: Methods and interpretation. *Diamond and Related Materials*, 89, 52-66.
- <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2018.08.005>
- Picasso, G., Vega, J., Uzuriaga, R., & Ruiz, G. P. (2012). Preparación de nanopartículas de magnetita por los métodos sol-gel y precipitación: Estudio de la composición química y estructura. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 78(3), 170-182.

- Plazas Clavijo, P. E., & Garcia Rocha, V. A. (2020). *Utilización de nanopartículas magnéticas para eliminar los metales pesados en el agua tratada por la ptar el salitre.*
- Prasad, S., Yadav, K. K., Kumar, S., Gupta, N., Cabral-Pinto, M. M. S., Rezania, S., Radwan, N., & Alam, J. (2021). Chromium contamination and effect on environmental health and its remediation: A sustainable approaches. *Journal of Environmental Management*, 285, 112174.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112174>
- Quevedo, A. C., Guggenheim, E., Briffa, S. M., Adams, J., Lofts, S., Kwak, M., Lee, T. G., Johnston, C., Wagner, S., Holbrook, T. R., Hachenberger, Y. U., Tentschert, J., Davidson, N., & Valsami Jones, E. (2021). UV-Vis Spectroscopic Characterization of Nanomaterials in Aqueous Media. *JoVE (Journal of Visualized Experiments)*, 176, e61764.
<https://doi.org/10.3791/61764>
- Rajput, S., Pittman, C. U., & Mohan, D. (2016). Magnetic magnetite (Fe₃O₄) nanoparticle synthesis and applications for lead (Pb²⁺) and chromium (Cr⁶⁺) removal from water. *Journal of Colloid and Interface Science*, 468, 334-346.
<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2015.12.008>
- Rana, L., Dheeraj, & Desai, M. A. (2025). Surface-decorated magnetite nanoparticles with dioxidomolybdenum(VI) complexes as a catalyst for alkene epoxidation. *Journal of Molecular Structure*, 1322, 140312.
<https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.140312>
- Rengifo Saavedra, C., & Chupillon Cubas, J. W. (2017). Determinación de la absorción de cadmio y plomo en genotipos de cacao (*Theobroma Cacao* l.), para el establecimiento de plantaciones comerciales. *Repositorio - UNSM*.
<http://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/2473>
- Saji, R., Ramani, A., Gandhi, K., Seth, R., & Sharma, R. (2024). Application of FTIR spectroscopy in dairy products: A systematic review. *Food and Humanity*, 2, 100239.

- <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2024.100239>
- Salinas Moreno, Y., García Salinas, C., Coutiño Estrada, B., & Vidal Martínez, V. A. (2013). Variabilidad en contenido y tipos de antocianinas en granos de color azul/morado de poblaciones mexicanas de maíz. *Revista fitotecnia mexicana*, 36, 285-294.
- Samanéz Vergara, C. A. (1976). Estudio sobre las características, producción y propiedades de las fundiciones de hierro. *Universidad Nacional de Ingeniería*.
- <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3264093>
- Sánchez Madrigal, M. Á., Quintero Ramos, A., Amaya Guerra, C. A., Meléndez Pizarro, C. O., Castillo Hernández, S. L., & Aguilera González, C. J. (2019). Effect of Agave Fructans as Carrier on the Encapsulation of Blue Corn Anthocyanins by Spray Drying. *Foods*, 8(7), Article 7.
- <https://doi.org/10.3390/foods8070268>
- Scarberry, K. E., Dickerson, E. B., McDonald, J. F., & Zhang, Z. J. (2008). Magnetic Nanoparticle–Peptide Conjugates for in Vitro and in Vivo Targeting and Extraction of Cancer Cells. *Journal of the American Chemical Society*, 130(31), 10258-10262.
- <https://doi.org/10.1021/ja801969b>
- Segura Muñoz, S. I., Beltramini Trevilato, T. M., M. Takayanagui, A. M., Hering, S. E., & Cupo, P. (2003). Metales pesados en agua de bebederos de presión. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 53(1), 59-64.
- Shukla, A., Singh, S. C., Bhardwaj, A., Kotnala, R. K., Uttam, K. N., Guo, C., & Gopal, R. (2022). Calcination Temperature Induced Structural, Optical and Magnetic Transformations in Titanium Ferrite Nanoparticles. *Reactions*, 3(1), Article 1.
- <https://doi.org/10.3390/reactions3010017>
- Singh, A. R., Maniraj, M., & Jain, S. (2021). Classification and Synthesis of Nanoparticles: A Review. En P. V. Baredar, S. Tangellapalli, & C. S. Solanki (Eds.), *Advances in Clean Energy Technologies* (pp. 1113-1125). Springer.

- https://doi.org/10.1007/978-981-16-0235-1_86
- Smith, E., Davison, W., & Hamilton Taylor, J. (2002). Methods for preparing synthetic freshwaters. *Water research*, 36, 1286-1296.
- [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00341-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00341-4)
- Smith, N., Raston, C., Saunders, M., & Woodward, R. (2006). *Synthesis of Magnetic Nanoparticles Using Spinning Disc Processing*.
- https://www.researchgate.net/publication/266885718_Synthesis_of_Magnetic_Nanoparticles_Using_Spinning_Disc_Processing
- Soliman, M., del Pino, P., Parak, W., & Pelaz, B. (2017). Synthesis and Surface Engineering of Gold Nanoparticles, and Their Potential Applications in Bionanotechnology. En *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*.
- <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.12744-1>
- Soto Benavente, M., Rodriguez Achata, L., Olivera, M., Arostegui Sanchez, V., Colina Nano, C., Garate Quispe, J., Soto-Benavente, M., Rodriguez-Achata, L., Olivera, M., Arostegui Sanchez, V., Colina Nano, C., & Garate Quispe, J. (2020). Riesgos para la salud por metales pesados en productos agrícolas cultivados en áreas abandonadas por la minería aurífera en la Amazonía peruana. *Scientia Agropecuaria*, 11(1), 49-59.
- <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.01.06>
- Soto, M., Guevara, L., & Robles Calderón, R. (2014). El maíz morado como materia prima industrial. *Industrial Data*, 16, 085.
- <https://doi.org/10.15381/idata.v16i1.6422>
- Starbird Pérez, R., & Montero Campos, V. (2015). Síntesis de nanopartículas magnéticas de óxido de hierro para la remoción de arsénico del agua de consumo humano. *Revista Tecnología en Marcha*, 28(3), 45.
- <https://doi.org/10.18845/tm.v28i3.2410>

- Stefaniak, A. B. (2017). Principal Metrics and Instrumentation for Characterization of Engineered Nanomaterials. En *Metrology and Standardization of Nanotechnology* (pp. 151-174). John Wiley & Sons, Ltd.
<https://doi.org/10.1002/9783527800308.ch8>
- Taghizadeh, S.-M., Berenjian, A., Zare, M., & Ebrahimezhad, A. (2020). New Perspectives on Iron-Based Nanostructures. *Processes*, 8(9), Article 9.
<https://doi.org/10.3390/pr8091128>
- Valenzuela Amaro, H. M., Vázquez Ortega, P. G., Zazueta Alvarez, D. E., López Miranda, J., Rojas Contreras, J. A., Valenzuela Amaro, H. M., Vázquez Ortega, P. G., Zazueta Alvarez, D. E., López Miranda, J., & Rojas Contreras, J. A. (2023). Síntesis verde de nanopartículas de magnetita (NPs-Fe₃O₄): Factores y limitaciones. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 16(30).
<https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2023.30.69744>
- Vera Moreno, F. S. (2018). *Síntesis y Caracterización de Nanopartículas Magnéticas de Hierro (Magnetita)*. [bachelorThesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].
<http://dspace.espace.edu.ec/handle/123456789/8971>
- Wade, L. (2004). *Química orgánica*. Pearson Educación.
- Wang, Z., Fang, C., & Mallavarapu, M. (2015). Characterization of iron–polyphenol complex nanoparticles synthesized by Sage (*Salvia officinalis*) leaves. *Environmental Technology & Innovation*, 4, 92-97.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2015.05.004>
- Ye, J., Wang, Y., Xu, Q., Wu, H., Tong, J., & Shi, J. (2021). Removal of hexavalent chromium from wastewater by Cu/Fe bimetallic nanoparticles. *Scientific Reports*, 11(1), Article 1.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-90414-0>

ANEXOS

Anexo 1. Preparación de soluciones

1.1 Solución de hidróxido de sodio (2N)

Datos: Masa molar NaOH = 39.997 g/mol, volumen de solución = 100 mL

$$N = \frac{\frac{m}{PM}}{\text{Volumen de solución}}$$

$$2 \frac{\text{eq} - \text{g}}{\text{L}} = \frac{\frac{m}{39,997 \frac{\text{g}}{\text{eq} - \text{g}}}}{0.1 \text{ L}}$$

$$0.2 = \frac{m}{39.997 \text{ g}}$$

$$m = 7.99 \text{ g}$$

Se pesó 7.99 gramos de NaOH y se aforó a 100 mL.

1.2 Solución de cadmio Cd^{2+} (500 ppm)

Datos: Masa molar $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ = 775.58 g/mol, peso atómico Cd^{2+} = 112.4 g/mol

Hallando los gramos requeridos de $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$

$$3(112.4) \text{ g Cd}^{2+} \text{ --- } 775.58 \text{ g } 3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$$

$$0.5 \text{ g Cd}^{2+} \text{ --- } W_1$$

$$W_1 = 1.15 \text{ g } 3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$$

Se pesó 1.15 g de $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ para obtener una solución de 500 ppm de Cd^{2+} en 1 litro de solución. Entonces para 250 mL se tiene:

$$1.15 \text{ g --- } 1000 \text{ mL}$$

$$W_2 \text{ --- } 250 \text{ mL}$$

$$W_2 = 0.287 \text{ g } 3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$$

Se pesó 0.287 gramos de $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ y se aforo a 250 mL para obtener una solución de 500 ppm de Cd^{2+} .

1.3 Solución de cromo Cr^{6+} (500 ppm)

Datos: Masa molar $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 = 294.185 \text{ g/mol}$, peso atómico $\text{Cr}^{6+} = 51.996 \text{ g/mol}$

Hallando los gramos requeridos de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$

$$103.9922 \text{ g } \text{Cr}^{6+} \text{ --- } 294.185 \text{ g } \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$$

$$0.5 \text{ g } \text{Cr}^{6+} \text{ --- } X_1$$

$$X_1 = 1.414 \text{ g } \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$$

Se pesó 1.414 g de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ para obtener una solución de 500 ppm de Cr^{6+} en 1 litro de solución. Por lo tanto, para 250 mL se tendría:

$$1.4144 \text{ g --- } 1000 \text{ mL}$$

$$X_2 \text{ --- } 250 \text{ mL}$$

$$X_2 = 0.3536 \text{ g } \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$$

Se pesó 0.353 gramos de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ para preparar una solución de 500 ppm de Cr^{6+} en 250 mL.

1.4 Solución de cobre Cu^{2+} (500 ppm)

Datos: Masa molar $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} = 249.68 \text{ g/mol}$, peso atómico $\text{Cu}^{2+} = 63.546 \text{ g/mol}$

Hallando los gramos requeridos de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

$$63.546 \text{ g } \text{Cu}^{2+} \text{ --- } 249.68 \text{ g } \text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$$

$$0.5 \text{ g } \text{Cu}^{2+} \text{ --- } Y_1$$

$$Y_1 = 1.964 \text{ g } \text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$$

Se pesó 1.964 g de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ para obtener una solución de 500 ppm de Cu^{2+} en 1 litro de solución. Entonces para 250 mL se tiene:

$$1.964 \text{ g} \text{ --- } 1000 \text{ mL}$$

$$Y_2 \text{ --- } 250 \text{ mL}$$

$$Y_2 = 0.491 \text{ g CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$$

Se pesó 0.491 gramos de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ para obtener una solución de 500 ppm de Cu^{2+} en 250 mL.

1.5 Solución de ácido sulfúrico (0.2 N)

Datos: Masa molar $\text{H}_2\text{SO}_4 = 98.07 \text{ g/mol}$, $\rho = 1.83 \text{ g/mL}$, %pureza= 98%, $\Theta=2$

Hallando los gramos requeridos de H_2SO_4

$$N = \frac{\frac{m}{PM}}{\frac{\Theta}{\text{Volumen de solución}}}$$

$$0.2 \frac{\text{eq} - \text{g}}{\text{L}} = \frac{\frac{m}{98.07 \frac{\text{g}}{\text{eq} - \text{g}}}}{0.025 \text{ L}}$$

$$0.2 = \frac{m}{49.0395 \text{ g}}$$

$$m = 0.2451 \text{ g}$$

Se requirió 0.2451g de H_2SO_4 puro para preparar la solución, entonces tomando en cuenta su porcentaje de pureza tenemos:

$$100 \text{ g H}_2\text{SO}_4 \text{ --- } 98 \text{ g H}_2\text{SO}_4 \text{ (puro)}$$

$$Z_1 \text{ --- } 0.2451 \text{ g H}_2\text{SO}_4 \text{ (puro)}$$

$$Z_1 = 0.2501 \text{ g H}_2\text{SO}_4$$

El ácido sulfúrico de 98% de pureza posee una densidad de 1.83 g/mL, entonces:

$$1.83 \text{ g} \text{ --- } 1 \text{ mL}$$

$$0.2501 \text{ g} \text{ --- } Z_2$$

$$Z_2 = 0.136 \text{ mL}$$

Se midió 0.136 mL de H₂SO₄ para obtener una solución de 0.2 N en 25 mL.

Anexo 2. Dilución de soluciones madre.

Para realizar las diluciones se aplicó la Formula (2)

$$C_i \times V_i = C_f \times V_f \dots (2)$$

Donde:

C_i = Concentración Inicial

V_i = Volumen Inicial

C_f = Concentración Final

V_f = Volumen Final

2.1 Preparación de soluciones para realización de curva patrón de cadmio (Cd²⁺)

❖ **Para preparar 0.1 ppm de cadmio (Cd²⁺) en 250 mL**

$$1000 \text{ ppm} \times V_i = 0.1 \text{ ppm} \times 250 \text{ mL}$$

$$V_i = 0.025 \text{ mL}$$

Se midió 0.025 mL de la solución madre (1000 ppm Cd²⁺) y se aforó a 250 mL.

- ❖ **Para preparar 0.3 ppm de cadmio (Cd²⁺) en 250 mL**

$$1000 \text{ ppm} \times V_i = 0.3 \text{ ppm} \times 250 \text{ mL}$$

$$V_i = 0.075 \text{ mL}$$

Se midió 0.075 mL de la solución madre (1000 ppm Cd²⁺) y se aforó a 250 mL.

- ❖ **Para preparar 0.6 ppm de cadmio (Cd²⁺) en 250 mL**

$$1000 \text{ ppm} \times V_i = 0.6 \text{ ppm} \times 250 \text{ mL}$$

$$V_i = 0.15 \text{ mL}$$

Se midió 0.15 mL de la solución madre (1000 ppm Cd²⁺) y se aforó a 250 mL.

- ❖ **Para preparar 0.9 ppm de cadmio (Cd²⁺) en 250 mL**

$$1000 \text{ ppm} \times V_i = 0.9 \text{ ppm} \times 250 \text{ mL}$$

$$V_i = 0.225 \text{ mL}$$

Se midió 0.225 mL de la solución madre (1000 ppm Cd²⁺) y se aforó a 250 mL.

- ❖ **Para preparar 1.2 ppm de cadmio (Cd²⁺) en 250 mL**

$$1000 \text{ ppm} \times V_i = 1.2 \text{ ppm} \times 250 \text{ mL}$$

$$V_i = 0.3 \text{ mL}$$

Se midió 0.3 mL de la solución madre (1000 ppm Cd²⁺) y se aforó a 250 mL.

2.2 Preparación de soluciones para realización de curva patrón de cromo (Cr⁶⁺)

- ❖ **Para preparar 10 ppm de cromo (Cr⁶⁺) en 25 mL**

$$500 \text{ ppm} \times V_i = 10 \text{ ppm} \times 25 \text{ mL}$$

$$V_i = 0.5 \text{ mL}$$

Se midieron 0.5 mL de la solución madre (500 ppm Cr⁶⁺) y se aforó a 25 mL

- ❖ Para 20 ppm en 25 mL

$$500 \text{ ppm} \times V_i = 20 \text{ ppm} \times 25 \text{ mL}$$

$$V_i = 1 \text{ mL}$$

Se midieron 1 mL de la solución madre (500 ppm Cr⁶⁺) y se aforó a 25 mL

- ❖ Para 50 ppm en 25 mL

$$500 \text{ ppm} \times V_i = 50 \text{ ppm} \times 25 \text{ mL}$$

$$V_i = 2.5 \text{ mL}$$

Se midieron 2.5 mL de la solución madre (500 ppm Cr⁶⁺) y se aforó a 25 mL

- ❖ Para 100 ppm en 25 mL

$$500 \text{ ppm} \times V_i = 100 \text{ ppm} \times 25 \text{ mL}$$

$$V_i = 5 \text{ mL}$$

Se midieron 5 mL de la solución madre (500 ppm Cr⁶⁺) y se aforó a 25 mL

2.3 Preparación de soluciones para realización de curva patrón de cadmio (Cu²⁺)

- ❖ Para 0.5 ppm en 250 mL

$$1000 \text{ ppm} \times V_i = 0.5 \text{ ppm} \times 250 \text{ mL}$$

$$V_i = 0.125 \text{ mL}$$

Se midieron 0.125 mL de la solución madre (1000 ppm Cu²⁺) y se aforó a 250 mL

❖ **Para 1.5 ppm en 250 mL**

$$1000 \text{ ppm} \times V_i = 1.5 \text{ ppm} \times 250 \text{ mL}$$

$$V_i = 0.375 \text{ mL}$$

Se midieron 0.375 mL de la solución madre (1000 ppm Cu²⁺) y se aforó a 250 mL

❖ **Para 3 ppm en 250 mL**

$$1000 \text{ ppm} \times V_i = 3 \text{ ppm} \times 250 \text{ mL}$$

$$V_i = 0.75 \text{ mL}$$

Se midieron 0.75 mL de la solución madre (1000 ppm Cu²⁺) y se aforó a 250 mL.

❖ **Para 6 ppm en 250 mL**

$$1000 \text{ ppm} \times V_i = 6 \text{ ppm} \times 250 \text{ mL}$$

$$V_i = 1.5 \text{ mL}$$

Se midieron 1.5 mL de la solución madre (1000 ppm Cu²⁺) y se aforó a 250 mL

❖ **Para 9 ppm en 250 mL**

$$1000 \text{ ppm} \times V_i = 9 \text{ ppm} \times 250 \text{ mL}$$

$$V_i = 2.25 \text{ mL}$$

Se midieron 2.25 mL de la solución madre (1000 ppm Cu²⁺) y se aforó a 250 mL

Anexo 3. Resultados obtenidos de laboratorio de control de calidad para determinación de cadmio y cobre 24 horas de contacto



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE CIENCIAS
LABORATORIO DE CROMATOGRAFIA Y ESPECTROMETRÍA – Pabellón de Control de Calidad
AV. De la Cultura 733 CUSCO-PERÚ Contacto 973868655

RESULTADOS

Cusco, 31 de Mayo del 2023⁻⁰²⁰

Solicitantes : Victor Sabidt Navarrete Quispe y Jean Paul Raul Loaiza
Miranda
Tipo de Análisis : Determinación de Cadmio y Cobre por Absorción
Atómica
Tipo de Muestras : Líquido, en frascos ámbar
Cantidad de Muestra : 6, con 40mL de cada uno
Almacenamiento : 4 °C.

Condiciones de Análisis por Espectrofotómetro
Equipo : Espectrofotómetro Absorción Atómica Varian AA240FS
Longitud de Onda : 228.8 nm (Cadmio) y 327.4 nm (Cobre)
Corrección de Fondo : Activado.
Modo de medición : Absorbancia
Software de Control : SpectrAA
Lecturas por Muestra : 5

	Código de la Muestra	Cd ppm	Cu ppm
1	Patron	9.0	8.7
2	M1	6.7	5.4
3	M2	3.3	4.2
4	M3	3.0	2.3

Nota: La determinación expresa los ppm de Cadmio y Cobre presentes en la muestra, la metodología fue desarrollada de acuerdo al fabricante del equipo.




Químico, Jorge Choquenaira Pari
Analista del Laboratorio de Cromatografía y
Espectrometría – UNSAAC,
COP - 914

Anexo 4. Resultados obtenidos de laboratorio de control de calidad para determinación de cadmio 48 horas de contacto



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE CIENCIAS
LABORATORIO DE CROMATOGRAFIA Y ESPECTROMETRIA – Pabellón de Control de Calidad
AV. De la Cultura 733 CUSCO-PERÚ Contacto 973868855

RESULTADOS

Cusco, 01 de Junio del 2023⁻⁰²³

Solicitantes : Victor Sabidt Navarrete Quispe y Jean Paul Raul Loaiza Miranda
Tipo de Análisis : Determinación de Cadmio por Absorción Atómica
Tipo de Muestras : Líquido, en frascos ámbar
Cantidad de Muestra : 3, con 40mL de cada uno
Almacenamiento : 4 °C.

Condiciones de Análisis por Espectrofotómetro
Equipo : Espectrofotómetro Absorción Atómica Varian AA240FS
Longitud de Onda : 228.8 nm (Cd)
Corrección de Fondo : Activado.
Modo de medición : Absorbancia
Software de Control : SpectrAA
Lecturas por Muestra : 5

	Código de la Muestra	Cd ppm
1	M1	5.5
2	M2	2.6
3	M3	2.0

Nota: La determinación expresa los ppm de Cadmio presente en la muestra, la metodología fue desarrollado de acuerdo al fabricante del equipo.




Químico. Jorge Chequenaira Pari
Analista del Laboratorio de Cromatografía y Espectrometría – UNSAAC.
CQP - 914

Anexo 4. Resultados obtenidos de laboratorio de control de calidad para determinación de cobre 48 horas de contacto



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE CIENCIAS
LABORATORIO DE CROMATOGRAFIA Y ESPECTROMETRÍA – Pabellón de Control de Calidad
AV. De la Cultura 733 CUSCO-PERÚ Contacto 973868855

RESULTADOS

Cusco, 01 de Junio del 2023^{C21}

Solicitantes : Victor Sabidt Navarrete Quispe y Jean Paul Raul Loaiza Miranda
Tipo de Análisis : Determinación de Cobre por Absorcion Atomica
Tipo de Muestras : Liquido, en frascos ambar
Cantidad de Muestra : 3, con 40mL de cada uno
Almacenamiento : 4 °C.

Condiciones de Análisis por Espectrofotometro
Equipo : Espectrofotometro Absorcion Atomica Varian AA240FS
Longitud de Onda : 327.4 nm (Cobre)
Correccion de Fondo : Activado.
Modo de medición : Absorvancia
Software de Control : SpectrAA
Lecturas por Muestra : 5

	Codigo de la Muestra	Cu ppm
1	M1	4.9
2	M2	3.7
3	M3	1.8

Nota: La determinación expresa los ppm de Cobre presente en la muestra, la metodología fue desarrollado de acuerdo al fabricante del equipo.



Químico, Jorge Choquenaira Pari
Analista del Laboratorio de Cromatografía y
Espectrometría – UNSAAC.
CQP - 914

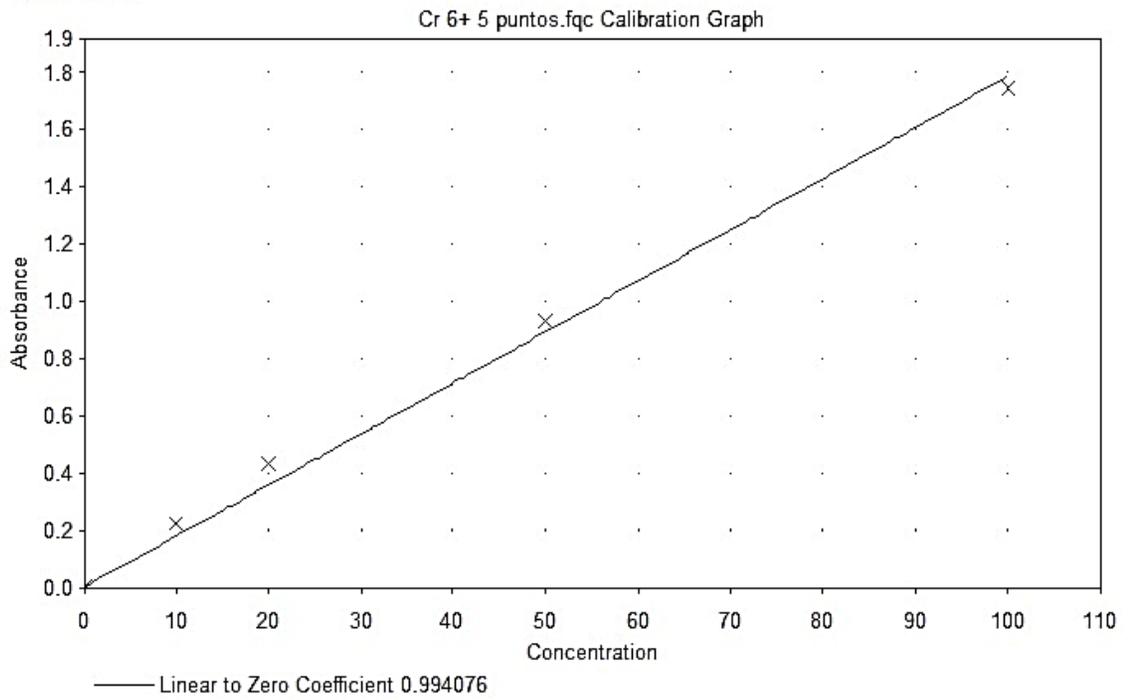
Anexo 5. Resultados obtenidos de la curva patrón de Cromo por espectrofotometría UV-Visible

THERMO ELECTRON ~ VISIONpro SOFTWARE V4.10

Operator Name (None Entered)
Department (None Entered)
Organization (None Entered)
Information (None Entered)

Date of Report 21/07/2024
Time of Report 17:39:56p. m.

Quant Graph



Anexo 6. Obtención del extracto acuoso del marlo de maíz morado (Zea mays L.)



Anexo 7. Síntesis de NP'sM



Anexo 8. Lavado de NP'sM post-síntesis.



Anexo 9. Proceso de calcinación



Anexo 10. Sonicado de NP'sM



Anexo 11. Caracterización de NP'sM por espectrofotometría UV-Visible



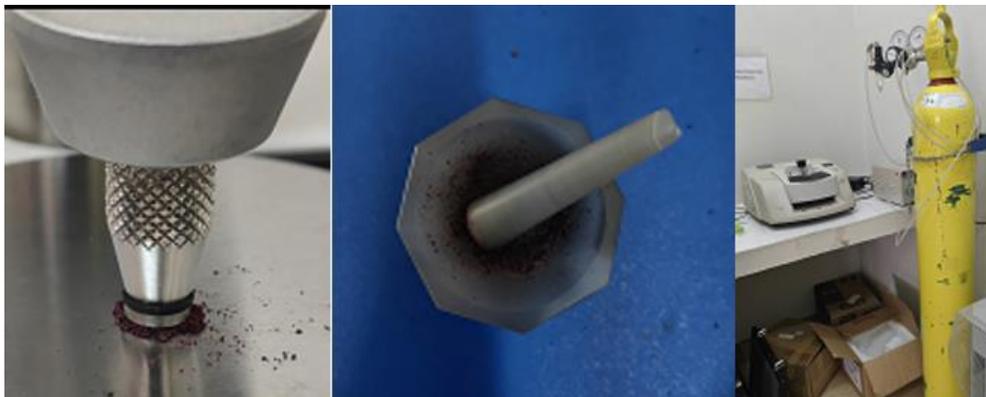
Anexo 12. Determinación del área superficial con Chemisorb 2070



Anexo 13. Caracterización de NP'sM por espectroscopía infrarroja



Anexo 14.22 Lectura de espectro IR para el extracto acuoso del marlo de maíz morado
(*Zea mays L.*)



Anexo 15. Determinación del porcentaje de rendimiento de la síntesis de NP'sM



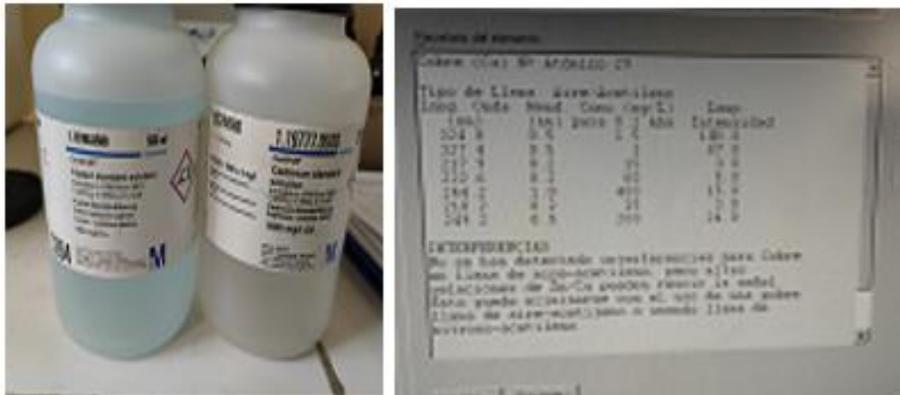
Anexo 16. Aplicación de NP'sM en la remoción de metales pesados



Anexo17. Aplicación de NP's para remoción de ión cromo hexavalente



Anexo 18. Realización de la curva patrón de cadmio y cobre por espectroscopía de absorción atómica



Anexo 19. Determinación de la remoción de Cadmio y Cobre por espectroscopía de absorción atómica

