

**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**

**MARÍA PAULA GARCÍA MESA  
JORGE ANDRÉS GONZALEZ REYES**

**Proyecto integral de grado para optar el título de:  
Ingeniero de Petróleos**

**Orientador:  
Nelson Fernández Barrero  
Ingeniero Químico**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BOGOTÁ D.C**

**2021**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

---

Nombre  
Firma del Director

---

Firma del Presidente Jurado

---

Nombre  
Firma del Jurado

---

Nombre  
Firma del Jurado

Bogotá D.C. julio de 2021

## **DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García Peña

Vicerrectora Académica y de Investigación

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano Facultad de Ingeniería

Ing. Julio César Fuentes Arismendi

Director Programa de Ingeniería de Petróleos

Ing. Juan Carlos Rodríguez Esparza

## **DEDICATORIA**

Gracias a mis padres, Sonia Mesa y German García, quienes con amor y esfuerzo siempre me apoyaron, motivaron y acompañaron incondicionalmente durante este proceso formativo. A mi abuelita Celsa por siempre creer en mí y ser tan amorosa, a mi abuelito Luis Francisco y mi abuelita María que me acompañan desde el cielo y a toda mi familia, por siempre estar a mi lado.

Agradezco a la Fundación Universidad de América por el apoyo y conocimientos brindados, por las experiencias que viví, los amigos y compañeros con quienes compartí y los docentes de los que tanto aprendí. Y finalmente a mi compañero de tesis Jorge González, quien fue indispensable en la elaboración de este proyecto.

**MARÍA PAULA GARCÍA MESA**

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto a mis padres Jorge Humberto González y Libia Ángela Reyes, a mi hermano Darío González quienes me acompañaron, asesoraron y motivaron de forma incondicional para muchos momentos difíciles de mi vida, intelectual, física, y adicionalmente en el desarrollo y soluciones de mi ser; también a las amistades, todos los que me acompañan desde que tengo memoria y los que he logrado conocer, debido a que gracias a ellos logré encontrar muchas soluciones y encontré el camino indicado para ser la persona que soy hoy en día. Finalmente quiero agradecer a Miguel Rodríguez, Mary Díaz, Paola Castro, Estefanía Pérez y María Paula García por su amistad y apoyo en todo momento de mi carrera y en la vida.

**JORGE ANDRÉS GONZALEZ REYES**

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores del actual proyecto presentan sus más sinceros agradecimientos a:

Ingeniero de Petróleos Jorge Andrés Tovar Moreno, por ofrecernos su apoyo y sus conocimientos de forma incondicional y motivarnos en todo momento.

Ingeniero Químico Nelson Fernández Barrero, por acompañarnos, asesorarnos y compartir sus conocimientos con nosotros, dando soluciones a múltiples interrogantes.

Laboratorio IMA S.A.S por prestarnos sus instalaciones y servicios cuando fue necesario realizar pruebas fuera de nuestro alcance.

Coordinador de laboratorios de la Universidad Pontificia Bolivariana Víctor Hugo Cuellar, por brindar su conocimiento, instalaciones y equipos necesarios durante el desarrollo del proyecto.

Coordinadora de laboratorios de la Fundación Universidad de América Yenny Hernández Prieto, por su acompañamiento y disposición en los laboratorios.

Equipo de orientadores de la Fundación Universidad de América, quienes nos aportaron de su tiempo y asesoramiento para el completamiento del proyecto.

Fundación Universidad de América que durante el desarrollo académico puso a disposición la información necesaria y el laboratorio de crudos y aguas.

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores

## TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	14
INTRODUCCIÓN	16
1. MARCO TEÓRICO	21
1.1 Aguas de producción	21
1.1.1 <i>Panorama actual</i>	21
1.1.2 <i>Manejos del agua de producción</i>	22
1.2 Sistemas de producción	23
1.2.1 <i>Flujo natural</i>	23
1.2.2 <i>Levantamiento artificial</i>	24
1.2.3 <i>Técnicas de recuperación secundaria</i>	25
1.3 Tratamiento de aguas	28
1.3.1 <i>Tratamiento de aguas residuales</i>	28
1.3.2 <i>Técnicas convencionales de tratamiento de agua</i>	30
1.3.3 <i>Técnicas no convencionales de tratamiento de agua</i>	31
1.4 Nanotecnología	32
1.4.1 <i>Nanotecnología en el tratamiento de aguas residuales</i>	32
1.4.2 <i>Nanopartículas de magnetita</i>	32
1.4.3 <i>Métodos de síntesis de magnetita</i>	33
1.5 Metales pesados	34
1.5.1 <i>Cobre</i>	35
2. METODOLOGÍA	36
2.1 Fase I: Implementación del método convencional de precipitación alcalina en el tratamiento del agua de producción del campo “B” para la remoción de cobre	37
2.2 Fase II: Síntesis y caracterización de las nanopartículas de magnetita	39
2.3 Fase III: Escenarios para la realización del test de jarras con las nanopartículas de magnetita	46

2.4	Fase IV: Comparación de las eficiencias en la remoción de cobre en el tratamiento de aguas de producción con fines de reinyección	47
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	55
3.1	Resultados fase I: Implementación del método convencional de precipitación alcalina en el tratamiento del agua de producción del campo “B” para la remoción de cobre	55
3.2	Resultados fase II: Síntesis y caracterización de las nanopartículas de magnetita	61
3.3	Resultados fase III: Escenarios para la realización del test de jarras con las nanopartículas de magnetita	77
3.4	Resultados fase IV: Comparación de las eficiencias en la remoción de cobre en el tratamiento de aguas de producción con fines de reinyección	82
4.	CONCLUSIONES	100
	BIBLIOGRAFÍA	102
	ANEXOS	108

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
<b>Figura 1.</b> <i>Levantamiento Artificial técnica de bombeo mecánico</i>	24
<b>Figura 2.</b> <i>Inyección de agua externa o periférica</i>	26
<b>Figura 3.</b> <i>Inyección de agua en arreglos</i>	27
<b>Figura 4.</b> <i>Usos del agua de producción tratada</i>	29
<b>Figura 5.</b> <i>Metodología de investigación</i>	37
<b>Figura 6.</b> <i>Método de Precipitación Alcalina</i>	38
<b>Figura 7.</b> <i>Cloruro ferroso y ácido clorhídrico</i>	40
<b>Figura 8.</b> <i>Cloruro férrico y agua desionizada</i>	40
<b>Figura 9.</b> <i>Mezcla de las dos disoluciones</i>	41
<b>Figura 10.</b> <i>Mezcla resultante</i>	42
<b>Figura 11.</b> <i>Filtración al vacío</i>	42
<b>Figura 12.</b> <i>Sobrante del filtrado en el embudo Büchner</i>	43
<b>Figura 13.</b> <i>Horno de secado a 300°C</i>	44
<b>Figura 14.</b> <i>Síntesis de las nanopartículas de magnetita</i>	45
<b>Figura 15.</b> <i>Solubilidades de hidróxidos metálicos en función del pH</i>	56
<b>Figura 16.</b> <i>Precipitación del Hidróxido de cobre</i>	57
<b>Figura 17.</b> <i>Resultado nanopartículas de magnetita muestra 1</i>	61
<b>Figura 18.</b> <i>Resultado nanopartículas de magnetita muestra 2</i>	62
<b>Figura 19.</b> <i>Resultado nanopartículas de magnetita muestra 3</i>	63
<b>Figura 20.</b> <i>Caracterización SEM Nanopartículas 1</i>	64
<b>Figura 21.</b> <i>Caracterización SEM Nanopartículas 2</i>	65
<b>Figura 22.</b> <i>Caracterización SEM Nanopartículas 3</i>	66
<b>Figura 23.</b> <i>Medición del tamaño de nanopartículas 1</i>	67
<b>Figura 24.</b> <i>Medición del tamaño de nanopartículas 2</i>	68
<b>Figura 25.</b> <i>Medición del tamaño de nanopartículas 3</i>	69
<b>Figura 26.</b> <i>Variación del tamaño nanopartículas</i>	70
<b>Figura 27.</b> <i>Prueba EDS Nanopartículas 1</i>	71
<b>Figura 28.</b> <i>Lectura EDS Nanopartículas 1</i>	72

<b>Figura 29.</b> <i>Tabla de resultados EDS Nanopartículas 1</i>	72
<b>Figura 30.</b> <i>Prueba EDS Nanopartículas 2</i>	73
<b>Figura 31.</b> <i>Lectura EDS Nanopartículas 2</i>	74
<b>Figura 32.</b> <i>Tabla de resultados EDS Nanopartículas 2</i>	74
<b>Figura 33.</b> <i>Prueba EDS Nanopartículas 3</i>	75
<b>Figura 34.</b> <i>Lectura EDS Nanopartículas 3</i>	76
<b>Figura 35.</b> <i>Tabla de resultados EDS Nanopartículas 3</i>	76
<b>Figura 36.</b> <i>Nanopartículas añadidas a cada Jarra</i>	78
<b>Figura 37.</b> <i>Nanopartículas añadidas</i>	78
<b>Figura 38.</b> <i>Agitación a 100 RPM</i>	79
<b>Figura 39.</b> <i>Agitación a 20 RPM</i>	80
<b>Figura 40.</b> <i>Jarra 1 al finalizar agitación</i>	80
<b>Figura 41.</b> <i>Jarra 1 tras varias horas de precipitación</i>	81
<b>Figura 42.</b> <i>Test de jarras final</i>	82
<b>Figura 43.</b> <i>Lectura muestra con reactivo</i>	83
<b>Figura 44.</b> <i>Lectura blanco</i>	84
<b>Figura 45.</b> <i>Prueba de Alcalinidad a la Fenolftaleína</i>	88
<b>Figura 46.</b> <i>Prueba de Alcalinidad a naranja de metilo</i>	88
<b>Figura 47.</b> <i>Prueba de Dureza Total</i>	89
<b>Figura 48.</b> <i>Prueba de Cloruros</i>	90
<b>Figura 49.</b> <i>Prueba de Sulfatos</i>	91
<b>Figura 50.</b> <i>Prueba de Oxígeno Disuelto</i>	92
<b>Figura 51.</b> <i>Lectura de Conductividad y pH</i>	93
<b>Figura 52.</b> <i>Lectura de Turbidez</i>	94
<b>Figura 53.</b> <i>Caracterización al agua sin tratar</i>	109
<b>Figura 54.</b> <i>Prueba de contenido de cobre</i>	110
<b>Figura 55.</b> <i>Caracterización del agua tratada convencionalmente</i>	111
<b>Figura 56.</b> <i>Alcalinidad a Fenolftaleína</i>	112
<b>Figura 57.</b> <i>Alcalinidad Total</i>	113
<b>Figura 58.</b> <i>Cloruros</i>	114
<b>Figura 59.</b> <i>Conductividad</i>	115

<b>Figura 60.</b> <i>DBO</i>	116
<b>Figura 61.</b> <i>DQO</i>	117
<b>Figura 62.</b> <i>Dureza Total</i>	118
<b>Figura 63.</b> <i>Oxígeno disuelto</i>	119
<b>Figura 64.</b> <i>pH</i>	120
<b>Figura 65.</b> <i>Salinidad</i>	121
<b>Figura 66.</b> <i>Sólidos disueltos</i>	122
<b>Figura 67.</b> <i>Sólidos suspendidos totales</i>	123
<b>Figura 68.</b> <i>Sulfatos</i>	124
<b>Figura 69.</b> <i>Turbidez</i>	125
<b>Figura 70.</b> <i>Caracterización del agua tratada con nanopartículas de magnetita</i>	126
<b>Figura 71.</b> <i>Proceso Osmosis Inversa</i>	128
<b>Figura 72.</b> <i>Fenómenos de Osmosis y Osmosis Inversa</i>	129

## LISTA DE TABLAS

	pág.
<b>Tabla 1.</b> <i>Concentraciones de las nanopartículas sintetizadas</i>	39
<b>Tabla 2.</b> <i>Tiempos de filtrado</i>	44
<b>Tabla 3.</b> <i>Escenarios determinados para la realización del test de jarras</i>	47
<b>Tabla 4.</b> <i>Pruebas físicas realizadas al agua tratada y sin tratar</i>	49
<b>Tabla 5.</b> <i>Parámetros fisicoquímicos requeridos para agua de reinyección</i>	54
<b>Tabla 6.</b> <i>Caracterización al agua sin tratar y tratada con el método convencional</i>	58
<b>Tabla 7.</b> <i>Procedimiento test de jarras</i>	77
<b>Tabla 8.</b> <i>Resultados del contenido de cobre en las 3 muestras de agua tratada con nanopartículas de magnetita</i>	83
<b>Tabla 9.</b> <i>Comparación de la eficiencia de remoción de cobre entre el agua tratada</i>	85
<b>Tabla 10.</b> <i>Costos tratamiento con nanopartículas de magnetita</i>	86
<b>Tabla 11.</b> <i>Costos tratamiento convencional</i>	86
<b>Tabla 12.</b> <i>Comparación fisicoquímica del agua de producción tratada y sin tratar</i>	95
<b>Tabla 13.</b> <i>Evaluación de los resultados obtenidos del agua de producción tratada con nanopartículas respecto a los parámetros requeridos para agua de reinyección</i>	98

## RESUMEN

En Colombia para el año 2020, se estimó que la relación de producción agua petróleo (RAP) alcanzó los 16 barriles de agua por cada barril de petróleo y a nivel mundial varió entre 10 y 14 para campos maduros. Estas aguas se caracterizan por los efectos negativos que pueden tener en el ambiente; por lo que actualmente son consideradas como uno de los mayores contaminantes en el mundo, ya que para su reutilización deben ser previamente tratadas. Dentro de los usos más comunes que se le da al agua tratada se destaca la reinyección, para el cual es necesario remover los metales pesados como el cobre, debido a que en altas concentraciones este puede llegar a alcalinizar y degradar la formación, además de formar precipitaciones, incrustaciones y corrosión en tuberías.

Este proyecto nace a partir de la necesidad de minimizar los daños ocasionados por la alta presencia de cobre en el agua de producción destinada a emplearse en procesos de reinyección.

Por esta razón, para el desarrollo del actual proyecto se llevó a cabo la síntesis de las nanopartículas de magnetita por el método de coprecipitación química, para posteriormente comprobar su eficiencia en la remoción del cobre a partir de un test de jarras con 3 muestras de 200 mL de agua de producción y diferentes concentraciones del nanomaterial. Finalmente, se realizó la caracterización fisicoquímica al agua tratada con las nanopartículas de magnetita y el tratamiento convencional de precipitación alcalina, a partir del cual se determinó su capacidad de ser usada como agua de reinyección en base a los parámetros máximos permisibles establecidos en el decreto 1076 del 2015 y la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA).

Dada la metodología empleada se obtuvo como resultado de la síntesis de las nanopartículas de magnetita, tamaños promedio entre 27.61nm y 131.53nm, con porcentajes de masa normalizada de hierro entre 52,67% y 63.31% en relación a las concentraciones de las sales implementadas. Tras el test de jarras se determinó que la mejor eficiencia en la remoción del cobre correspondió a la muestra con mayor concentración de nanopartículas añadidas, consiguiendo una disminución del 98.68% con el tratamiento de nanopartículas de magnetita, alcanzando un contenido de cobre final de 0.05mg/L.

En conclusión, tras la comparación de los resultados fisicoquímicos entre el agua tratada con las nanopartículas de magnetita y los parámetros estipulados para un agua de reinyección según el decreto 1076 del 2015 y DIGESA, se comprueba que el contenido de cobre final se ajustó al máximo aceptado para un agua con fines de reinyección (0,30 mg/L), cumpliendo así, con el objetivo general del actual proyecto.

**Palabras Clave:** Nanotecnología, Nanopartículas Magnetita, Síntesis Coprecipitación, Tratamiento Aguas, Metales Pesados.

## INTRODUCCIÓN

Esta investigación está enfocada en el tratamiento de aguas de producción obtenidas de un campo “B” en Colombia a partir del uso de nanopartículas de magnetita sintetizadas en los laboratorios de la Fundación Universidad de América y donde se lleva a cabo la caracterización de las propiedades físicas y químicas del agua de producción.

Actualmente la razón de producción de agua respecto a la producción de hidrocarburos es bastante elevada, por ejemplo, en el año 2000 se produjeron aproximadamente 210 millones de barriles de agua por día para producir cerca de 75 millones de barriles de petróleo por día de lo que se concluye que por cada barril de petróleo se producen 2,8 de agua y se gastaron alrededor de 40 billones de dólares para el tratamiento y manejo de la misma [1]. Hoy en día en promedio se producen entre 3 a 5 barriles de agua por cada barril de petróleo y se gastan más de 40 mil millones de dólares por año para disminuir los problemas que presentan estas aguas [2].

Es por esto que en los últimos años se ha buscado incrementar la reutilización del agua de producción gracias a que una vez en superficie, estas son separadas y tratadas para ser usadas en procesos de producción como agua reinyectada. según reportes de Ecopetrol, para el año 2018 el porcentaje del agua de producción reutilizada llevada a subsuelo fue del 59% sobre el total, lo que representó 243,9 millones de m<sup>3</sup> para disposición final y 66,9 millones de m<sup>3</sup> para proyectos de recobro [3].

El principal problema del agua de producción radica en los contaminantes que esta puede contener, entre los que se destacan los metales pesados como el cobre, plomo, hierro, magnesio, arsénico, aluminio, cadmio, mercurio, cobalto, zinc, entre otros; que debido a su alcance, biodisponibilidad y afecciones tanto a la salud humana como al medio ambiente resulta conveniente controlar su concentración en las aguas residuales con fin de reutilización [4]. Entre estos, el cobre es el metal más común debido a que se encuentra presente de forma natural en el agua, sedimentos, aire y en los seres vivos; Sin embargo, al superar cierto nivel de concentración genera enfermedades en la salud humana como silicosis, neumoconiosis, asbestosis y silicatosi [5], también puede llegar a las aguas superficiales desde la reutilización de las aguas de producción causando acumulaciones en el sedimento y especies marinas [6], para el caso de reinyección

puede llegar a alcalinizar y degradar la formación, además de formar precipitaciones, incrustaciones y corrosión en tuberías debido a reacciones con sulfatos u otros minerales presentes en el pozo.

Otras amenazas que se buscan evitar durante la reinyección de agua son la formación de precipitados insolubles, incrustaciones, corrosión en la tubería, formación de H<sub>2</sub>S y taponamientos, las cuales se pueden generar a partir de la presencia de elementos como metales pesados, carbonatos, bicarbonatos o sulfatos, cloruros, magnesio, hierro, entre otros [7].

Sin embargo, el costo para su tratamiento puede llegar a ser elevado, por lo cual este proyecto busca evaluar una alternativa de tratamiento de agua de producción por medio de un proceso viable y asequible, evidenciando el rendimiento de las nanopartículas de magnetita y exponiendo sus beneficios al darle una nueva función a estas aguas residuales para así disminuir la contaminación de fuentes acuíferas con elementos tóxicos nocivos para las personas y el ecosistema.

Por lo anterior es importante realizar el adecuado tratamiento del agua e implementar métodos efectivos para la remoción de metales pesados ya que tras un análisis al agua de producción del campo “B” se determinó que su contenido de cobre es significativamente superior y puede afectar internamente el pozo y la formación al ser reinyectada, por lo cual este estudio se enfatizará en la remoción del cobre presente en esta agua a partir de un método poco convencional e innovador como lo son las nanopartículas de magnetita.

Actualmente y a raíz del reciente interés en el uso de la nanotecnología dentro de la industria, se han generado numerosas inquietudes y expectativas a nivel mundial en el tratamiento de aguas, entre ellas, el agua de producción. Por esta razón se han estado desarrollando numerosas investigaciones a nivel nacional e internacional en torno a las variables objeto de estudio desarrolladas en el actual proyecto de investigación, de los cuales 3 estudios sirvieron como referencia aportando información clave durante la elaboración de este.

En el trabajo de investigación “INGENIERÍA DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS PARA LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN AGUAS.” elaborado por el ingeniero químico Wilfredo Marimon Bolívar para la facultad de ingeniería de la Pontificia

Universidad Javeriana en el año 2018, tiene como objetivo principal desarrollar un método eficiente para la producción de nanopartículas magnéticas como tratamiento de hidrosistemas contaminados para la remoción del metal pesado mercurio. Se hizo una comparación entre los métodos de síntesis verde y por coprecipitación para la obtención de nanopartículas y el rendimiento de las mismas a partir de propiedades como el pH, tiempo, capacidad máxima de adsorción, competitividad con otros metales e iones, estabilidad de las nanopartículas, entre otras.

Se demostraron las ventajas al utilizar el Glutatión como agente reductor/estabilizante en la obtención de nanopartículas magnéticas ya que evidenció una reducción del 99.42% en formación de material particulado, 76.17% en consumo de combustibles fósiles y 27.14%, en toxicidad humana, así como una capacidad de adsorción de 34.88 mg/g en la remoción de iones de mercurio en medios acuosos. La descripción detallada y precisa en la síntesis y caracterización de nanopartículas de magnetita a partir del método de coprecipitación química, aporta información importante para la realización del nanomaterial requerido durante la investigación en curso.

En el artículo de investigación “Síntesis y Caracterización de Nanopartículas de Magnetita” elaborado por Salomé Gabriela Galeas Hurtado, Franklin David Alvear Ortiz, Víctor Hugo Guerrero Barragán y Alexis Debut, para la Revista Politécnica de la Escuela Politécnica Nacional (Ecuador), en el año 2017, llevan a cabo la síntesis y caracterización de nanopartículas de magnetita para ser usadas como tratamiento de aguas contaminadas, demostrando cómo la velocidad de agitación, el tiempo de reacción y el pH del medio de dispersión afectan el tamaño y rendimiento de las mismas.

Como resultado se concluyó que la mejor velocidad de agitación fue de 1000 RPM durante 45 mn a una temperatura de 50°C para la sintetización de las nanopartículas demostrando un rendimiento de reacción de 94%, así como el pH del medio afecta directamente el diámetro efectivo de las nanopartículas, disminuyendo en un 60,5 % en un pH de 1 a 7. Al proponer diferentes variables para el método de sintetización por coprecipitación química y explicar cuidadosamente los resultados obtenidos, se ofrece un panorama más amplio en cuanto a las posibles modificaciones al momento de realizar las nanopartículas de magnetita requeridas para el actual proyecto de investigación.

En el trabajo de investigación “Efecto de las nanopartículas de magnetita en el comportamiento de metales pesados en suelos contaminados” elaborado por Javier Pérez Esteban, Bibiana Caballero Mejía, Alberto Masaguer y Ana Moliner, durante el VII Congresso Ibérico das Ciências do Solo (CICS)(Brasil), en el año 2016, se realiza un estudio del efecto en la aplicación de nanopartículas de magnetita y su separación magnética en la reducción del contenido en metales (Cu, Pb, Zn y As) en suelos contaminados de origen minero.

Se logró demostrar que a partir de la utilización de nanopartículas de magnetita y su posterior separación magnética es posible obtener resultados muy satisfactorios en la reducción de los niveles de contaminación por metales pesados ya que se alcanzó una reducción del 85,2% de los mismos en el suelo contaminado. La información suministrada sobre la utilización y efectividad que representa el uso de nanopartículas de magnetita como tratamiento en la remoción de metales pesados, en especial el cobre, en relación al tiempo y pH resulta de gran importancia durante la elaboración de la investigación en curso.

Es así como mediante la implementación de las nanopartículas de magnetita obtenidas por el método de coprecipitación, se evaluará su eficiencia en la remoción de cobre para el tratamiento de aguas de producción del campo “B” en Colombia con el fin de alcanzar los parámetros necesarios para procesos de reinyección validados en laboratorio.

El objetivo general de este trabajo es evaluar el desempeño de las 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, los objetivos específicos planteados son:

1. Realizar el tratamiento del agua de producción del campo “B” para la remoción de cobre mediante el método convencional de precipitación alcalina.
2. Realizar la síntesis y caracterización de las nanopartículas de magnetita.
3. Definir los escenarios para la realización del test de jarras con las nanopartículas de magnetita en la remoción de cobre para el agua de producción del campo “B”.

4. Comparar la eficiencia de remoción de cobre mediante el uso de nanopartículas de magnetita respecto al método convencional de precipitación alcalina en el tratamiento de aguas de producción del campo "B" para procesos de reinyección.

## 1. MARCO TEÓRICO

El marco teórico presenta la información antes y después del problema, es decir aquí se describe los tipos de levantamiento para la extracción del petróleo, los fluidos que lo acompañan en el proceso como lo son el gas o el agua con sus contaminantes, los tratamientos que se le pueden implementar a esta agua y los usos que puede adoptar. También se enfoca en un tratamiento innovador hablando de nanotecnología, sus métodos de síntesis caracterizando desde y hasta donde abarca este tema de investigación.

### 1.1 Aguas de producción

El agua de producción, también conocida en la industria petrolera como salmuera, agua salada o de formación, representa el mayor subproducto generado en los yacimientos y pozos en la producción de petróleo y gas. Esta agua es obtenida en superficie, durante la producción de hidrocarburos desde las formaciones de interés (agua connata), acuíferos activos (agua intrusiva) o proyectos de inyección de agua (agua inyectada) [8].

Dentro de las características principales de estas aguas se encuentra su alto contenido de sal, metales pesados e hidrocarburos dispersos y disueltos, compuestos inorgánicos y gases disueltos, partículas suspendidas, bacterias y variedad de sustancias tóxicas y radiactivas naturales [8], [9].

#### 1.1.1 *Panorama actual*

Históricamente la producción de agua en la industria petrolera ha significado aproximadamente seis veces la producción de petróleo, convirtiéndose en uno de los sectores que trabaja con mayores volúmenes de agua a nivel mundial. Para el año 2000 se estimó que la producción mundial del agua fue de 210 millones de barriles por día equivalentes a 75 millones de barriles de petróleo [10].

En Colombia, esta agua es usada y/o generada durante las fases de exploración, producción, transporte y refinación; sin embargo, su mayor consumo ocurre en la fase de producción, representando el 91,72% del total.

Para el año 2016 en Colombia, el sector de hidrocarburos empleó cerca de 56,23 millones de m<sup>3</sup> de agua, equivalentes a 0,154 millones m<sup>3</sup> al día [2]. Un claro ejemplo es la producción de agua en el campo Castilla ubicado en los llanos orientales, donde por cada 170000 barriles de crudo producido se generan cerca de 4 millones de barriles de agua [11].

Por otra parte, la relación agua-petróleo (RAP), correspondiente a los barriles de agua generados por cada barril de crudo producido, varía a nivel mundial entre 3 y 5, llegando a valores entre 10 y 14 para campos maduros [2]. En Colombia para el año 2020, se estimó que el RAP en los campos colombianos podría llegar a 16 barriles de agua por cada barril de petróleo, sin embargo, esto depende de la condición del mecanismo de producción del yacimiento [9].

### **1.1.2 Manejos del agua de producción**

En busca del mayor aprovechamiento posible, las autoridades ambientales y energéticas, así como las empresas petroleras ofrecen una variedad de opciones para manejar las aguas relacionadas a la producción de hidrocarburos, reduciendo así, el impacto al medio ambiente:

1.1.2.a Vertimiento. Según el Decreto 3930, por la Presidencia de la República de Colombia, 2010, se puede definir como la “Descarga final a un cuerpo de agua, a un alcantarillado o al suelo, de elementos, sustancias o compuestos contenidos en un medio líquido”.

Para el año 2016 en Colombia, fueron vertidos 86.17 millones de m<sup>3</sup> de agua a cuerpos de agua superficiales, alcantarillado y suelo. Al ser una cantidad considerable, la industria petrolera ha buscado minimizar el impacto de sus vertimientos para así disminuir la contaminación del sistema hídrico del país [2].

1.1.2.b Evaporación. Esta opción consiste en cambiar la fase del agua desde su estado líquido al gaseoso a partir del aumento de temperatura, para así, volverla al ambiente [9].

1.1.2.c Reúso en riego. el agua es transportada a áreas específicamente dispuestas para recibirla y aprovecharla en diferentes cultivos y reforestación silvopastoril. Para esta opción de manejo del agua es muy importante que esta cumpla con las condiciones requeridas [9].

1.1.2.d Reinyección. Se busca usar el agua producida en un campo para reinyectarla en ese mismo campo. La reinyección ocurre por medio de los pozos perforados para la extracción de petróleo y se realiza a través de formaciones conectadas hidráulicamente con la formación productora, dándole un soporte de presión para que suba la tasa diaria de recuperación del petróleo.

Su objetivo principal es mantener la presión en las formaciones productoras aumentando la recuperación de petróleo a partir del acuífero o de un barrido con inundación de agua, representando así, un menor impacto sobre el medio ambiente [2].

1.1.2.e Disposal. Este proceso se realiza en formaciones subterráneas profundas distintas y alejadas de las formaciones productoras, su propósito es actuar como canal para verter el agua en el acuífero, garantizando que el agua inyectada no tenga contacto con otras zonas de interés. Para que este tipo de inyección sea implementado debe garantizarse la integridad de los pozos, con fin de conocer la ubicación final del agua y reducir los posibles desvíos de las zonas de interés [2].

## **1.2 Sistemas de producción**

La producción de un pozo y extracción del hidrocarburo ocurre mediante la perforación de la conocida tubería de revestimiento hasta la profundidad de interés. Los hidrocarburos fluyen por los orificios y se extraen por medio de una tubería de menor diámetro, llamada “tubería de producción”. Existen varias formas de extraer hidrocarburos:

### **1.2.1 Flujo natural**

En la mayoría de los casos el yacimiento tiene energía propia, por lo que el pozo comienza a producir por flujo natural. Esta energía es generada por la presión existente en el subsuelo y por los fluidos como agua y gas que acompañan al petróleo, impulsándolos en su trayectoria a través de los poros y canales de la roca, provocando así, su desplazamiento por la tubería de producción hasta la estación de recolección. Se instala en el cabezal del pozo el equipo conocido como “árbol de Navidad”, el cual se maneja a partir de un conjunto de válvulas para la regulación del paso del petróleo [9], [12].

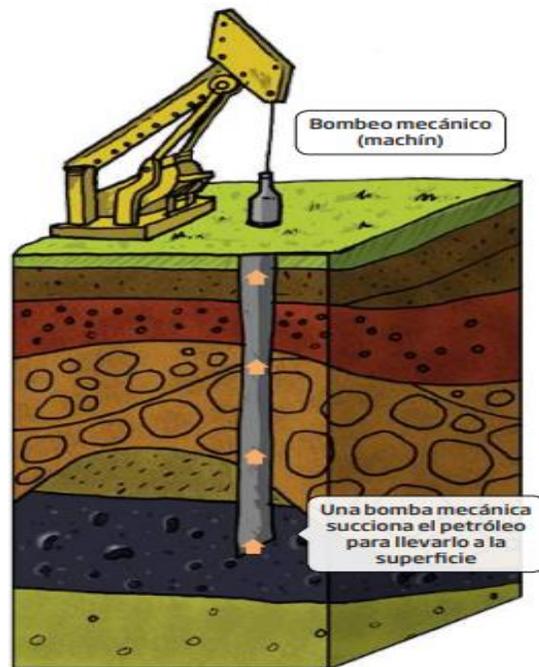
### 1.2.2 Levantamiento artificial

Cuando la presión natural del pozo disminuye, pierde progresivamente la fuerza impulsora y la producción de hidrocarburos se ve reducida, se vuelve necesario emplear otros métodos de extracción, llamadas técnicas de levantamiento artificial.

Entre las técnicas usualmente empleadas se encuentran el levantamiento por gas y el levantamiento con bombeo mecánico (machín), este último, mediante un constante balanceo, acciona una bomba en el fondo del pozo “succionando” el hidrocarburo hacia la superficie [9]. Ver **figura 1**.

**Figura 1.**

*Levantamiento Artificial técnica de bombeo mecánico*



**Nota.** La figura representa la técnica de levantamiento artificial por bombeo mecánico. Tomado de: Ecopetrol S.A, “EL PETROLEO Y SU MUNDO,” [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/yjo9z> [Accedido: May 15, 2021]

Para escoger una técnica de levantamiento artificial apropiada se deben tener en cuenta criterios como: condiciones del yacimiento, propiedades y características de los fluidos, instalaciones mecánicas, mecanismo de impulso del yacimiento, y la disposición de fuerza eléctrica y gas a alta presión [12].

A pesar de la implementación de estas técnicas, el petróleo que se encuentra originalmente en un yacimiento nunca se logra sustraer del todo. En promedio, el factor de recobro es del 15% al 50%, no obstante, a partir de la tecnología aplicada se puede alcanzar hasta el 65%. Es por esto que existen métodos de recobro mejorado, con el fin de prolongar la extracción de petróleo en yacimientos que ya no cuenten con presión natural.

Se divide en recuperación primaria (por medio de energía natural), recuperación secundaria (inyección de agua o gas) y recuperación terciaria (inyección de químicos o gases, combustión en sitio, entre otros) [9].

### **1.2.3 Técnicas de recuperación secundaria**

Como parte del recobro mejorado, estas técnicas consisten en inyectar agua o gas bajo presión al yacimiento, con el fin de aumentar la producción de hidrocarburos y por tanto la vida útil del pozo [12].

1.2.3.a Inyección de agua. Este método de recuperación no térmico es el más usado en Colombia, se basa en la inyección de agua al yacimiento de interés para así aumentar la presión y desplazar el hidrocarburo hacia los pozos productores. El agua busca “arrastrar” el crudo que no puede salir fácilmente del yacimiento. En superficie, el petróleo extraído es almacenado en tanques destinados donde es separado del agua y el gas. El agua es reutilizada en el proceso de inyección, cumpliendo las regulaciones ambientales [9].

Este fluido es el más utilizado durante técnicas de recuperación secundaria por razones como:

- Su disposición inmediata a la mayoría de los yacimientos petroleros existentes a la fecha.
- El precio de su inyección es generalmente menor respecto a otros fluidos.

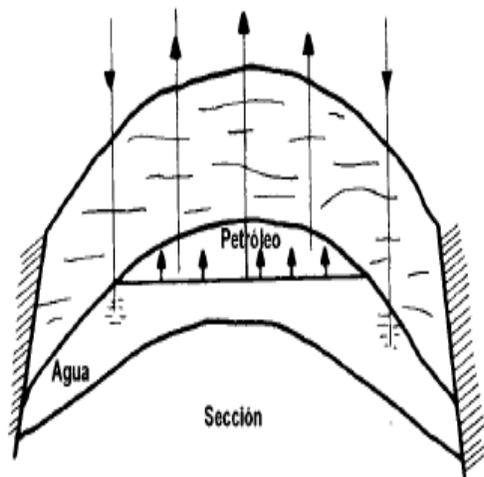
- La relación de su movilidad respecto al crudo liviano y medio es más conveniente que la del gas.
- El agua tiene la cualidad de introducirse en los poros de menor diámetro, debido a la mojabilidad con inclinación al agua de las rocas.
- Sus precios de transporte y procesamiento una vez en superficie son inferiores a los del gas.

Según la posición de los pozos productores e inyectores, la inyección de agua se puede llevar a cabo de dos formas diferentes:

- Inyección de agua periférica o externa. Se basa en la inyección del agua hacia los flancos del yacimiento, fuera de la zona de hidrocarburos. Es conocida también como inyección tradicional y en algunos casos, el agua es inyectada en el acuífero próximo al contacto agua-petróleo. Ver **figura 2.** [13].

**Figura 2.**

*Inyección de agua externa*

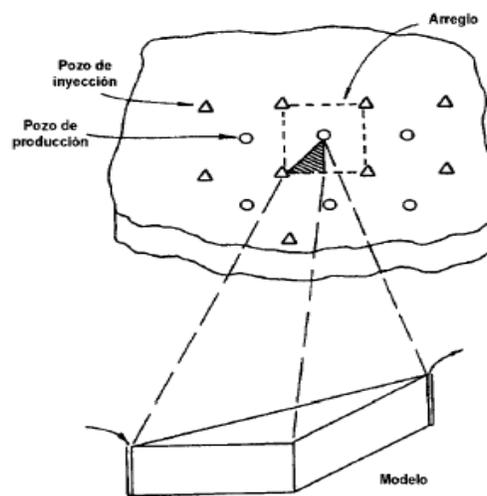


**Nota.** La figura muestra la inyección de agua en un yacimiento anticlinal con acuífero en el fondo. Tomado de: M. Paris de Ferrer, "Inyección de agua y gas en yacimientos petrolíferos," [En línea]. Disponible en: <http://www.pdvsa.com/images/pdf/cuadernos/Produccion.pdf> [Accedido: May 15, 2021]

➤ Inyección de agua en arreglos o dispersa. Se basa en la inyección del agua en el interior de la zona de petróleo. La zona es invadida por el agua desplazando los fluidos hacia los pozos productores. Esta inyección también es conocida como inyección de agua interna, debido a que el fluido se inyecta en la zona de petróleo por medio de un número determinado de pozos inyectoras, formando un arreglo geométrico como se muestra en la **figura 3**. [13]

**Figura 3.**

*Inyección de agua en arreglos*



**Nota.** La figura muestra un proceso de inyección de agua en un arreglo de cinco pozos. Tomado de: M. Paris de Ferrer, “Inyección de agua y gas en yacimientos petrolíferos,” [En línea]. Disponible en: <http://www.pdvsa.com/images/pdf/cuadernos/Produccion.pdf> [Accedido: May 15, 2021]

1.2.3.b Inyección de gas. Este método de recuperación secundaria utiliza gas inyectado como impulsador de la presión en un yacimiento o pozo petrolero. Generalmente los

campos tienen una repartición planeada de pozos inyectoros con el objetivo de mantener la presión del yacimiento y ejecutar un barrido eficaz de los fluidos recuperables.

Dentro de los beneficios de la inyección de gas se destacan su disponibilidad en algunas áreas de producción en especial del mismo yacimiento que se está produciendo, y al ser un fluido no reactivo con las rocas del yacimiento no presenta dificultades considerables al momento de la inyección [13].

La técnica de inyección de gas se cataloga en dos tipos:

- Inyección de gas interna o dispersa. Hace referencia a la inyección de gas en el interior de la zona petrolífera. Usualmente se lleva a cabo en yacimientos con empuje por gas en solución, en donde no haya tendencia a desarrollarse capa de gas secundaria. Al llegar el hidrocarburo a superficie emerge junto a él el gas inyectado [13].
- Inyección de gas externa. Este tipo de inyección, por el contrario, se fundamenta en la inyección del gas en la parte más alta de la estructura donde se encuentre la capa de gas, ya sea primaria o secundaria. Generalmente se emplea en yacimientos donde existe segregación por influencia de las fuerzas gravitacionales [13].

### **1.3 Tratamiento de aguas**

El agua es un recurso fundamental para asegurar la vida de todos los seres vivos, y a pesar de que su acceso, saneamiento y uso es un derecho fundamental, miles de millones de personas en el mundo se enfrentan diariamente a numerosos problemas para acceder a las disposiciones más básicas.

Es por esto que, el tratamiento de agua tiene como objetivo la eliminación y/o reducción máxima de la contaminación o componentes no deseables de las aguas, a través de procesos de distintos tipos: físico, químico, fisicoquímico o biológico y así conseguir agua con las características requeridas para el uso que se le quiera dar.

#### **1.3.1 Tratamiento de aguas residuales**

El agua es un recurso vital no solo para su consumo, también lo es para todo tipo de procesos industriales. Factores externos e incluso nuestra actividad modifica su estado original y la contamina, lo que provoca graves implicaciones ambientales en ríos y mares e impide su uso en actividades como la agricultura. Por consiguiente, es necesario

garantizar un adecuado tratamiento del agua para su reutilización y/o devolución al medio ambiente.

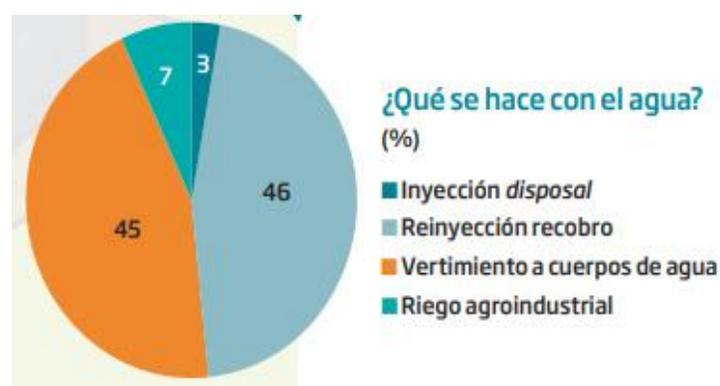
En la industria hidrocarburífera, el tratamiento de aguas residuales es esencial, ya que este incluye el retiro de aceites, sólidos suspendidos, controla el pH y fenoles presentes, entre otros. Estos tratamientos consisten en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que eliminan los contaminantes del agua para que el ser humano pueda hacer uso de ella.

Actualmente a nivel mundial se invierten cerca de US\$50 billones cada año en el tratamiento de aguas de producción. Sin embargo, en la industria de los hidrocarburos toda el agua que se destina antes, durante o después no puede ser manipulada libremente, para proceder en Colombia la industria debe obedecer a por lo menos 300 normas ambientales vigentes, regionales y nacionales [9].

El tratamiento de aguas residuales es importante hoy en día ya que diferentes actividades industriales dependen esta. Según Ecopetrol, para el año 2020, del agua producida y tratada en campos petrolíferos el 46% fue destinada para reinyección recobro, el 45% para vertimientos a cuerpo de agua, el 7% a riego industrial y el 3% como inyección disposal. Ver **figura 4.** [9].

**Figura 4.**

*Usos del agua de producción tratada*



**Nota.** La figura muestra un esquema de la destinación del agua producida en la industria petrolera. Tomado de: Ecopetrol S.A, "EL PETROLEO Y SU MUNDO," [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/yjo9z> [Accedido: May 15, 2021]

### **1.3.2 Técnicas convencionales de tratamiento de agua**

La disposición de las técnicas de tratamiento de agua depende de diferentes factores y condiciones, las convencionales hacen referencia a las técnicas que usualmente son implementadas para la remoción de los contaminantes. Algunas de estas son [14]:

1.3.2.a Filtración por Membrana. La disolución por membrana se lleva a cabo en operaciones para el tratamiento de agua potable, aguas residuales domésticas y aguas residuales industriales, generalmente usada para tratar y obtener sales metálicas de los restos generados en procesos galvanoplásticos, en la producción comidas y bebidas, en el reúso de aceites, y durante la explotación y producción de hidrocarburos. Esta tecnología ha demostrado altas eficiencias y es de fácil operación, sin embargo, llega a generar una alta cantidad de lodos con contenido de metales [14].

Pueden clasificarse a partir de distintas características como el material de la membrana: sintéticos o polímeros modificados, estructurados y acoplados, el peso molecular, permeabilidad, espesor activo de la película, superficie y carga de su superficie. Dentro de las clasificaciones de la filtración por membrana encontramos [14]:

- Electrodiálisis
- Osmosis Inversa
- Nanofiltración
- Ultrafiltración

1.3.2.b Adsorción (Convencional). Esta técnica proporciona la remoción de numerosos contaminantes, es de buena capacidad, cuenta con cinética rápida y selectiva en base al adsorbente del cual también dependerá su eficiencia, gracias a la estructura física del mismo. Entre los adsorbentes, en su mayoría con procesos distintos de modificación química, usualmente empleados en la remoción de metales pesados, colorantes iónicos, materiales radioactivos entre otros, encontramos: las arcillas, carbones activados, Zeolitas, biopolímeros y perlas de sílice [14].

1.3.2.c Precipitación química. Esta técnica es la más utilizada en los procesos industriales gracias a su relativamente sencilla ejecución, sus bajos costos y su selectividad, sin embargo, uno de sus mayores problemas es el alto costo de su mantenimiento, pues tiende a generar grandes cantidades de lodo. La precipitación química se puede ejecutar a partir de distintos componentes como hidróxidos y sulfuros [14].

1.3.2.d Electrocoagulación. Este proceso emplea los principios básicos de la coagulación-floculación por medio de un reactor electrolítico, el cual posee un recipiente con una fuente de corriente y distintos electrodos que aportan iones desestabilizadores de partículas coloidales, estos logran reemplazar el cargo de los compuestos químicos utilizados en el tratamiento convencional, logrando así, inducir la corriente eléctrica en el agua por medio de las placas metálicas paralelas [14].

### **1.3.3 Técnicas no convencionales de tratamiento de agua**

Las técnicas de tratamiento de agua no convencionales, corresponden a aquellas con procesos innovadores y actuales para la eliminación de contaminantes y factores no deseados. Algunas de estas son [14]:

1.3.3.a Fitorremediación. Es una técnica parcialmente reciente y se considera rentable, eficiente, y amigable con el medio ambiente. Consiste en el uso de plantas y microbios existentes en el suelo que participan en la reducción de las concentraciones de los contaminantes presentes en el agua. Estas fitotecnologías cuentan con varias ventajas respecto a los métodos fisicoquímicos usados actualmente, como su amplia aplicabilidad y bajos costos [14].

1.3.3.b Biopolímeros. El uso de esta técnica es interesante en la industria gracias a que ha demostrado la reducción de las concentraciones de iones metálicos de transición a concentraciones de partes por billón. Así mismo, poseen de alta disponibilidad y son seguros ambientalmente. Se pueden dividir en un extenso número de grupos funcionales, como aminas e hidroxilos, que incrementan el rendimiento de absorción de iones metálicos [14].

1.3.3.c Hidrogeles. Esta técnica consiste en el uso de polímeros hidrófilos reticulados con la capacidad de incrementar sus volúmenes gracias a ensanchamiento en el agua. Esta característica los convierte en muy utilizados para la purificación de las aguas residuales. Distintos hidrogeles se han sintetizado e investigado su comportamiento de adsorción de metales pesados, obteniendo resultados satisfactorios [14].

1.3.3.d Nanotecnología. El uso de la nanotecnología para diferentes aplicaciones industriales ha tomado gran fuerza en los últimos años. Ya que gracias a sus propiedades

ha demostrado resultados eficientes en diferentes ámbitos en relación a los elementos en sus escalas habituales.

#### **1.4 Nanotecnología**

Se basa en el estudio y manejo de materia en tamaños extremadamente pequeños. Para entrar en la clasificación de nano, el material debe tener un tamaño de entre 1 y 100 nanómetros. La nanotecnología abarca una muy extensa gama de diferentes materiales, procesos de fabricación y tecnologías implementadas para creación y mejora de productos de uso diario.

En los últimos años se ha visto un aumento en la implementación de la nanotecnología en aplicaciones industriales, gracias a que, por su reducido tamaño, estas tienen propiedades diferentes al material en escala habitual, como mayor conductividad y magnetismo, amplias áreas superficiales por unidad de volumen, selectividad de compuestos de naturaleza química, entre otros, siendo de gran beneficio en la biomédica, materiales de alta resistencia y adsorción de contaminantes [15].

##### ***1.4.1 Nanotecnología en el tratamiento de aguas residuales***

La nanotecnología se ha venido implementando en el tratamiento de aguas residuales gracias a su eficiencia, innovación y sustentabilidad en la remoción de contaminantes de compleja separación como los colorantes, grasas, aceites y metales pesados. Estos contaminantes a raíz de su tamaño e interacciones químicas con el entorno crean la necesidad de implementar tecnologías con afinidad y selectividad precisa.

A partir de numerosas investigaciones se ha demostrado que los nanomateriales de diferentes elementos (por ejemplo, hierro, sílice, zeolita, alúmina) tienen la capacidad de remover altas cantidades de especies químicas naturales (por ejemplo, colorantes sintéticos, crudo emulsionado, plomo, cromo) por medio de la adsorción [15].

##### ***1.4.2 Nanopartículas de magnetita***

La magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) hace parte de los óxidos de hierro más frecuentes e importantes. Los óxidos de hierro son elementos que se encuentran generalmente en la

naturaleza y que logran sintetizarse de forma sencilla en laboratorio, están compuestos por hierro y oxígeno obteniendo así sus diferentes propiedades [16], [17].

La magnetita es de color negro y su propiedad de magnetismo es ferromagnético, esto quiere decir que, al someterse a un campo externo algunos dipolos se alinean y otros se oponen obteniendo pequeñas magnetizaciones [17]. Gracias a esto, posee cualidades como la remoción de iones metálicos disueltos en agua ( $\text{Hg}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{4+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  y  $\text{Pb}^{2+}$ ) así como materiales orgánicos y biológicos [16] volviéndolas útiles en aplicaciones como catálisis, sensores, biomedicina, dispositivos electrónicos y remediación ambiental [18].

Algunas de las ventajas de la implementación de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  como nanomaterial durante la remoción de iones de metales pesados son su bajo costo, la capacidad de tratar grandes volúmenes de agua y la opción de emplear un campo magnético externo para la separación de la fase estacionaria, favoreciendo la extracción de contaminantes presentes [16], cabe resaltar también su biocompatibilidad y excelentes propiedades magnéticas.

Múltiples técnicas químicas han sido desarrolladas para la obtención de nanopartículas de magnetita con una estrecha distribución de tamaños y propiedades uniformes [18].

### **1.4.3 Métodos de síntesis de magnetita**

Entre los métodos de síntesis de magnetita se pueden destacar los siguientes:

1.4.3.a Co-precipitación química. Es el procedimiento químico generalmente más utilizado a raíz de su simplicidad, relación costo - efectividad y la facilidad de adaptación de las propiedades de las partículas, además que es un método fácilmente escalable [18]. Se fundamenta en la mezcla de sales de  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$  en una disolución acuosa preferiblemente a pH básico. Las características de las nanopartículas resultantes dependerán de las sales usadas, las concentraciones de sales implementadas, la temperatura de reacción, el pH de la disolución y la fuerza iónica del medio. A raíz de varios estudios, se ha demostrado que el tamaño de partícula, así como su magnetismo de saturación, aumentan con relación a la razón de los iones empleados [17].

1.4.3.b Microemulsión. Es una dispersión isotrópica de dos líquidos inmiscibles termodinámicamente estables, en donde una película interfacial de moléculas surfactantes equilibra los micro dominios de los líquidos. La razón molar que presente el agua junto al surfactante determinará el tamaño de las micelas generadas. Sin embargo, este método es poco empleado debido a que la forma y tamaño de las partículas han demostrado intervalos muy amplios, además de necesitarse grandes volúmenes de disolvente para la producción considerables del nanomaterial [17].

1.4.3.c Sol-gel. Este procedimiento consiste en obtener el material de interés (generalmente un óxido metálico) por medio de una disolución coloidal. Es conocido como un procedimiento por vía húmeda, pues parte de una mezcla de sólidos en suspensión. Ha sido mayormente utilizado con fines biomédicos, obteniendo resultados favorables [17].

1.4.3.d Hidrotérmica. Este método se fundamenta en la transferencia de fases y mecanismos de separación en interfaces del líquido, sólido y fases de disoluciones existentes en la síntesis. Este método puede ser implementado para la obtención de nanopartículas de magnetita, sin embargo, debido a su dificultad no ha terminado de ser comprendido y estudiado a profundidad [17].

1.4.3.e Descomposición térmica. Por medio de este método sí es posible obtener nanocristales magnéticos monodispersos al sintetizar elementos organometálicos (acetilacetatos y cupferratos metálicos o carbonilos) en disolventes orgánicos de punto de ebullición alto, por medio de surfactantes (ácidos grasos, ácido oleico y hexadecilamina) como estabilizadores. El tamaño de las nanopartículas será determinado por las proporciones de los reactivos, la temperatura y tiempo de reacción, entre otros [17]. Este proceso a pesar de tener buenos resultados, conlleva una dificultad considerable en su manipulación, lo que impide su frecuente implementación.

## **1.5 Metales pesados**

Los metales pesados hacen relación a todo elemento químico metálico con densidad relativamente alta y que represente un riesgo tóxico o venenoso desde concentraciones pequeñas. Este tipo de metales son componentes naturales de la corteza terrestre pero no pueden ser degradados o destruidos [19].

Ejemplo de metales no esenciales: mercurio, cadmio, arsénico, cromo, talio y plomo [19].

Ejemplo de metales traza: cobalto, cobre, hierro, manganeso, molibdeno, selenio, vanadio y zinc [19].

Múltiples actividades industriales provocan una contaminación a gran escala con metales pesados (Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, Ni, Hg, Co, Ag, Au) en el medio ambiente. En el caso de los suelos, estos tienden a perjudicar la fertilidad y/o el uso de los mismos, por otro lado, en el caso de aguas superficiales y los acuíferos, pueden comprometer seriamente el uso de este recurso como fuente de agua para el consumo humano y actividades industriales que dependan del agua y se vean afectadas por la presencia de estos contaminantes [20].

### **1.5.1 Cobre**

El cobre es el elemento número 29 en la tabla periódica con símbolo Cu, es un metal pesado de transición no ferroso encontrado fácilmente en la naturaleza. Su clasificación magnética corresponde a un poco paramagnético, es decir que no es magnético. Tiene alta conductividad térmica y eléctrica.

Al ser un elemento común en la naturaleza se extiende en el ambiente debido a su alto uso en diferentes actividades, haciéndolo fácil de encontrar en muchas clases de comida, agua y aire. Sin embargo, al ser un metal traza, es considerado como un elemento esencial para la salud humana, ya que los humanos podemos manejar concentraciones altas del mismo.

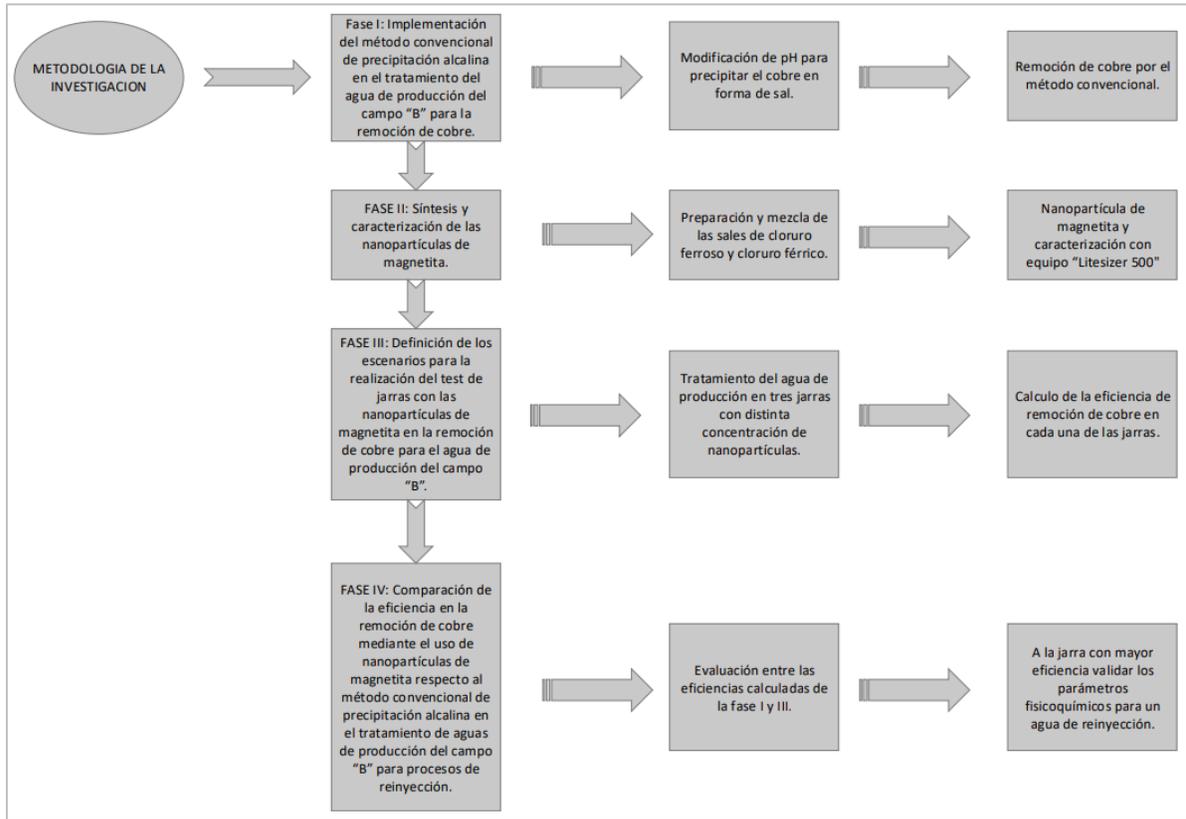
El cobre liberado en el agua a través de las tuberías con alta corrosión de este, y por medio del agua utilizada para agricultura en donde es probable la contaminación a los suelos, microorganismo, plantas y animales. Es encontrado usualmente cerca de asentamientos industriales, minas, lugares de residuos y vertederos [21].

## 2. METODOLOGÍA

El actual proyecto está enfocado en el área de nanotecnología para proyectos de recuperación avanzada. La investigación se realizó en cuatro fases; durante la fase I se implementó el método convencional de precipitación alcalina como tratamiento del agua de producción del campo “B” para la remoción de cobre; en la fase II se sintetizaron las nanopartículas de magnetita a partir del método de coprecipitación con las sales cloruro férrico y cloruro ferroso, y se llevó a cabo el proceso de caracterización de las mismas con un microscopio electrónico de barrido “SEM” TESCAN MIRA 3 FEG-SEM; una vez obtenidas las nanopartículas se realizó la fase III, la cual consistió en definir todos los escenarios para la realización del “Test de jarras” con las nanopartículas de magnetita en la remoción de cobre para el agua de producción del campo “B”. Finalmente, al terminar el “test de jarras” se realizó la fase IV, en donde se comparó la eficiencia de remoción de cobre entre el uso de las nanopartículas y el método convencional de precipitación alcalina en el tratamiento de aguas de producción del campo “B” confirmando los parámetros para un proceso de reinyección de acuerdo al decreto 1076 del 2015 [22], [23]. La metodología que se llevó en este proyecto se muestra en la **figura 5.**

**Figura 5.**

*Metodología de investigación*



**Nota.** Esta figura representa la metodología implementada para el cumplimiento de cada objetivo específico planteado.

**2.1 Fase I: Implementación del método convencional de precipitación alcalina en el tratamiento del agua de producción del campo "B" para la remoción de cobre**

Antes de empezar la primera fase se realizó la caracterización al agua de producción del campo "B" sin tratar, determinando sus propiedades fisicoquímicas.

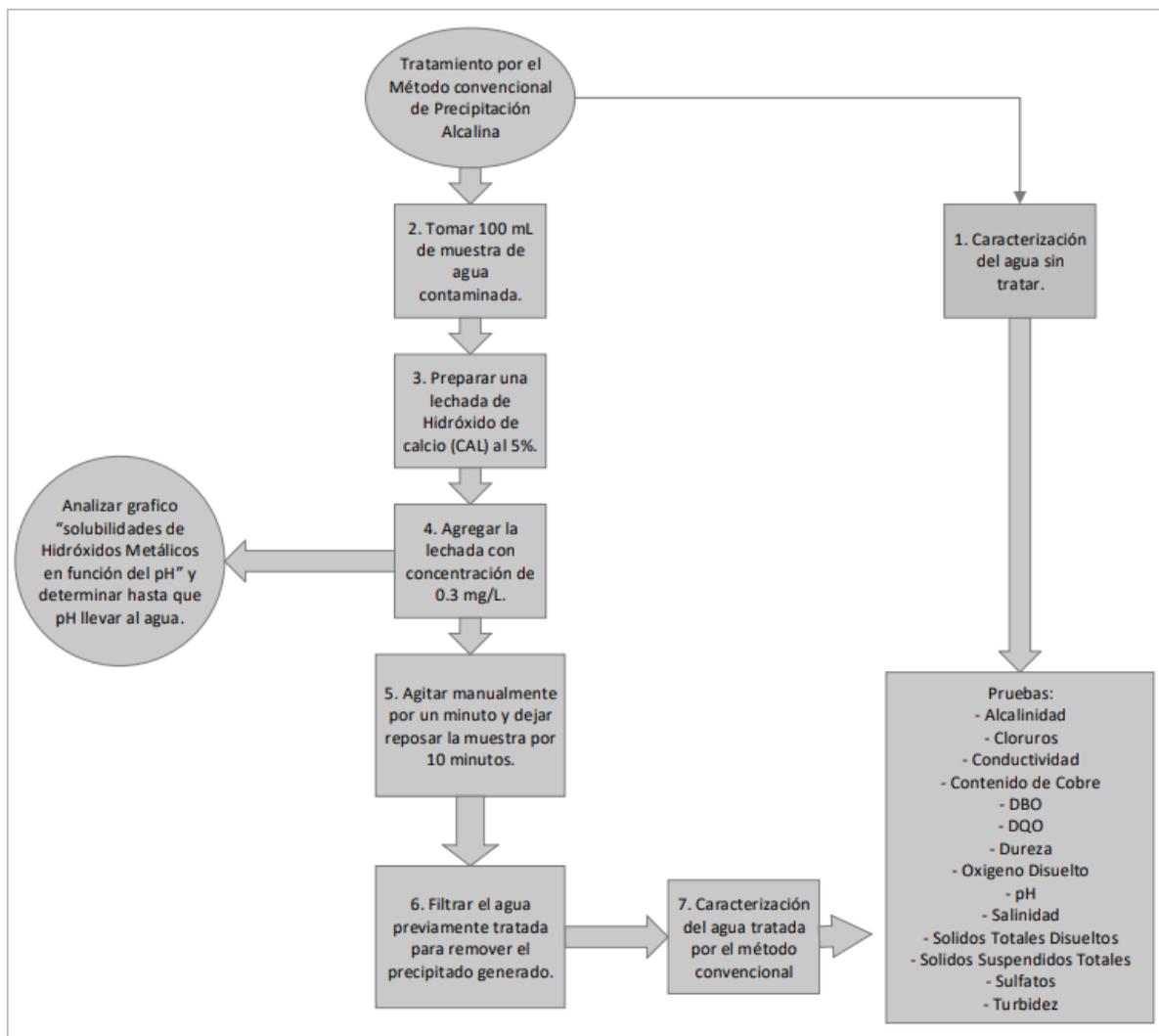
La primera etapa consistió en la implementación del método convencional de precipitación alcalina en el tratamiento de agua de producción del campo "B" para la remoción de cobre, siendo el método comúnmente usado en la industria para la remoción de cobre.

Para este procedimiento se tomó una muestra de 200 mL de agua contaminada y se adicionó una lechada de hidróxido de calcio (Ca) al 5% con una concentración de 3 mg/L

[24]. Luego se agitó manualmente durante un minuto, todo esto con el objetivo de aumentar el pH por encima de 8,3, en donde, pasados 10 minutos se generó la precipitación del metal pesado en forma de hidróxido de cobre [25], a continuación, se realizó la prueba de contenido de cobre con el espectrofotómetro Hach DR2700 y se corroboró en la gráfica de “solubilidades de hidróxidos metálicos en función del pH” [26]. Este procedimiento fue realizado en el laboratorio IMA S.A.S. y se describe en la **figura 6**.

**Figura 6.**

*Método de Precipitación Alcalina*



**Nota.** El esquema representa paso a paso el tratamiento convencional de precipitación alcalina.

Finalmente, se efectuó la caracterización fisicoquímica del agua una vez tratada con el método convencional, reportada por el laboratorio IMA S.A.S.

Todos los resultados entregados por el laboratorio IMA S.A.S. durante esta fase se encuentran en el **anexo 1**.

## 2.2 Fase II: Síntesis y caracterización de las nanopartículas de magnetita

La segunda etapa consistió en la síntesis de las nanopartículas de magnetita por el método de coprecipitación para lo cual se realizaron 3 muestras usando sales de cloruro ferroso y cloruro férrico en distintas concentraciones para cada una, especificadas en la **tabla 1**.

**Tabla 1.**

*Concentraciones de las nanopartículas sintetizadas*

NANOPARTICULA DE MAGNETITA	CONCENTRACION DE CLORURO FERROSO	CONCENTRACION DE CLORURO FERRICO
Nanopartículas 1	4.00 g	8.00 g
Nanopartículas 2	8.00 g	16.00 g
Nanopartículas 3	12.00 g	24.00 g

**Nota.** Respetando la relación estequiométrica 1:2 en la tabla se muestra los gramos utilizados para cada muestra de nanopartículas obtenidas.

Inicialmente, se disolvió la sal de cloruro ferroso en 25mL de HCl al 0.2% ver **figura 7**.

**Figura 7.**

*Cloruro ferroso y ácido clorhídrico*



**Nota.** Procedimiento realizado para las 3 muestras de nanopartículas.

Simultáneamente se disolvió la sal de cloruro férrico con 25 mL de agua desionizada ver **figura 8**.

**Figura 8.**

*Cloruro férrico y agua desionizada*



**Nota.** Procedimiento realizado para las 3 muestras de nanopartículas.

Ambas sales fueron mezcladas en un medio saturado con 25 mL de amoniaco ( $\text{NH}_3$ ) ver **figura 9**.

**Figura 9.**

*Mezcla de las dos disoluciones*

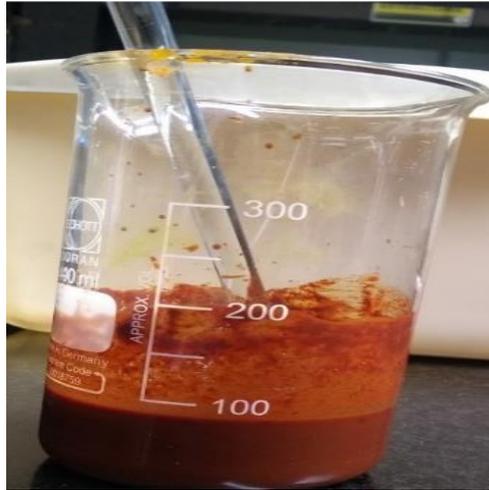


**Nota.** Procedimiento realizado para las 3 muestras de nanopartículas.

Posteriormente se agitó manualmente la mezcla durante 10 minutos en los que se presentó la precipitación de las nanopartículas de magnetita [15] ver **figura 10**.

**Figura 10.**

*Mezcla resultante*



**Nota.** Procedimiento realizado para las 3 muestras de nanopartículas.

A continuación, el lodo resultante pasa a un proceso de filtración al vacío, ver **figura 11.**

**Figura 11.**

*Filtración al vacío*



**Nota.** Procedimiento para las 3 muestras de nanopartículas.

Durante la filtración se lavó con agua desionizada y etanol al 95% obteniendo el precipitado, ver **figura 12**.

**Figura 12.**

*Sobrante del filtrado en el embudo  
Büchner*



**Nota.** Procedimiento realizado para las 3 muestras de nanopartículas.

Al finalizar la filtración el tiempo total gastado por cada muestra se reporta en la **tabla 2**. Finalmente se secó a 300°C en un horno de secado por 3 horas obteniendo como resultado las nanopartículas de magnetita.

**Tabla 2.**

*Tiempos de filtrado*

NANOPARTICULA DE MAGNETITA	TIEMPO DE FILTRADO
MUESTRA 1	4 horas
MUESTRA 2	10 horas
MUESTRA 3	13 horas

**Nota.** La tabla registra las horas de filtrado requeridas para cada muestra de nanopartículas.

Finalmente, las muestras se secaron a 300°C en un horno de secado por 3 horas, ver **figura 13.**

**Figura 13.**

*Horno de secado a 300°C*

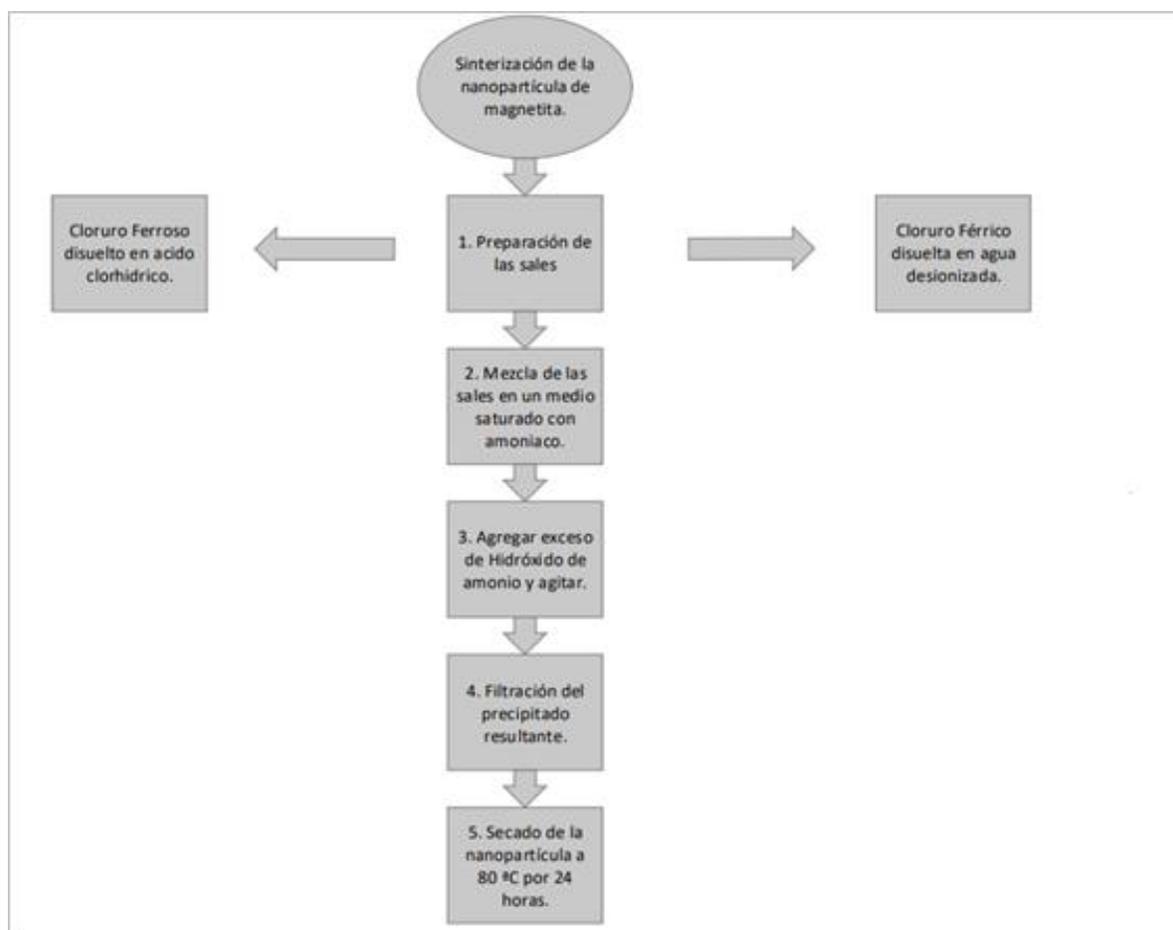


**Nota.** Procedimiento realizado para las 3 muestras de nanopartículas.

Este procedimiento fue realizado en el laboratorio de crudos y aguas de la Fundación Universidad de América y se describe en la **figura 14.**

**Figura 14.**

*Síntesis de las nanopartículas de magnetita*



**Nota.** El esquema representa paso a paso el procedimiento para la preparación de las 3 muestras de nanopartículas de magnetita y el equipo usado para la caracterización de la misma.

La caracterización de las nanopartículas se llevó a cabo en el laboratorio de la Universidad Pontificia Bolivariana sede Bucaramanga quien prestó un equipo microscopio electrónico de barrido “SEM” por medio del cual se determinó:

- El tamaño de partícula a partir de un análisis SEM. Para poder realizar el análisis SEM la muestra debe ser sólida, seca o libre de humedad, tener un tamaño apto para el microscopio (máximo 3cm\*3cm\*3cm), estar fijas y ser conductoras de los electrones.

Para preparar las muestras se realizó un proceso de secado haciendo uso de un desecador de punto crítico con sistema de recirculación de agua y posteriormente se hizo el montaje fijando la muestra con cinta de doble faz de carbono.

Este equipo trabaja mediante la emisión de electrones que al ser direccionados adecuadamente, se relacionan con los átomos de la superficie de la muestra produciendo múltiples tipos de radiación que pasa a ser analizados por varios tipos de detectores proporcionando información morfológica: tamaño y formas de las partículas, topográfica: características de la superficie e información cristalográfica: orden de los átomos; por medio de imágenes con un alcance de hasta 1'000.000 de magnificaciones hasta con resolución de 2 nm. Esta información es transmitida al software SPIRIT 2.0 donde recopila y genera una imagen digital y una escala para la determinación del tamaño de la muestra.

➤ La composición química elemental a partir de un detector especial de electrones de rayos X por EDS BRUKER. Por medio de este detector es posible detectar las cantidades relativas de los elementos presentes de la tabla periódica y el orbital del que proviene cada electrón de la superficie de la muestra, así como también mapeos de los lugares donde se encuentran dentro de la misma.

### **2.3 Fase III: Escenarios para la realización del test de jarras con las nanopartículas de magnetita**

En la tercera etapa se definieron los escenarios en los que se realizó el test de jarras con las nanopartículas de magnetita para la remoción de cobre existente en el agua de producción del campo "B". Se determinó que el test de jarras se llevaría a cabo a partir de tres (3) muestras diferentes, en donde cada jarra contó con 200 mL de muestra de agua de producción y el factor variable fue la concentración de nanopartículas de magnetita añadida, las cuales correspondieron respectivamente "JARRA 1" con concentración de 0,3 g/L (gramos de nanopartículas de magnetita por litro), "JARRA 2" con concentración de 0,6 g/L y "JARRA 3" con concentración de 0,9 g/L tomando como referencia la tesis elaborada por Yuridia Velasco Gómez [27].

A continuación, se implementó una agitación inicial de 100 RPM (Revoluciones por minuto) durante un minuto y se continuó con una agitación de 20 RPM durante 20 minutos adicionales para las tres jarras, estos parámetros se toman a partir del tratamiento con coagulantes realizado en la tesis “Utilización de nanopartículas magnéticas en la modificación de coagulante para proceso de tratamiento de agua lluvia” [28].

Este procedimiento fue realizado en el laboratorio de crudos y aguas de la Fundación Universidad de América y se explica en la **tabla 3**.

**Tabla 3.**

*Escenarios determinados para la realización del test de jarras*

JARRA	MUESTRA DE AGUA DE PRODUCCIÓN	CONCENTRACIÓN DE NANOPARTICULAS DE MAGNETITA	AGITACIÓN
JARRA 1	200 mL	0,3 gr/L	Agitación inicial de 100 RPM (Revoluciones por minuto) durante un minuto y se continuó con una agitación de 20 RPM durante 20 minutos
JARRA 2		0,6 gr/L	
JARRA 3		0,9 gr/L	

**Nota.** Durante el proceso de agitación cada jarra estuvo expuesta a imanes en su base exterior.

#### **2.4 Fase IV: Comparación de las eficiencias en la remoción de cobre en el tratamiento de aguas de producción con fines de reinyección**

Para la primera parte de esta fase, haciendo uso del instrumento espectrofotómetro HACH DR 2800, se determinó el contenido de cobre resultante en cada una de las 3 muestras de agua tratadas previamente con las nanopartículas de magnetita. Una vez identificada la muestra de agua con mejores resultados, se corroboró que la concentración presente fuera menor a 0.30 mg/L siendo este el contenido de cobre

permisible en un agua de reinyección según “DIGESA” [23], validando así, el objetivo general de este proyecto de investigación.

Posteriormente, se calcularon las eficiencias de remoción de cobre alcanzadas en ambos métodos de tratamiento y se compararon entre sí, determinando qué tratamiento obtuvo un mejor desempeño en la remoción de este metal pesado.

Con el fin de establecer la mejor opción de tratamiento, se realizó un análisis de costos en donde se tuvieron en cuenta los siguientes factores: mano de obra, químicos, utensilios y equipos de laboratorio requeridos durante el desarrollo experimental del actual proyecto.

Después de ser establecida la jarra con mayor eficiencia en remoción de cobre tras el tratamiento con nanopartículas de magnetita, se realizó la caracterización del agua en cada parámetro fisicoquímico descrito con su respectiva metodología, procedimiento y cálculo en la **tabla 4**.

**Tabla 4.***Pruebas físicas realizadas al agua tratada y sin tratar*

PRUEBA REALIZADA	DESCRIPCIÓN	TÉCNICAS Y/O MÉTODOS DE CÁLCULO	FÓRMULA UTILIZADA
Alcalinidad (Anexo 2)	Definida como la capacidad para neutralizar ácidos, la alcalinidad se debe principalmente por el CO <sub>2</sub> que absorbe el agua en su trayecto. Para su determinación se usa un ácido fuerte como el ácido sulfúrico, que aporta los protones necesarios para la titulación [31].	Técnica de titulación	$\frac{T_{(P_m+M_f)} * N * 49 * 1000}{mL\ muestra}$
Cloruros (Anexo 2)	Determinación del Ion cloruro en el agua, que en altas cantidades puede deteriorar estructuras metálicas. Puede ser titulado con nitrato de mercurio debido a la formación de cloruro de mercurio soluble y ligeramente dissociado [32].	Método de Mohr	$\frac{mL\ AgNO_3 * N * 35.45 * 1000}{mL\ muestra}$
Conductividad (Anexo 2)	“Capacidad que tiene una sustancia de transportar electrones (conducir electricidad); en el agua, esta capacidad se ve influenciada por la cantidad de sales disueltas y la temperatura”. [32]	Conductímetro	Lectura de instrumento
Contenido de cobre	En este método de prueba el cobre en la muestra reacciona con una sal del ácido de bicinconinato contenido en el reactivo de cobre 2, para formar un	Espectrofotómetro	Lectura de instrumento

PRUEBA REALIZADA	DESCRIPCIÓN	TÉCNICAS Y/O MÉTODOS DE CÁLCULO	FÓRMULA UTILIZADA
	complejo de color púrpura proporcional a la concentración de cobre y así obtener lectura. [33]		
DBO (Anexo 2)	Criterio que mide la cantidad de oxígeno agotado al degradar la materia orgánica en una muestra bajo condiciones específicas. El sistema Oxitop se basa en la lectura de presión en un sistema cerrado [34]	Técnica de respirometría	Laboratorio IMA S.A.S.
DQO (Anexo 2)	Cálculo del oxígeno correspondiente al contenido de materia orgánica de una muestra de agua que es susceptible a un oxidante químico fuerte [32]	Técnica de titulación	Laboratorio IMA S.A.S.
Dureza (Anexo 2)	El contenido de calcio y magnesio presente en el agua es considerado como Dureza, la cual indica la cantidad total de iones alcalinotérreos que esta contiene. El ácido débil etilendiamino-tetraacético (EDTA) es generalmente usado para la determinación de la dureza. [35]	Técnica de titulación	$\frac{mLEDTA * NEDTA * 50 * 1000}{mL muestra}$
Oxígeno disuelto (Anexo 2)	Prueba fundamental para conocer la distribución de organismos en el agua. Una muestra de agua se hace reaccionar con una solución de iones manganosos y una solución yoduro-alcalina. [32]	Método Winkler	$\frac{mL Na_2SO_3 * N * 16 * 1000}{mL muestra}$
pH (Anexo 2)	El pH en aguas naturales en su mayoría es ligeramente básico. Su cálculo se basa en la	pH-metro	Lectura de instrumento

PRUEBA REALIZADA	DESCRIPCIÓN	TÉCNICAS Y/O MÉTODOS DE CÁLCULO	FÓRMULA UTILIZADA
	diferencia de potencial experimentada en dos celdas electroquímicas (electrodos), una de membrana de vidrio y otra de calomel como referencia. [32]		
Salinidad (Anexo 2)	Contenido de sal en el agua calculado por medio de la conductividad de la misma, ya que, a mayor contenido de sales, mayor conductividad. [32]	Norma "ASTM D4458-85"	Calculado a partir del TDS
Sólidos disueltos (Anexo 2)	Cálculo de la cantidad de material disuelto en el agua que pasa a través de un filtro y perdura tras la evaporación y secado a peso constante y 180°C [32]	Técnica de gravimetría	Laboratorio IMA S.A.S.
Sólidos suspendidos totales (Anexo 2)	Cuantifica las partículas en suspensión presentes en una muestra de agua, definidas por su imposibilidad de ser separadas de la muestra de aguas usando un filtro. [32]	Técnica de gravimetría	Laboratorio IMA S.A.S.
Sulfatos (Anexo 2)	"Consiste en la determinación de los iones sulfatos mediante una valoración por retroceso en presencia de sulfato de bario y en medio alcohólico con la sal disódica de la EDTA" [37]	Método de Mohr	$\frac{mL BaCl_3 * N * 48 * 1000}{mL muestra}$

PRUEBA REALIZADA	DESCRIPCIÓN	TÉCNICAS Y/O MÉTODOS DE CÁLCULO	FÓRMULA UTILIZADA
Turbidez (Anexo 2)	Se mide a partir de la “reducción de la intensidad de la luz en su paso a través de una suspensión, a causa de las partículas presentes en ésta, y cuantifica la luz residual transmitida.” [32]	Turbidímetro	Lectura de instrumento

**Nota.** Esta tabla consigna las pruebas realizadas al agua tratada durante esta investigación, así como la normativa de donde fueron obtenidas como referencia.

Todos los resultados entregados por el laboratorio IMA S.A.S. durante esta fase se encuentran en el **anexo 3**.

Adicionalmente se compararon los resultados obtenidos con el fin de analizar la posibilidad de que estos se ajusten en los parámetros requeridos para un agua de inyección establecidos en el reglamento del Consejo De Conservación De Energía De Alberta [29], la tesis “Evaluación técnico-financiera del nuevo tratamiento del agua de inyección para el proyecto de Recobro secundario en el campo Moqueta” [30] y el decreto 1076 de 2015 [22] y consignados en la **tabla 5**.

**Tabla 5.***Parámetros fisicoquímicos requeridos para agua de reinyección*

Alcalinidad (mg/L)	< 75
Cloruros (ppm)	< 250
Conductividad (mS/m)	< 7
Contenido de Cobre (mg/L)	< 0.30
DBO (mg/L)	< 7
DQO (mg/L)	entre 10 y 50
Dureza (ppm)	entre 0 a 60
Oxígeno disuelto (ppm)	cercano a 20
pH	cercano a 7
Salinidad (%)	< 0.05
Sólidos disueltos (g/L)	< 1
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	< 2.49
Sulfatos (ppm)	< 250
Turbidez (JTU)	< 25

**Nota.** Estos parámetros fueron tomados de los reglamentos del Consejo De Conservación De Energía De Alberta [29], la tesis “Evaluación técnico-financiera del nuevo tratamiento del agua de inyección para el proyecto de Recobro secundario en el campo Moqueta” [30] y el decreto 1076 de 2015 [22].

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Durante este capítulo se presentan los resultados obtenidos en cada una de las fases dando cumplimiento a los objetivos específicos y por consiguiente al objetivo general teniendo como énfasis la comparación de las eficiencias de remoción de cobre entre los métodos de tratamiento expuestos en la metodología.

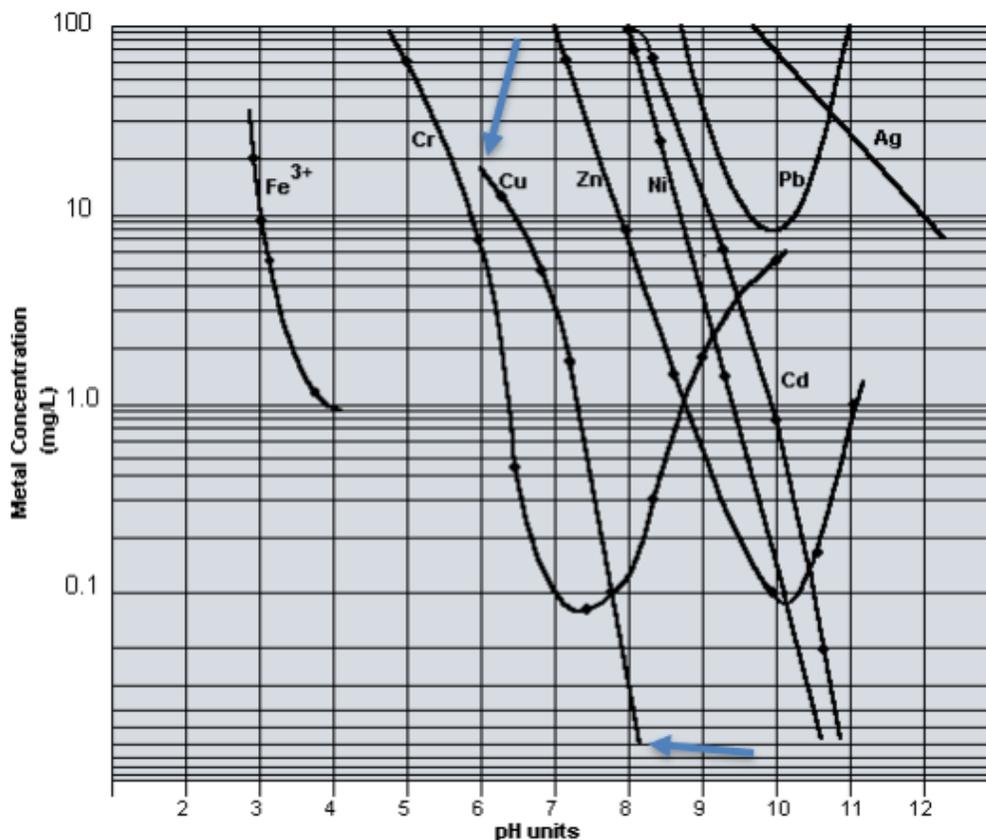
#### **3.1 Resultados fase I: Implementación del método convencional de precipitación alcalina en el tratamiento del agua de producción del campo “B” para la remoción de cobre**

Para esta investigación se realizó en primer lugar la caracterización fisicoquímica del agua de producción del campo “B” sin tratar.

Seguido a esto se prosiguió con el tratamiento de uso convencional que corresponde a precipitación alcalina tomando como referencia el grafico “solubilidades de hidróxidos metálicos en función del pH” mostrado en la **figura 15**.

**Figura 15.**

*Solubilidades de hidróxidos metálicos en función del pH*



**Nota.** Tomado de: “REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA 24 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA FIGURA 2.2 Solubilidades de hidróxidos metálicos en función de pH.” [En línea]. Disponible en: [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/leia/padilla\\_s\\_mf/capitulo2.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leia/padilla_s_mf/capitulo2.pdf). [Accedido: Nov. 06, 2020]

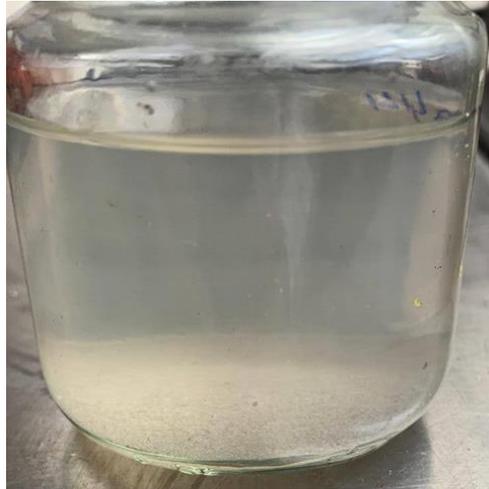
En donde se muestra un estudio de la concentración del hidróxido metálico presente a cada pH, por lo tanto, para el caso de remoción de cobre valores de pH entre 5.9 con 19 mg/L y 8.3 con 0.04 mg/L.

A una muestra de 200 mL de agua contaminada se le adicionó una lechada del 5% de hidróxido de calcio (CAL) con una concentración de 3 mg/L y se agito durante 1 minuto, lo cual subió el pH de 7.9 a 8.7.

Una vez se presenta el aumento del pH se dejó reposar la mezcla 10 minutos esperando que el metal pesado cobre se precipitara en forma de hidróxido de cobre. Ver **figura 16**.

**Figura 16.**

*Precipitación del Hidróxido de cobre*



**Nota.** Tomada en Laboratorio IMA SAS.

Después se realizó filtración durante 1 hora y al agua obtenida se le hizo su correspondiente caracterización fisicoquímica obteniendo los resultados del tratamiento reportados en la **tabla 6**.

**Tabla 6.***Caracterización al agua sin tratar y tratada con el método convencional*

PRUEBA REALIZADA	AGUA DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO "B"	
	SIN TRATAR	TRATADA POR PRECIPITACIÓN ALCALINA
Contenido de cobre (mg/L)	3.81	0.04
Alcalinidad total (mg/L)	793.8	25
Dureza total (ppm)	260	122
Cloruros (ppm)	260	800
Sulfatos (ppm)	360	2
Oxígeno disuelto (ppm)	1.6	3.1
pH	7.9	8.7
Conductividad (us)	6,090	1,433
DBO (mg/L)	73	41.9
DQO (mg/L)	147	99
Salinidad (%)	0.045	0.1445
Sólidos disueltos (mg/L)	4.5	803
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	4.5	5
Turbidez (JTU)	151.7	5.7

**Nota.** Resultados reportados por el laboratorio IMA S.A.S.

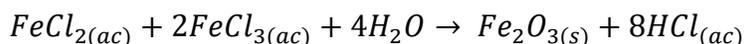
A partir de los resultados obtenidos se puede analizar que:

- Contenido de Cobre. El agua tratada por el método convencional demostró un contenido de cobre significativamente menor respecto al agua sin tratar, este se considera un resultado positivo ya que este metal pesado en grandes concentraciones acelera la corrosión afectando la tubería, también puede alcalinizar, degradar y alterar la formación a parte de existir una alta probabilidad de ocasionar sólidos, incrustaciones y precipitados en el pozo [38], [39].
- Alcalinidad Total. El agua tratada por el método convencional demostró una notoria reducción de la alcalinidad respecto al agua sin tratar, esto es positivo debido a que, al ser una medida con gran influencia en la tendencia corrosiva e incrustante del agua, un valor bajo indica menos probabilidad de presentar problemas de este tipo durante un proceso de inyección [40].
- Dureza Total. de acuerdo al resultado obtenido del agua tratada se considera como un agua medianamente dura, esto tiene un significado relativamente positivo, pues, entre mayor dureza del agua mayores riesgos de generar depósitos calcarios e incrustaciones en la tubería cuando se evapora, además de perjudicar las válvulas implicando una disminución de caudal debido al alto contenido de sales de magnesio y calcio [41].
- Cloruros. El tratamiento por el método convencional demostró un aumento en la concentración de cloruros, indicando un mayor riesgo a la integridad del pozo ya que una cantidad elevada de estos puede generar corrosión en las estructuras y tuberías metálicas [42].
- Sulfatos. En presencia simultánea de altas concentraciones de sulfato y de calcio se pueden generar incrustaciones de Sulfato de calcio difíciles de disolver. Por lo tanto, se deduce que el tratamiento por el método convencional demuestra buenos resultados ya que evidenció una disminución considerable respecto al agua sin tratar [43].
- Oxígeno Disuelto. es importante obtener un valor alto de este parámetro debido a que en niveles actúa como un catalizador de corrosión en cualquier tipo de tubería. Se observa que el tratamiento por el método convencional obtuvo un resultado relativamente positivo al verse aumentado respecto al agua sin tratar [44].

- pH. El tratamiento por el método convencional demostró un aumento en el pH >8.5; este resultado es poco conveniente ya que puede indicar un agua alcalina, lo que generaría problemas por dureza como la formación de sarro en tuberías y por tanto disminución del diámetro interno de las mismas [45].
- Conductividad. El tratamiento por el método convencional demostró una disminución en la capacidad del agua de conducir la corriente eléctrica. Esta medición se asocia con la concentración de sólidos disueltos por lo que también se reducen y esto lleva a un tratamiento más económico.
- DBO. Este valor es un indicador de materia orgánica por lo que un valor muy elevado significa la generación de un agua anóxica por lo cual el observar una reducción de este valor es beneficioso.
- DQO. Este es el valor neto de demanda de oxígeno y materia orgánica, un valor elevado también tiende a degradar el agua por lo cual es bueno que se presente una disminución de este parámetro.
- Salinidad. El agua tratada por el método convencional demostró contener mayor cantidad de cloruro de sodio que el agua sin tratar, esto quiere decir que tiene mayor probabilidad de generar corrosión en las tuberías durante el proceso de inyección.
- Sólidos Disueltos. El agua tratada por el método convencional alcanzó un aumento importante en la medición de este parámetro respecto al agua sin tratar. Esto indica mayor cantidad de minerales, metales, y/o sales disueltas en el agua lo que a gran escala puede representar mayores riesgos de obstrucción en las tuberías debido a la acción corrosiva de las mismas.
- Sólidos suspendidos totales. El aumento de este parámetro tras el tratamiento convencional es insignificante respecto al resultado del agua sin tratar, sin embargo, es importante aclarar que a mayor concentración de sólidos suspendidos totales mayor riesgo de presentarse obstrucciones en las tuberías de producción.
- Turbidez. Al tener una baja turbidez lo primero que se evidencia es un agua limpia, además ayuda a tener el oxígeno presente y la absorción de calor es menor, por lo tanto, se observa que el tratamiento por el método convencional beneficia esta medición.

### 3.2 Resultados fase II: Síntesis y caracterización de las nanopartículas de magnetita

La síntesis de las nanopartículas de magnetita se llevó a cabo mediante el método de coprecipitación donde se obtuvieron 3 muestras todas a partir de 25 mL de ácido clorhídrico al 0.2 %, 25 mL de amoníaco, 25 mL de agua desionizada y cada una con una concentración distinta de cloruro ferroso y de cloruro férrico, respetando la relación estequiométrica presente en la ecuación química.



Para la síntesis de la primera muestra de nanopartículas se tomaron 4g de cloruro ferroso y 8g de cloruro férrico acatando la metodología planteada y una vez finalizada se observa el resultado en la **figura 17**.

**Figura 17.**

*Resultado nanopartículas de magnetita muestra 1*



**Nota.** Nanopartículas 1.

Para la obtención de la segunda muestra de nanopartículas se emplearon 8g de cloruro ferroso y 16g de cloruro férrico y siguiendo la metodología descrita anteriormente, se observa el resultado en la **figura 18**.

**Figura 18.**

*Resultado nanopartículas de magnetita muestra 2*



**Nota.** Nanopartículas 2.

Para conseguir la tercera muestra de nanopartículas se utilizaron 12g de cloruro ferroso y 24g de cloruro férrico y siguiendo el mismo procedimiento anterior se observa el resultado de la **figura 19**.

**Figura 19.**

*Resultado nanopartículas de magnetita muestra 3*

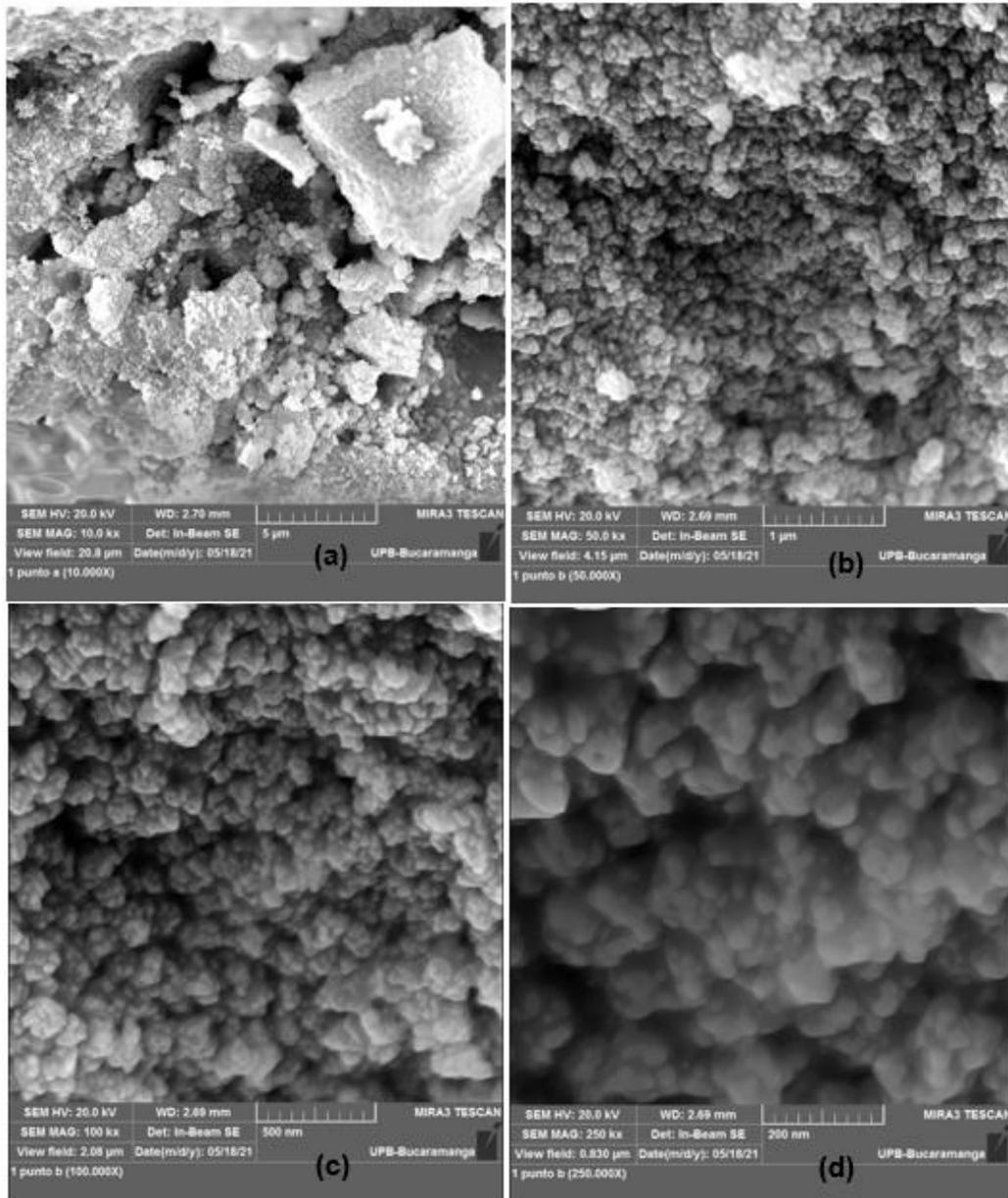


**Nota.** Nanopartículas 3.

Una vez obtenidas las 3 muestras de nanopartículas de magnetita se prosiguió con la caracterización de las mismas. Los resultados de las nanopartículas 1 se evidencian en las micrografías que componen la **figura 20**.

**Figura 20.**

*Caracterización SEM Nanopartículas 1*

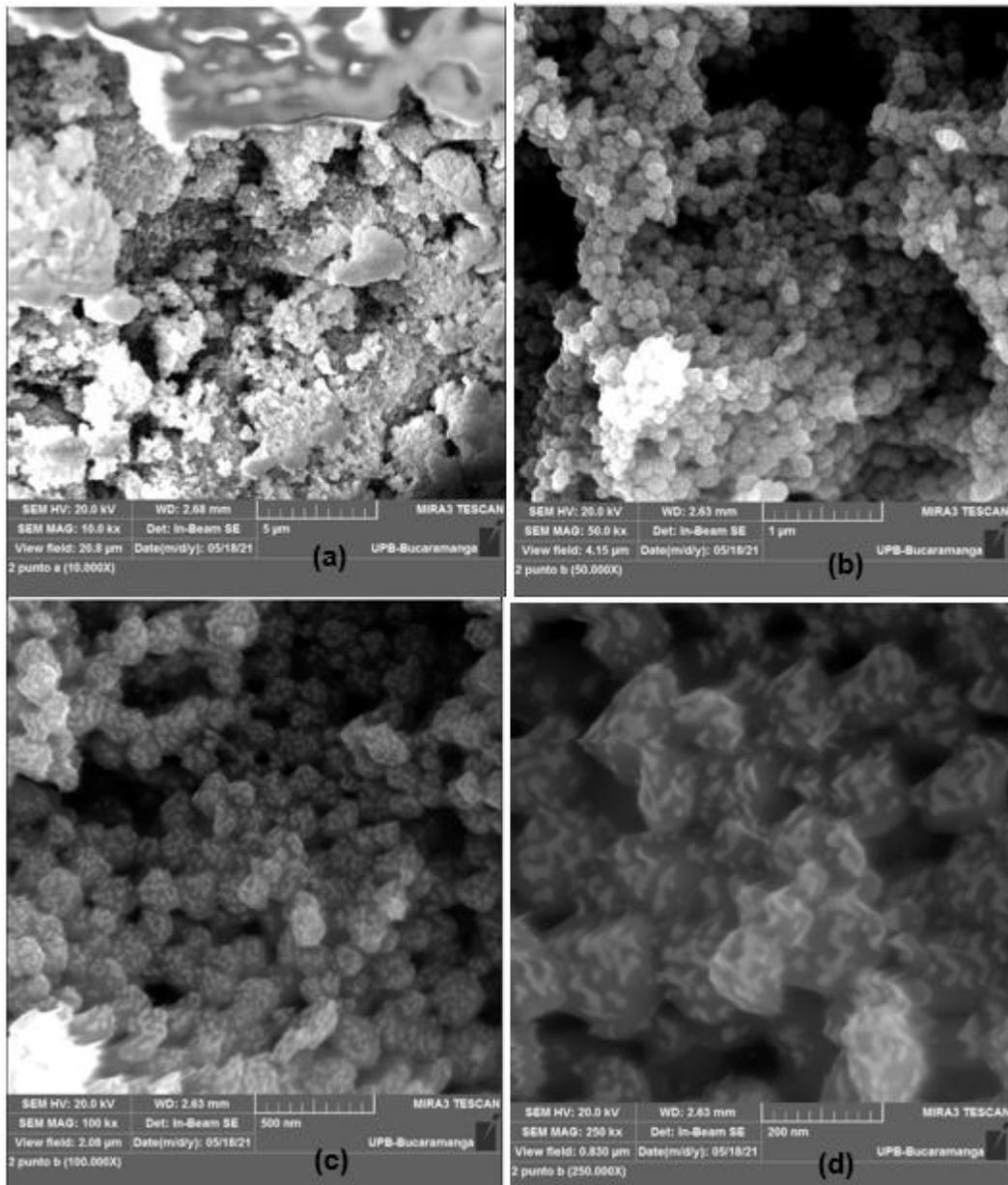


**Nota.** La figura representa las micrografías SEM de la muestra de Nanopartículas 1 con magnificación de 10000X (a), 50000X (b), 100000X (c) y 250000X (d).

Los resultados de las nanopartículas 2 se evidencian en las micrografías que componen la **figura 21**.

**Figura 21.**

*Caracterización SEM Nanopartículas 2*

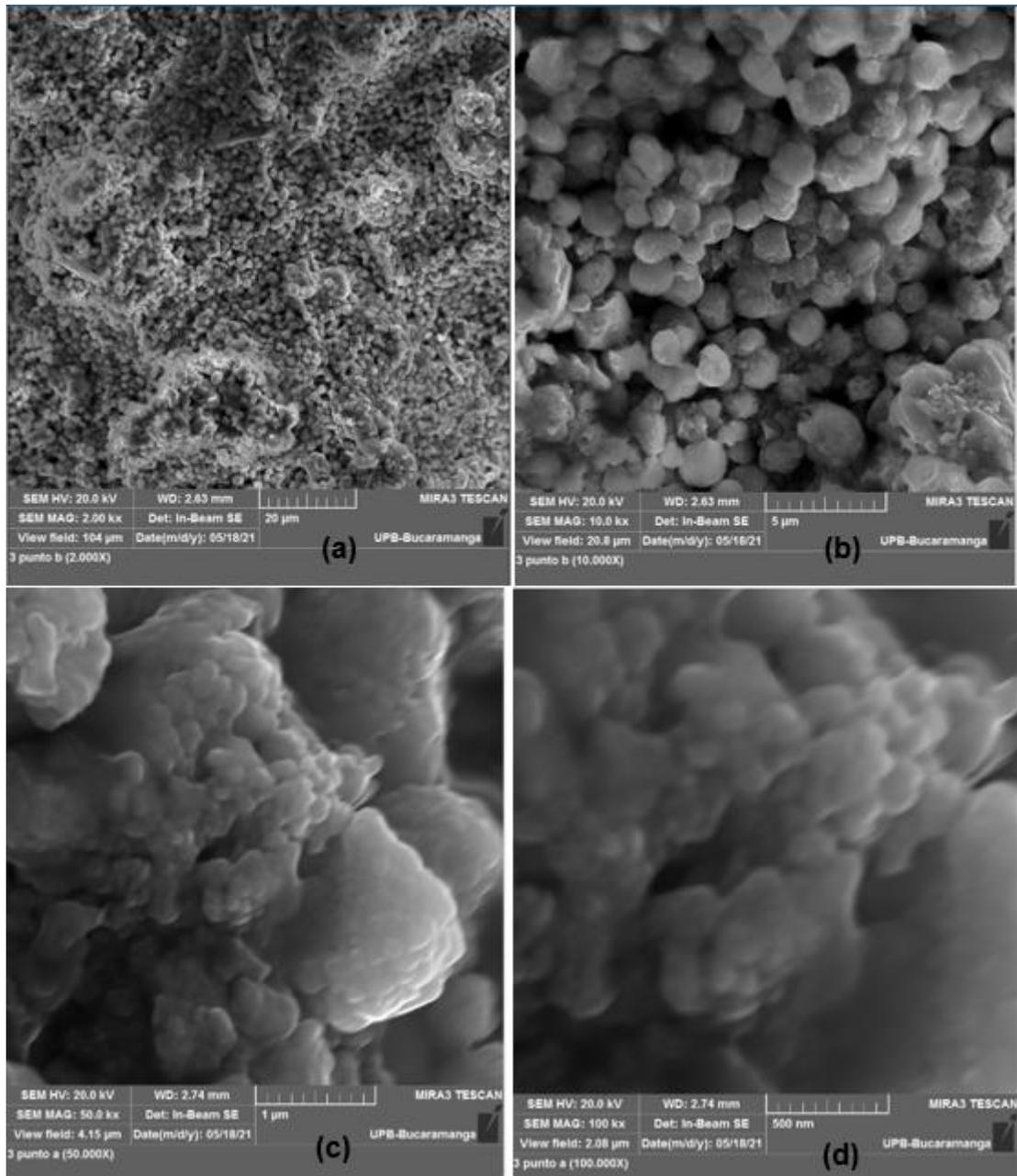


**Nota.** La figura representa las micrografías SEM de la muestra de Nanopartículas 2 con magnificación de 10000X (a), 50000X (b), 100000X (c) y 250000X (d).

Los resultados de las nanopartículas 3 se evidencian en las micrografías que componen la **figura 22**.

**Figura 22.**

*Caracterización SEM Nanopartículas 3*

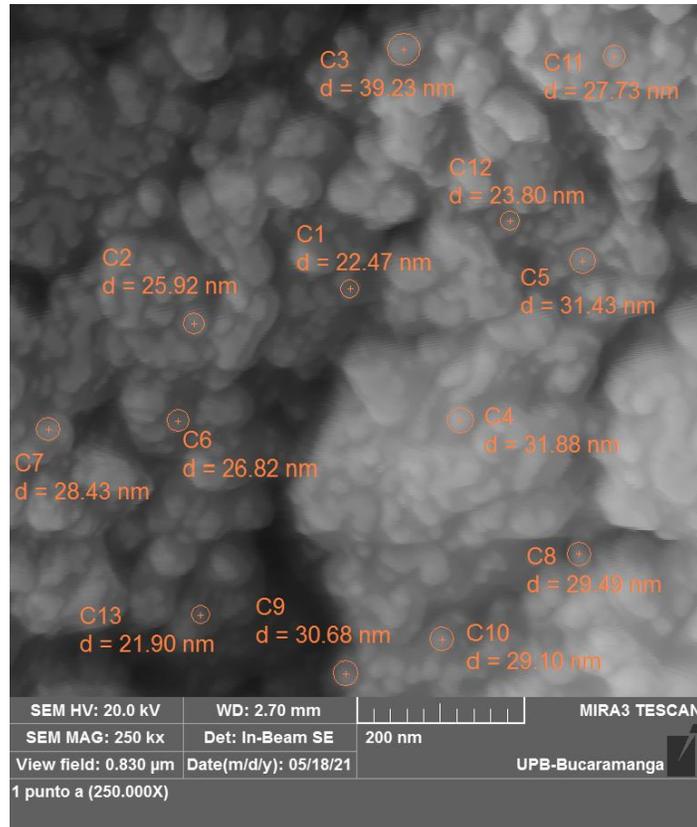


**Nota.** La figura representa las micrografías SEM de la muestra de Nanopartículas 2 con magnificación de 10000X (a), 50000X (b), 100000X (c) y 250000X (d).

A partir de las micrografías obtenidas por el instrumento SEM se pudo medir los tamaños alcanzados de las muestras de nanopartículas. Los tamaños conseguidos de las nanopartículas 1 se evidencian en la **figura 23**.

**Figura 23.**

*Medición del tamaño de nanopartículas 1*



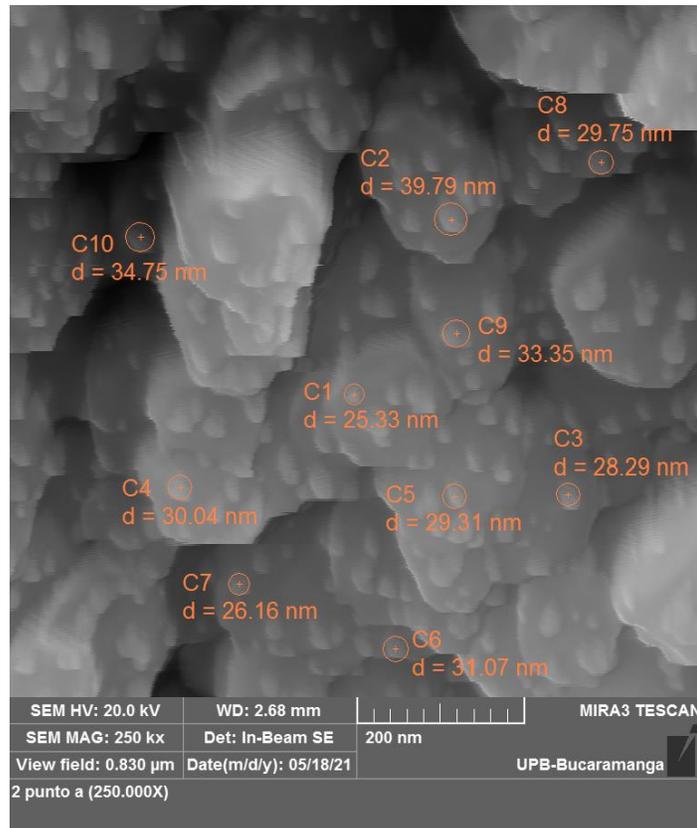
**Nota.** Esta figura representa la micrografía obtenida de la nanopartícula 1 por el equipo SEM reportado por el laboratorio de la UPB a magnificación de 250.000X.

De las nanopartículas 1 fue posible capturar 13 mediciones de tamaños presentes. Se obtuvieron valores mínimos de 21,90 nm y máximos de 31,88 nm, con un promedio calculado de 27,61 nm.

Los tamaños conseguidos de las nanopartículas 2 se evidencian en la **figura 24**.

**Figura 24.**

*Medición del tamaño de nanopartículas 2*



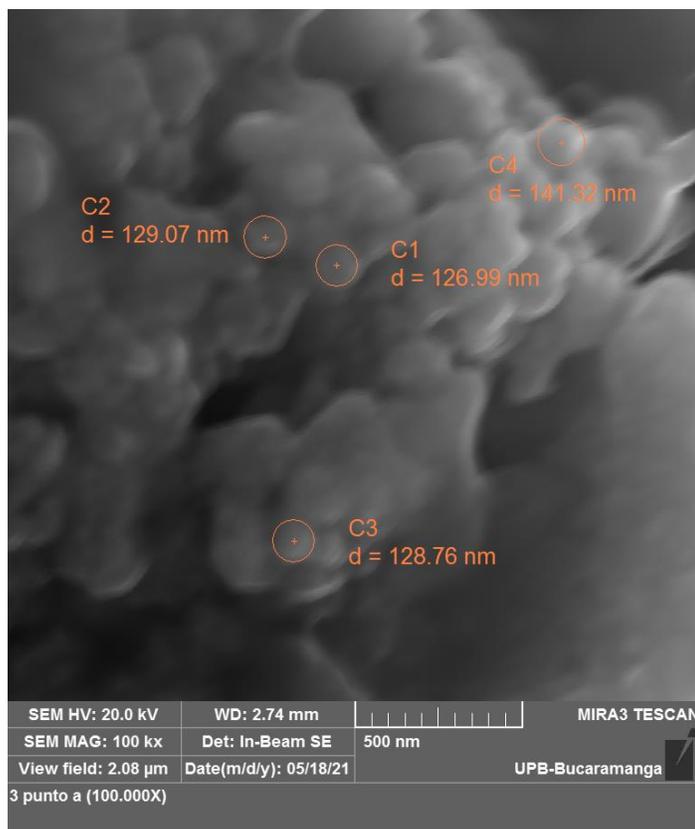
**Nota.** Esta figura representa la micrografía obtenida de la nanopartícula 2 por el equipo SEM reportado por el laboratorio de la UPB a magnificación de 250.000X.

De las nanopartículas 2 fue posible capturar 10 mediciones de tamaños presentes. Se obtuvieron valores mínimos de 25,33 nm y máximos de 39,79 nm, con un promedio calculado de 30,78 nm.

Los tamaños conseguidos de las nanopartículas 3 se evidencian en la **figura 25.**

**Figura 25.**

*Medición del tamaño de nanopartículas 3*



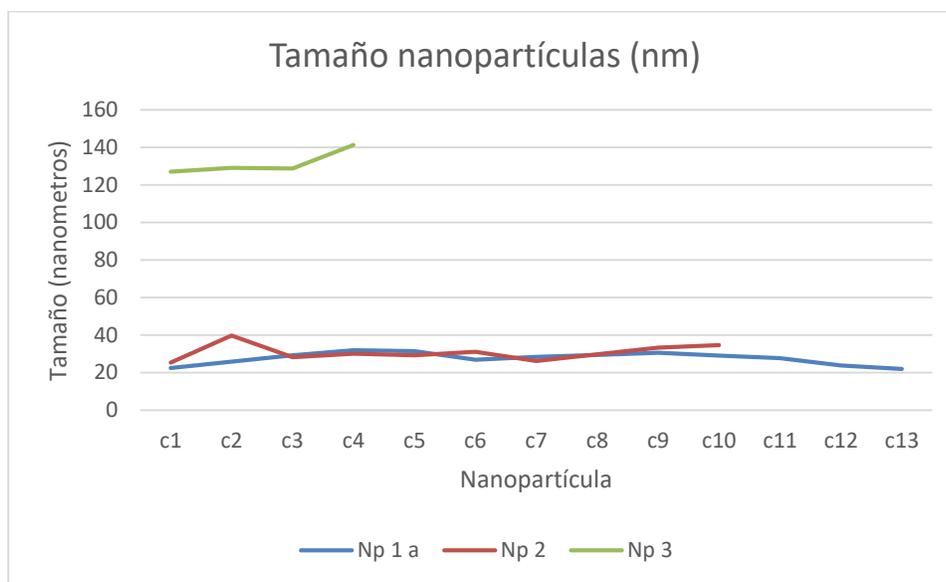
**Nota.** Esta figura representa la micrografía obtenida de la nanopartícula 3 por el equipo SEM reportado por el laboratorio de la UPB a magnificación de 100.000X.

De las nanopartículas 3 fue posible capturar 4 mediciones de tamaños presentes, debido a que se presenta la formación de aglomeraciones dificultando el reconocimiento de las nanopartículas. Se obtuvieron valores mínimos de 126,99 nm y máximos de 141,32 nm, con un promedio calculado de 131,53 nm.

La variación de tamaños de nanopartículas se representa en la **figura 26**.

**Figura 26.**

*Variación del tamaño nanopartículas*



**Nota.** La figura es un gráfico de los tamaños captados para cada muestra de nanopartículas.

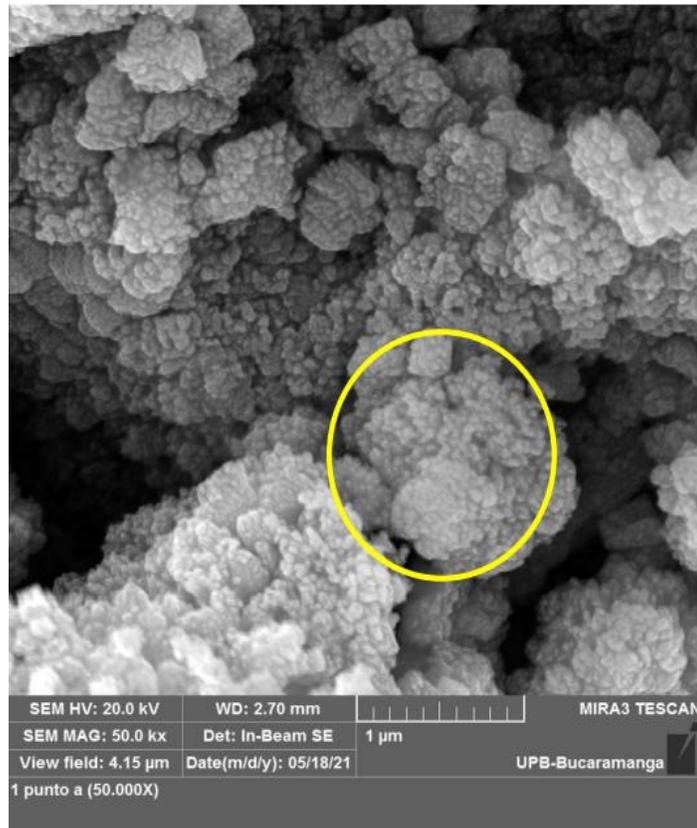
De acuerdo a los resultados obtenidos por el microscopio electrónico de barrido SEM se evidencia que las muestras 1 y 2 cumplen con el tamaño característico de las nanopartículas, a diferencia de la muestra 3, que por tener tamaños superiores a 100nm no se considera un nanomaterial.

Teniendo en cuenta que la concentración utilizada para las nanopartículas 3 es tres veces mayor a la empleada para las nanopartículas 1, se afirma que el tamaño de nanopartículas aumenta en función de la masa de reactivos utilizados, por esta razón, las nanopartículas 3 alcanzaron mayores mediciones reflejadas en su correspondiente micrografía.

Para la segunda parte de la caracterización de las nanopartículas se determinó la composición química elemental (EDS) en cada una de las muestras. En el caso de las nanopartículas 1 se analizó la zona señalada en la **figura 27**.

**Figura 27.**

*Prueba EDS Nanopartículas 1*

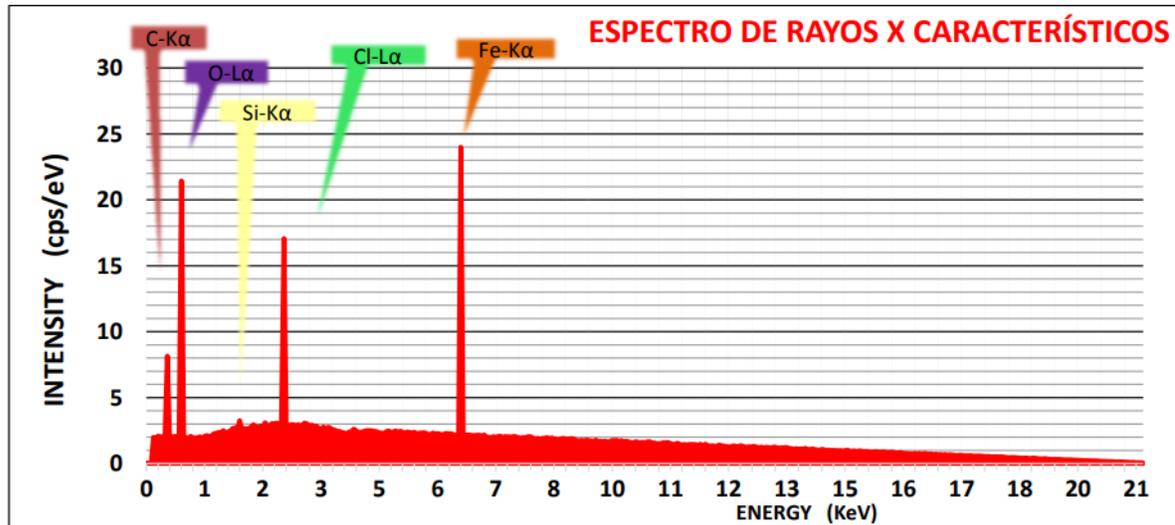


**Nota.** Zona seleccionada para la prueba EDS de las nanopartículas 1.

Una vez seleccionada la zona de la muestra, posterior al procedimiento, el equipo genera una lectura de la intensidad respecto a la energía medida de los átomos al reorganizarse, presentado en la **figura 28**.

**Figura 28.**

*Lectura EDS Nanopartículas 1*



**Nota.** Gráfica obtenida por el equipo SEM durante la prueba EDS de las nanopartículas 1.

A partir de esta lectura, el equipo genera la tabla de resultados mostrada en la **figura 29.**

**Figura 29.**

*Tabla de resultados EDS Nanopartículas 1*

Element	At. No.	Line S.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	Abs. Error [%] 1 sigma	Abs. Error [%] 2 sigma	Abs. Error [%] 3 sigma
Carbono	6	K-serie	12166	1,09	1,54	1,79	0,45	0,89	1,34
Oxígeno	8	K-serie	5695	24,17	26,86	40,20	2,69	5,37	8,06
Hierro	26	K-serie	448	55,71	63,31	52,83	7,60	15,19	22,79
Cloro	17	K-serie	1281,95	5,37	7,56	4,94	2,19	4,38	6,58
Silicio	14	K-serie	1793	0,53	0,73	0,24	0,20	0,41	0,61
				<b>86,87</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>			

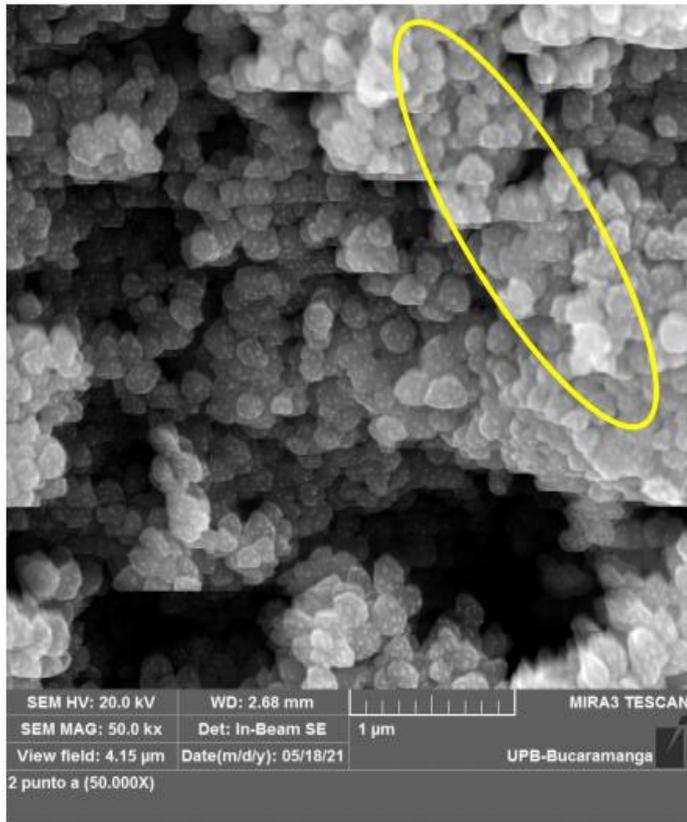
**Nota.** Composición química elemental presente en la muestra de nanopartículas 1.

De acuerdo a los resultados se analiza que las nanopartículas 1 se componen en un 63,31% de hierro (Fe), comprobando la presencia de magnetita.

En el caso de las nanopartículas 2 se analizó la zona señalada en la **figura 30.**

**Figura 30.**

*Prueba EDS Nanopartículas 2*

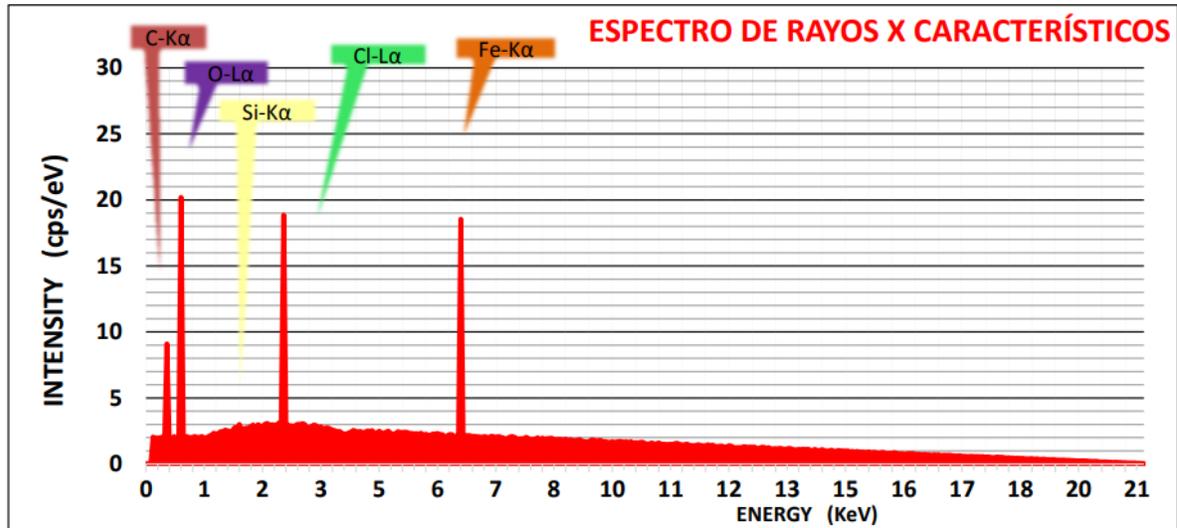


**Nota.** Zona seleccionada para la prueba EDS de las nanopartículas 2.

Una vez seleccionada la zona de la muestra, posterior al procedimiento, el equipo genera una lectura de la intensidad respecto a la energía medida de los átomos al reorganizarse, presentado en la **figura 31**.

**Figura 31.**

*Lectura EDS Nanopartículas 2*



**Nota.** Gráfica obtenida por el equipo SEM durante la prueba EDS de las nanopartículas 2.

A partir de esta lectura, el equipo genera la tabla de resultados mostrada en la **figura 32**.

**Figura 32.**

*Tabla de resultados EDS Nanopartículas 2*

Element	At. No.	Line S.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	Abs. Error [%] 1 sigma	Abs. Error [%] 2 sigma	Abs. Error [%] 3 sigma
Carbono	6	K-serie	10469	1,85	2,40	4,45	0,55	1,11	1,66
Oxígeno	8	K-serie	6400	28,83	32,03	41,26	3,20	6,41	9,61
Hierro	26	K-serie	508	47,85	59,07	45,84	11,22	22,45	33,67
Cloro	17	K-serie	1125,52	3,35	4,79	5,46	1,44	2,87	4,31
Silicio	14	K-serie	1908	1,50	1,71	2,99	0,20	0,41	0,61
				<b>83,38</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>			

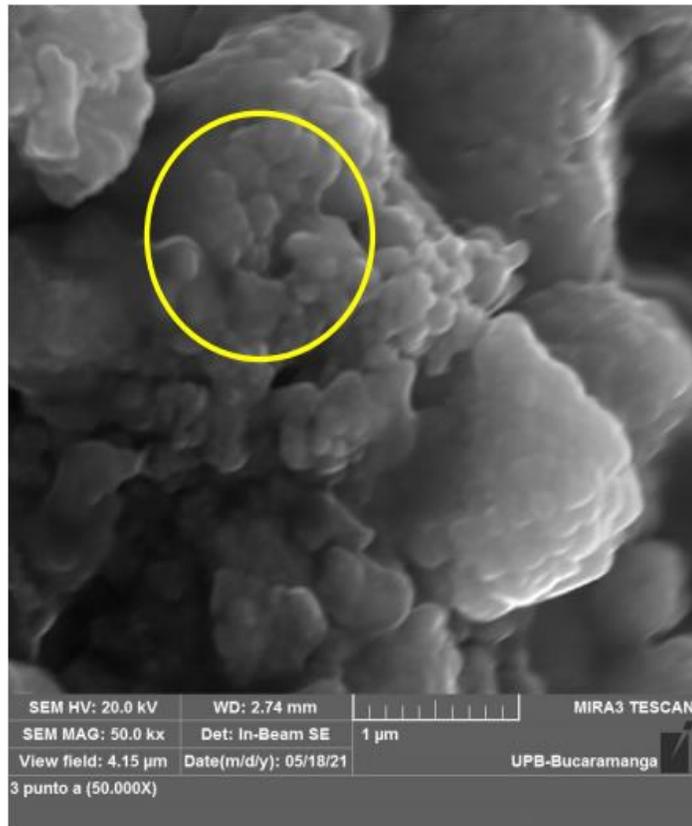
**Nota.** Composición química elemental presente en la muestra de nanopartículas 2.

De acuerdo a los resultados se analiza que las nanopartículas 2 se componen en un 59,07% de hierro (Fe), comprobando la presencia de magnetita.

En el caso de las nanopartículas 3 se analizó la zona señalada en la **figura 33**.

**Figura 33.**

*Prueba EDS Nanopartículas 3*

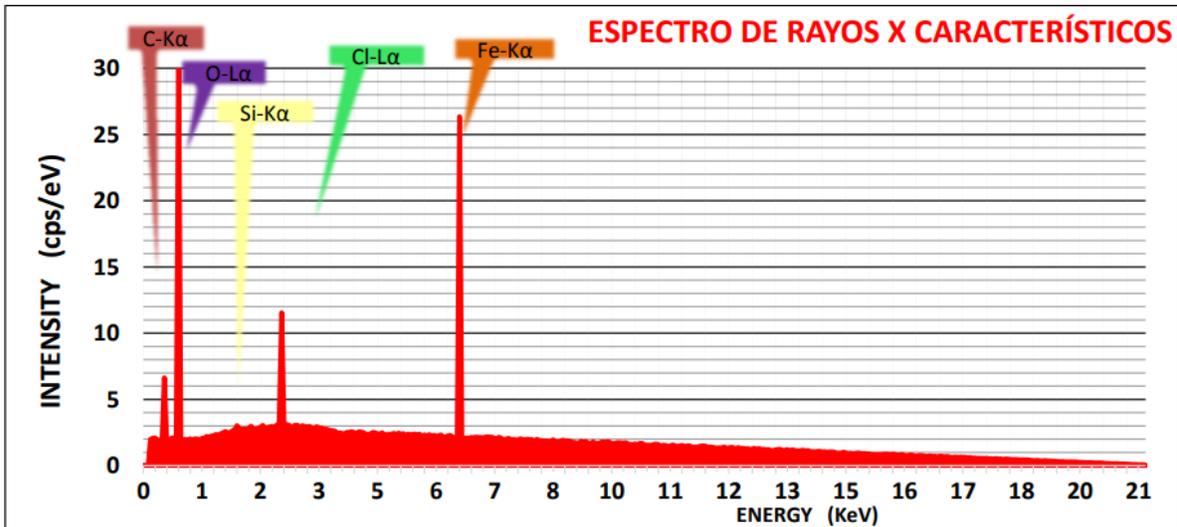


**Nota.** Zona seleccionada para la prueba EDS de las nanopartículas 3.

Una vez seleccionada la zona de la muestra, posterior al procedimiento, el equipo genera una lectura de la intensidad respecto a la energía medida de los átomos al reorganizarse, presentado en la **figura 34**.

**Figura 34.**

*Lectura EDS Nanopartículas 3*



**Nota.** Gráfica obtenida por el equipo SEM durante la prueba EDS de las nanopartículas 3.

A partir de esta lectura, el equipo genera la tabla de resultados mostrada en la **figura 34.**

**Figura 35.**

*Tabla de resultados EDS Nanopartículas 3*

Element	At. No.	Line S.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	Abs. Error [%] 1 sigma	Abs. Error [%] 2 sigma	Abs. Error [%] 3 sigma
Carbono	6	K-serie	12058	2,73	3,85	6,55	1,12	2,23	3,35
Oxígeno	8	K-serie	6495	29,05	33,01	49,57	3,96	7,92	11,88
Hierro	26	K-serie	506	41,08	52,67	34,10	11,59	23,17	34,76
Cloro	17	K-serie	1281,95	5,54	7,49	6,82	1,95	3,89	5,84
Silicio	14	K-serie	1868	2,30	2,99	2,96	0,69	1,37	2,06
				<b>80,70</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>			

**Nota.** Composición química elemental presente en la muestra de nanopartículas 3.

De acuerdo a los resultados se analiza que las nanopartículas 3 se componen en un 52,67% de hierro (Fe), comprobando la presencia de magnetita.

Partiendo de los resultados obtenidos tras la caracterización de las nanopartículas, se decidió escoger la muestra de nanopartículas 1 para la continuación del desarrollo del actual proyecto gracias a que demostró menores tamaños y mayor contenido de hierro.

### 3.3 Resultados fase III: Escenarios para la realización del test de jarras con las nanopartículas de magnetita

Una vez obtenidas las nanopartículas de magnetita, se procedió a realizar el test de jarras para el cual se estimó la cantidad de nanopartículas que se añadiría a cada una de estas, ver **tabla 7**. Esto con el fin de conocer el efecto en la remoción del cobre al variar la concentración de las mismas.

**Tabla 7.**

*Procedimiento test de jarras*

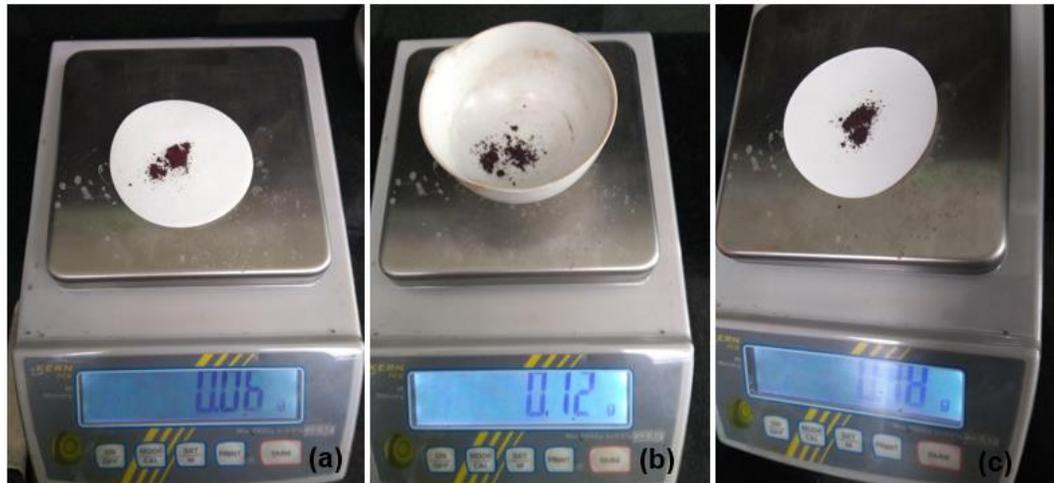
JARRA	MUESTRA DE AGUA DE PRODUCCIÓN	NANOPARTICULAS DE MAGNETITA	AGITACIÓN
JARRA 1	200 mL	0,06 g	Agitación inicial de 100 RPM (Revoluciones por minuto) durante un minuto y se continuó con una agitación de 20 RPM durante 20 minutos
JARRA 2		0,12 g	
JARRA 3		0,18 g	

**Nota.** Durante el proceso de agitación cada jarra estuvo expuesta a imanes en su base exterior.

Siguiendo la metodología descrita anteriormente se inició pesando las cantidades exactas del nanomaterial para cada Jarra. Ver **figura 36 (a, b y c respectivamente)**.

**Figura 36.**

*Nanopartículas añadidas a cada Jarra*



**Nota.** Nanomaterial añadido a Jarra 1, Jarra 2 y Jarra 3 respectivamente.

Una vez pesado el nanomaterial se agregó a cada una de las Jarras. Ver **figura 37.**

**Figura 37.**

*Nanopartículas añadidas*



**Nota.** La figura muestra la Jarra 1 una vez adicionadas las nanopartículas de magnetita.

A continuación, se expuso cada jarra a una agitación de 100 RPM durante un minuto. Ver **figura 38**.

**Figura 38.**

*Agitación a 100 RPM*

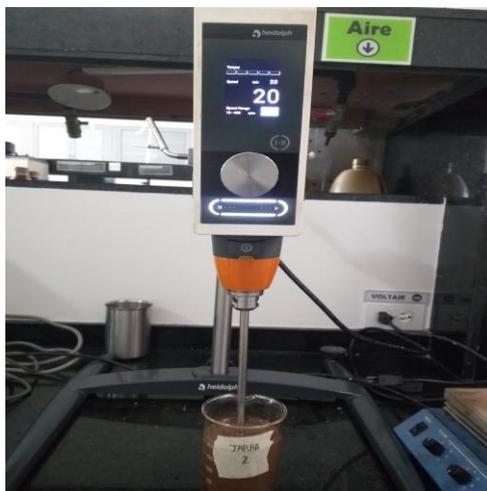


**Nota.** La figura representa la agitación a 100RPM para cada una de las jarras.

Una vez pasado un minuto se disminuyó la velocidad de agitación a 20 RPM durante de 20 minutos. Ver **figura 39**.

### Figura 39.

*Agitación a 20 RPM*

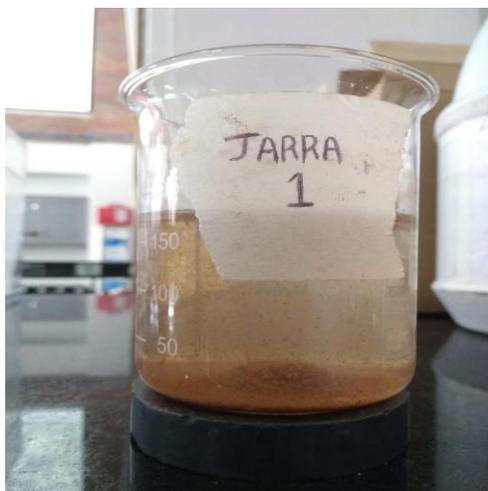


**Nota.** Proceso de agitación a 20RPM para cada jarra.

Al finalizar la agitación se pueden observar las nanopartículas en suspensión en las jarras. Ver **figura 40**.

### Figura 40.

*Jarra 1 al finalizar agitación*

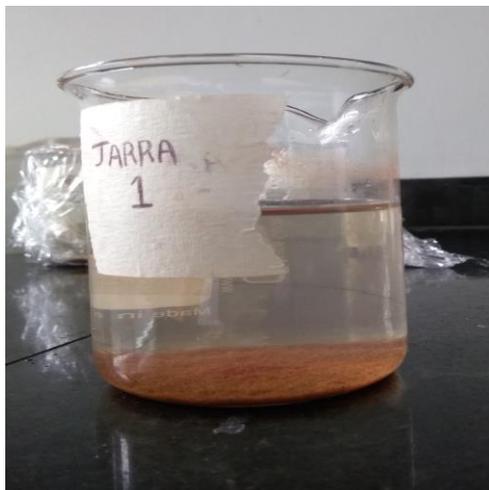


**Nota.** Agua de muestra tras el proceso de agitación en cada jarra.

Se dejó reposar cada jarra durante aproximadamente 10 horas para permitir un mayor asentamiento de las nanopartículas en el fondo del recipiente. Ver **figura 41**.

**Figura 41.**

*Jarra 1 tras varias horas de precipitación*



**Nota.** La figura representa el estado del agua de muestra tras varias horas de reposo en cada jarra.

En este punto se pudo observar una gran diferencia entre las muestras de agua una vez tratada con las nanopartículas de magnetita respecto al agua originalmente contaminada. Se aprecia el agua con aspecto más cristalino.

Se realizó una adecuada filtración a cada muestra tratada, removiendo las nanopartículas y sólidos suspendidos presentes para así continuar con la fase IV. Ver **figura 42**.

**Figura 42.**

*Test de jarras final*



**Nota.** La figura muestra las Jarras 1, 2 y 3 tratadas con nanopartículas de magnetita después de filtración.

### **3.4 Resultados fase IV: Comparación de las eficiencias en la remoción de cobre en el tratamiento de aguas de producción con fines de reinyección**

El contenido de cobre existente en las muestras de agua de producción tratada con nanopartículas de magnetita fue determinado por medio del espectrofotómetro HACH DR 2800 con su respectivo reactivo. En la **tabla 8** se exponen los resultados obtenidos.

**Tabla 8.**

*Resultados del contenido de cobre en las 3 muestras de agua tratada con nanopartículas de magnetita*

LECTURA	JARRA 1	JARRA 2	JARRA 3
Muestra con reactivo	0,33 mg/L	0,30 mg/L	0,29 mg/L
Blanco	0,25 mg/L	0,24 mg/L	0,24 mg/L
Contenido de cobre final	0,08 mg/L	0,06 mg/L	0,05 mg/L

**Nota.** El contenido de cobre final representa la diferencia entre la lectura de la Muestra con reactivo y la del Blanco en mg de cobre por L de agua de producción.

Para la comparación de los tratamientos y la caracterización del agua se escogió la **Jarra 3**, la cual reflejó menores lecturas de contenido de cobre como se muestra en la **figura 43** y en la **figura 44**.

**Figura 43.**

*Lectura muestra con reactivo*



**Nota.** Lectura muestra escogida, Jarra 3.

#### Figura 44.

*Lectura blanco*



**Nota.** Lectura muestra escogida, Jarra 3.

La lectura de contenido de cobre de la Jarra 3 fue menor demostrando mayor eficiencia en la remoción del mismo.

A continuación, se evaluó la eficiencia alcanzada en el tratamiento con nanopartículas de magnetita y se comparó con la obtenida por el método convencional de precipitación alcalina, los resultados se muestran en la **tabla 9**.

**Tabla 9.**

*Comparación de la eficiencia de remoción de cobre entre el agua tratada*

AGUA DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO "B"	CONTENIDO DE COBRE FINAL (mg/L)	EFICIENCIA EN REMOCIÓN DE COBRE
Sin tratar	3.81	-----
Tratada por método de precipitación alcalina	0.04	98.95%
Tratada con nanopartículas de magnetita	0.05	98.68%

**Nota.** La tabla expresa los resultados finales en la remoción de cobre en cada tratamiento realizado y su eficiencia correspondiente.

De acuerdo a los resultados obtenidos es correcto afirmar que el método que presentó mayor eficiencia en la remoción de cobre fue el convencional por precipitación alcalina, sin embargo, el tratamiento con nanopartículas de magnetita evidenció un resultado representativo al obtener un rendimiento superior al 98%.

Es fundamental mencionar la importancia de remover el cobre presente en el agua de producción debido a que el cobre al ser un metal pesado no se degrada en el medio ambiente por lo tanto con su extracción se evitan daños en el ecosistema. En la parte de reinyección se impide la aceleración de la corrosión y por consiguiente daños en la tubería, la degradación, alcalinización y alteración de la formación previniendo la generación de sólidos, incrustaciones y precipitados que forman obstrucciones en el pozo y finalmente la disminución de la producción [39], [40].

Al haber alcanzado un contenido final de cobre de 0.05mg/L, concentración menor a 0.30mg/L, siendo este último el contenido de cobre máximo permisible en un agua de reinyección según "DIGESA" [23], y con eficiencia de remoción de cobre del 98.65% con el tratamiento de nanopartículas de magnetita; se comprueba la validez de este proyecto respecto a la remoción de este metal pesado.

En orden de determinar la mejor opción de tratamiento se realizó una estimación y análisis de costos de los dos tratamientos implementados.

Para el tratamiento con nanopartículas de magnetita se calcularon los gastos de la síntesis de 2g de las nanopartículas 1 en la **tabla 10**, teniendo en cuenta que estas fueron las nanopartículas de mejor tamaño.

**Tabla 10.**

*Costos tratamiento con nanopartículas de magnetita*

FACTOR	COSTOS
Reactivos	\$1.500
Laboratorio	\$100.000
Acompañamiento Ingeniero	\$100.000
Total	\$201.500

**Nota.** Esta estimación corresponde a la síntesis de 2g de nanopartículas.

Por otra parte, para el tratamiento de 200mL de agua de producción por el método convencional de precipitación alcalina se calcularon los gastos en la **tabla 11**.

**Tabla 11.**

*Costos tratamiento convencional*

FACTOR	COSTOS
Reactivos	\$100
Laboratorio	\$8.500
Acompañamiento Ingeniero	\$6.000
Total	\$14.600

**Nota.** Esta estimación corresponde al tratamiento de 200mL de agua.

Para realizar una comparación de los costos entre ambos tratamientos a nivel de laboratorio, se calculó el valor relativo para el tratamiento de 200mL de agua a partir de cada método de tratamiento como se explica a continuación:

➤ En el tratamiento con nanopartículas de magnetita, en donde se requieren 0,18 g de este nanomaterial por cada 200mL de agua (teniendo en cuenta la concentración de la jarra seleccionada), en base a que la síntesis de 2g de nanopartículas costó \$201.500, el gasto aproximado para tratar 200mL a nivel laboratorio se estima en \$18.135 así:

$$\text{Costo de la síntesis de nanopartículas requeridas} = \frac{0,18g}{2g} * \$201.500 = \$18.135$$

➤ Por su parte, en el tratamiento convencional, se calculó un costo de \$14.600 para tratar 200mL de agua.

A partir del análisis de costos se puede concluir que el tratamiento convencional por precipitación alcalina representa una mejor opción económica a nivel de laboratorio. Sin embargo, estos costos varían al tratar volúmenes industriales de agua.

Cabe resaltar que dentro de los beneficios del método de tratamiento con nanopartículas de magnetita se destacan el prescindir del uso de bases o ácidos evitando alteraciones significativas en el pH, y así mismo, representa un procedimiento de fácil elaboración y ejecución. Adicionalmente, al requerirse pocas concentraciones del nanomaterial, a gran escala sus costos de producción se verán considerablemente reducidos.

Con el propósito de analizar los cambios fisicoquímicos presentados en el agua de producción del campo “B” una vez tratada con ambos métodos se le realizaron las pruebas físicas y químicas.

Las pruebas llevadas a cabo en el laboratorio de crudos y aguas de la Fundación Universidad de América fueron:

➤ Alcalinidad Total. Las pruebas de alcalinidad al agua tratada con nanopartículas de magnetita y al agua sin tratar se realizaron a partir del método volumétrico en el laboratorio de la Universidad de América.

El procedimiento para la alcalinidad a la fenolftaleína se evidencia en la **figura 45**.

**Figura 45.**

*Prueba de Alcalinidad a la Fenolftaleína*



**Nota.** La figura muestra la prueba de Alcalinidad a fenolftaleína al agua tratada con nanopartículas de magnetita, durante (a) y al finalizar la prueba (b).

El procedimiento para la alcalinidad a naranja de metilo se evidencia en la **figura 46**.

**Figura 46.**

*Prueba de Alcalinidad a naranja de metilo*



**Nota.** Prueba de Alcalinidad a naranja de metilo al agua tratada con nanopartículas de magnetita, durante (a) y al finalizar la prueba (b).

El cálculo de la Alcalinidad total del agua sin tratar corresponde a:

$$\text{Alcalinidad total} = \frac{(1\text{ml} + 15.2\text{ml}) * 0.02\text{N} * 49 * 1000}{20\text{ml}} = 793.8\text{mg/L}$$

El cálculo de la Alcalinidad total del agua tratada con nanopartículas de magnetita corresponde a:

$$\text{Alcalinidad total} = \frac{(0.2\text{ml} + 3.5\text{ml}) * 0.02\text{N} * 49 * 1000}{20\text{ml}} = 181.3\text{mg/L}$$

➤ Dureza Total. Las pruebas de dureza al agua tratada con nanopartículas de magnetita y al agua sin tratar se realizaron a partir del método título-métrico con EDTA evidenciadas en la **figura 47**.

### **Figura 47.**

#### *Prueba de Dureza Total*



**Nota.** La figura muestra la prueba de Dureza total al agua tratada con nanopartículas de magnetita, durante (a) y al finalizar la prueba (b).

El cálculo de la Dureza total del agua sin tratar corresponde a:

$$\text{Dureza total} = \frac{(1.3\text{ml}) * 0.02\text{N} * 50 * 1000}{5\text{ml}} = 260\text{ppm}$$

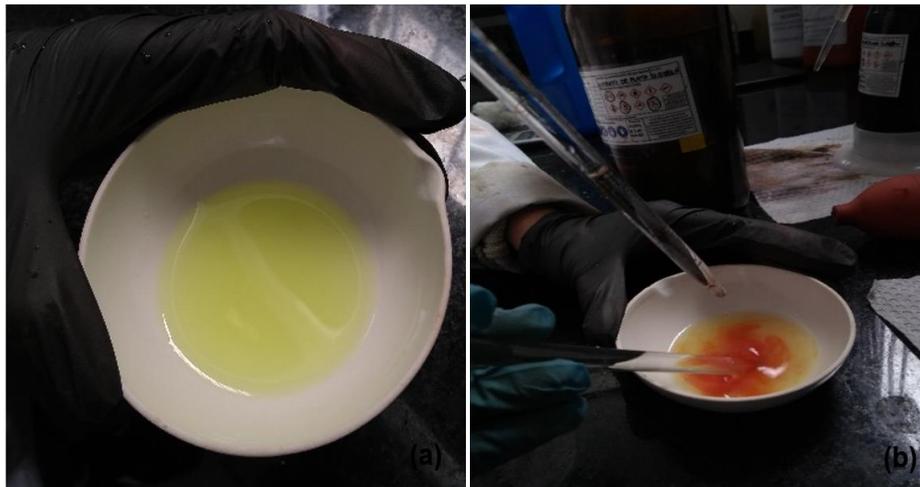
El cálculo de la Dureza total del agua tratada con nanopartículas de magnetita corresponde a:

$$\text{Dureza total} = \frac{(0.7\text{ml}) * 0.02\text{N} * 50 * 1000}{5\text{ml}} = 140\text{ppm}$$

➤ Cloruros. Las pruebas de cloruros al agua tratada con nanopartículas de magnetita y al agua sin tratar se realizaron a partir del método de Mohr evidenciadas en la **figura 48**.

**Figura 48.**

*Prueba de Cloruros*



**Nota.** La figura muestra la prueba de Cloruros al agua tratada con nanopartículas de magnetita, durante (a) y al finalizar la prueba (b).

El cálculo de Cloruros del agua sin tratar corresponde a:

$$\text{Cloruros} = \frac{(1.3\text{ml}) * 0.0282\text{N} * 35.45 * 1000}{5\text{ml}} = 260\text{ppm}$$

El cálculo de Cloruros del agua tratada con nanopartículas de magnetita corresponde a:

$$\text{Cloruros} = \frac{(1.6\text{ml}) * 0.0282\text{N} * 35.45 * 1000}{5\text{ml}} = 320\text{ppm}$$

➤ Sulfatos. Las pruebas de Sulfatos al agua tratada con nanopartículas de magnetita y al agua sin tratar se realizaron a partir del método de Mohr evidenciadas en la **figura 49**.

**Figura 49.**

*Prueba de Sulfatos*



**Nota.** La figura muestra la prueba de Sulfatos al agua tratada con nanopartículas de magnetita.

El cálculo de Sulfatos del agua sin tratar corresponde a:

$$\text{Sulfatos} = \frac{(6\text{ml}) * 0.025\text{N} * 48 * 1000}{20\text{ml}} = 360\text{ppm}$$

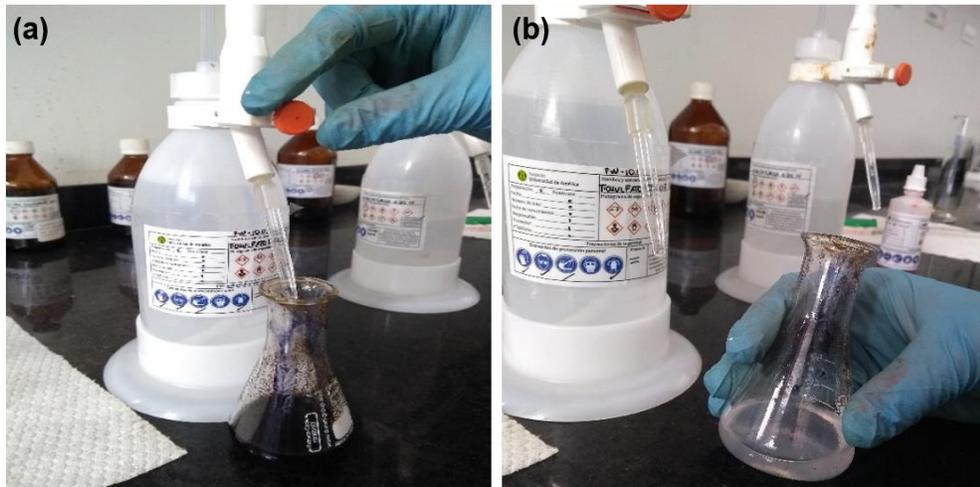
El cálculo de Sulfatos del agua tratada con nanopartículas de magnetita corresponde a:

$$\text{Sulfatos} = \frac{(2.3\text{ml}) * 0.025\text{N} * 48 * 1000}{20\text{ml}} = 138\text{ppm}$$

➤ Oxígeno Disuelto. Las pruebas de Sulfatos al agua tratada con nanopartículas de magnetita y al agua sin tratar se realizaron a partir del método de Winkler evidenciadas en la **figura 50**.

**Figura 50.**

*Prueba de Oxígeno Disuelto*



**Nota.** La figura muestra la prueba de Oxígeno Disuelto al agua tratada con nanopartículas de magnetita, durante (a) y al finalizar la prueba (b).

El cálculo de Oxígeno Disuelto del agua sin tratar corresponde a:

$$\text{Oxigeno disuelto} = \frac{(0.1) * 0.01N * 16 * 1000}{10ml} = 1.6ppm$$

El cálculo de Oxígeno Disuelto del agua tratada con nanopartículas de magnetita corresponde a:

$$\text{Oxigeno disuelto} = \frac{(0.2) * 0.01N * 16 * 1000}{10ml} = 3.2ppm$$

➤ pH y Conductividad. Las pruebas de pH y Conductividad al agua tratada con nanopartículas de magnetita y al agua sin tratar se realizaron a partir del instrumento phmetro y Conductímetro evidenciadas en la **figura 51**.

**Figura 51.**

*Lectura de Conductividad y pH*



**Nota.** La figura muestra la lectura de las pruebas de pH y Conductividad al agua tratada con nanopartículas de magnetita.

➤ Turbidez. La prueba de Turbidez al agua tratada con nanopartículas de magnetita y al agua sin tratar se realizaron a partir del instrumento turbidímetro evidenciadas en la **figura 52**.

**Figura 52.**

*Lectura de Turbidez*



**Nota.** La figura muestra la lectura de la prueba de Turbidez al agua tratada con nanopartículas de magnetita.

La caracterización del agua tratada con el método convencional de precipitación alcalina y de los parámetros restantes para el agua sin tratar y tratada con nanopartículas de magnetita (DBO, DQO, TDS y TSS) fue llevada a cabo y reportada por el laboratorio IMA S.A.S.

A partir de los resultados obtenidos se realizó una comparación entre ambos métodos de tratamiento respecto al agua sin tratar registrados en la **tabla 12**.

**Tabla 12.***Comparación fisicoquímica del agua de producción tratada y sin tratar*

PRUEBA REALIZADA	AGUA DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO "B"		
	SIN TRATAR	TRATADA POR PRECIPITACIÓN ALCALINA	TRATADA CON NANOPARTICULAS DE MAGNETITA
Alcalinidad total (mg/L)	793.8	25	181.3
Dureza total (ppm)	260	122	140
Cloruros (ppm)	260	800	320
Sulfatos (ppm)	360	2	138
Oxígeno disuelto (ppm)	1.6	3.1	3.2
pH	7.9	8.7	7.26
Conductividad (us)	6,090	1,433	6,313
Contenido de cobre (mg/L)	3.81	0.04	0.05
DBO (mg/L)	73	41.9	20
DQO (mg/L)	147	99	58
Salinidad (%)	0.045	0.1445	0.041
Sólidos disueltos (mg/L)	4.5	803	4.1
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	4.5	5	4.0
Turbidez (JTU)	151.7	5.7	15.15

**Nota.** Recopilación de los resultados obtenidos durante la caracterización del agua.

De acuerdo a la tabla anterior se puede analizar que:

- Contenido de cobre. El método de precipitación alcalina demostró una mayor remoción de cobre en el agua de producción respecto al tratamiento con nanopartículas de magnetita, sin embargo, sus valores son cercanos.
- Alcalinidad Total. En ambos métodos de tratamiento se obtuvo una notable disminución de este parámetro. Teniendo en cuenta que entre menor alcalinidad presente en el agua menores riesgos en la tubería, el más destacable en este aspecto es el tratamiento convencional.
- Dureza Total. En ambos tratamientos este parámetro disminuyó respecto al agua sin tratar alcanzando lecturas cercanas entre sí. Estos resultados son positivos gracias a que entre menor dureza menor es el riesgo de generar depósitos calcáreos e incrustaciones en la tubería cuando el agua se evapora.
- Cloruros. Este parámetro aumentó en los dos tratamientos respecto al agua sin tratar, demostrando así, un resultado negativo ya que lo ideal sería disminuir la concentración de cloruros. Sin embargo, el tratamiento por nanopartículas de magnetita demostró un aumento significativamente menor respecto al tratamiento convencional, convirtiéndolo en la mejor opción.
- Sulfatos. En este parámetro los resultados de ambos tratamientos se consideran positivos debido a que se redujo su concentración en relación al agua sin tratar. No obstante, el tratamiento convencional presentó una reducción considerablemente mayor en comparación al tratamiento con nanopartículas de magnetita.
- Oxígeno Disuelto. Los resultados en este parámetro son positivos debido a que ambos tratamientos aumentaron la presencia de oxígeno disuelto, disminuyendo las posibilidades de corrosión en la tubería.
- pH. Debido a que el tratamiento convencional altera considerablemente el pH y por el contrario el tratamiento con nanopartículas de magnetita lo mantuvo relativamente estable, de manera que evidencia un mejor resultado.
- Conductividad. Relacionando este parámetro para ambos tratamientos se considera que el tratamiento con nanopartículas de magnetita generó un aumento ligero respecto al agua sin tratar, mientras que el convencional sí presenta una disminución

significativa por lo cual en el tratamiento con nanopartículas se obtiene un resultado negativo.

- DBO. Aquí se observa una disminución positiva en ambos tratamientos, evidenciando que el tratamiento con nanopartículas de magnetita muestra una disminución del 60% siendo el mejor método para este parámetro.
- DQO. Teniendo en cuenta el parámetro anterior, aquí se evidencia que el mejor método es el tratamiento con nanopartículas, aunque en ambos tratamientos se observa una notable disminución.
- Salinidad. El agua tratada con nanopartículas de magnetita demostró una ligera disminución en el porcentaje de salinidad respecto al agua sin tratar, por lo que representa la mejor opción en este parámetro. Contrario al tratamiento convencional que generó un aumento notable en el porcentaje de salinidad del agua.
- Solidos Disueltos. El resultado del agua tratada con nanopartículas de magnetita fue positivo, pues al ser menor respecto al agua sin tratar se considera con menos probabilidades de generar obstrucciones en las tuberías, a diferencia del agua tratada con el método convencional, la cual demostró un incremento considerable en este parámetro.
- Solidos Suspendidos Totales. El tratamiento convencional reflejó un aumento en este parámetro respecto al agua sin tratar. Por el contrario, el agua tratada con nanopartículas de magnetita demostró una reducción en el mismo, aminorando así, los riesgos de obstrucción en tuberías.
- Turbidez. Ambos tratamientos reflejaron una disminución significativa en turbidez respecto al agua sin tratar, sin embargo, el agua tratada por el método convencional obtuvo el menor resultado, siendo así, el más positivo.

Adicionalmente se realizó un análisis entre los resultados de la caracterización fisicoquímica del agua tratada con nanopartículas de magnetita y los parámetros requeridos para un agua de reinyección, validando su capacidad de ser usada para este fin, como se muestra en la **tabla 13**.

**Tabla 13.**

*Evaluación de los resultados obtenidos del agua de producción tratada con nanopartículas respecto a los parámetros requeridos para agua de reinyección*

PRUEBA EVALUADA	PARÁMETRO REQUERIDO PARA AGUA DE REINYECCIÓN	AGUA DE PRODUCCIÓN TRATADA CON NANOPARTICULAS DE MAGNETITA	RESULTADO
Contenido de Cobre (mg/L)	< 0,30	0.05	CUMPLE
Alcalinidad Total (mg/L)	< 75	181.3	NO CUMPLE
Dureza Total (ppm)	entre 0 a 60	140	NO CUMPLE
Cloruros (ppm)	< 250	320	NO CUMPLE
Sulfatos (ppm)	< 250	138	CUMPLE
Oxígeno disuelto (ppm)	cercano a 20	3.2	NO CUMPLE
pH	cercano a 7	7.26	CUMPLE
Conductividad (mS/m)	< 7	6.313	CUMPLE
DBO (mg/L)	< 7	20	NO CUMPLE
DQO (mg/L)	entre 10 y 50	58	NO CUMPLE
Salinidad (%)	< 0.05	0.041	CUMPLE
Solidos disueltos (mg/L)	< 1	4.1	NO CUMPLE
Solidos suspendidos totales (mg/L)	< 2.49	4.0	NO CUMPLE
Turbidez (JTU)	< 25	15.15	CUMPLE

**Nota.** Evaluación del agua tratada con nanopartículas de magnetita para reinyección.

En términos de analizar la comparación anterior es posible afirmar que el agua tratada no cumple con los parámetros para agua de reinyección, ya que solo el 42% de los resultados se ajustan a estos. De manera que, si el objetivo real de esta agua tratada con nanopartículas de magnetita fuera ser usada como agua de reinyección sería necesario implementar procesos adicionales.

## 4. CONCLUSIONES

Se evaluó el contenido de cobre presente en el agua de producción tras ser tratada con las nanopartículas de magnetita en donde se obtuvo un resultado de 0,05mg/L demostrando una eficiencia de tratamiento del 98,68% respecto al agua sin tratar, comprobando así, que este se ajustó al máximo aceptado para un agua con fines de reinyección (0,30 mg/L) en función de la normativa estipulada por la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA), cumpliendo el objetivo general del actual proyecto.

Mediante el método convencional de precipitación alcalina se realizó el tratamiento del agua de producción del campo "B" para la remoción de cobre el cual redujo la concentración de 3.81 ppm a 0.04 ppm alcanzando un porcentaje de remoción de 98.95%.

Se realizó la síntesis de las nanopartículas de magnetita por el método de coprecipitación química de forma exitosa, validadas a partir de la caracterización por parte de la UPB con un equipo SEM en donde se reportaron mediciones menores a 100 nm, cumpliendo así, con las características de un nanomaterial.

A partir de los tamaños promedio registrados para las 3 muestras de nanopartículas sintetizadas, correspondientes a 27.61 nm, 30.78 nm y 131.53 nm respectivamente, es posible afirmar que, el tamaño de las nanopartículas de magnetita varía en relación a la concentración de las sales de cloruro férrico y ferroso empleadas.

Se definieron los escenarios para la realización del test de jarras, estableciendo 3 jarras en donde: la Jarra 1 con concentración de 0,3 g de nanopartículas de magnetita por cada litro de agua, alcanzó un contenido de cobre final de 0,08mg/L, la Jarra 2 con concentración de 0,6g/L redujo el contenido de cobre hasta 0,06mg/L y finalmente la Jarra 3 con concentración de 0,9g/L disminuyó el contenido de cobre a 0,05mg/L evidenciando un rendimiento del 98,68%, por lo tanto, fue seleccionada como la mejor opción, confirmando así, que a mayor cantidad de nanopartículas de magnetita añadidas, mayor es la eficiencia de remoción.

De acuerdo al análisis de costos a nivel de laboratorio, el tratamiento convencional por precipitación alcalina para la remoción de cobre es el más rentable, debido a que, según lo estimado, tratar 200mL de agua de producción mediante este método tendría un costo

total de \$14.600, sin embargo, no difiere mucho del costo del tratamiento con nanopartículas de magnetita calculado en \$18.135. Adicionalmente, es importante tener en cuenta que el método convencional presenta mayores costos de mantenimiento a gran escala, debido a su tendencia a generar lodos.

De acuerdo a la normativa estipulada por la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) y el decreto 1076 del 2015 en relación a los parámetros fisicoquímicos requeridos para un agua con fines de reinyección, se observó que el tratamiento con nanopartículas de magnetita modificó positivamente el 42% de los mismos, a diferencia del tratamiento convencional de precipitación alcalina que varió positivamente el 35,71% de los parámetros evaluados. En base a esto, se infiere que el tratamiento con nanopartículas de magnetita representa una mejor opción en cuanto a un tratamiento para aguas de reinyección.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] B. Bayley, M. Crabtree, J. Tyrie, J. Elphick, F. Kuchuk, C. Romano, "Control del agua," pp. 32–34, 2000 [En línea]. Disponible en: [https://connect.slb.com/~media/Files/resources/oilfield\\_review/spanish00/sum00/p32\\_53.pdf](https://connect.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish00/sum00/p32_53.pdf) [Accedido: Feb. 03, 2021]
- [2] S. L. Mesa, J. M. Orjuela, A. T. Ortega Ramírez, y J. A. Sandoval, "Revisión del panorama actual del manejo de agua de producción en la industria petrolera colombiana," *Gestión y Ambiente*, vol. 21, no. 1, pp. 87–98, Enero 2018, doi: 10.15446/ga.v21n1.69792.
- [3] Ecopetrol SA, "Reporte integrado de gestión sostenible 2018", Bogotá, 2018.
- [4] M.G. Villa Galindo, "Determinación de Cobre y Plomo en suelo, irrigado con agua residual tratada," Uaaan.mx, 2018 [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/45601>. [Accedido: Feb. 03, 2021]
- [5] C. D. Cabrera-Marutz, S. Velásquez-Alcalá y J. Vrhovac-Biljesko, "Enfermedades profesionales en la industria del cobre: extracción, manufactura y reciclaje," *Medicina y Seguridad del Trabajo*, vol. 60, no. 237, pp. 756–778, Dic. 2014, doi: 10.4321/s0465-546x2014000400010.
- [6] E. Gutierrez, F. Perez, E. Blanco y Y. Caldera, "Comportamiento de metales presentes en aguas de producción de petróleo durante el tratamiento anaerobio termofílico," ResearchGate, 2009 [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/yjnif> [Accedido: Feb. 03, 2021].
- [7] J. de Viana, "Disposición y tratamiento del agua producida," ARPEL, pp. 12-111, [En línea]. Disponible en: <http://www.ingenieroambiental.com/4000/GUIA%2001%20-%20OK.pdf> . [Accedido: Feb. 03, 2021]
- [8] P. De Tesis, E. De, R. En, L. De, "UNIVERSIDAD NACIONAL DE PIURA FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE PETRÓLEO," [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.unp.edu.pe/bitstream/handle/UNP/1056/MIN-VIL-ABA-17.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Accedido: May 15, 2021]
- [9] Ecopetrol S.A, "EL PETROLEO Y SU MUNDO," [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/yjo9z> [Accedido: May 15, 2021]
- [10] A. Felipe et al., "Revisión de las tecnologías para tratamiento de aguas de producción petrolera para su aprovechamiento en el riego de cultivos," 2021. [En línea]. Disponible en:

<https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8396/1/823171-2021-I-GA.pdf> [Accedido: May 15, 2021]

- [11] J. P. Villegas, N. Arcila, D. Ortega, C. A. Franco, and F. Cortés, “Remoción de hidrocarburos de aguas de producción de la industria petrolera utilizando nanointermedios compuestos por SiO<sub>2</sub> funcionalizados con nanopartículas magnéticas,” *DYNA*, vol. 84, no. 202, pp. 65–74, Jul. 2017, doi: 10.15446/dyna.v84n202.63686.
- [12] “Producción Soberanía Petrolera,” [En línea]. Disponible en: <http://www.pdvsa.com/images/pdf/cuadernos/Produccion.pdf> [Accedido: May 15, 2021]
- [13] M. Paris de Ferrer, “Inyección de agua y gas en yacimientos petrolíferos,” [En línea]. Disponible en: <http://www.ing.unp.edu.ar/asignaturas/reservorios/libro%20iny%20agua%20y%20gas.pdf> [Accedido: May 15, 2021]
- [14] D. I. Cavides Rubio, R. A. Muñoz Calderón, A. Perdomo Gualtero, D. Rodríguez Acosta y J. Sandoval, “Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión,” *Ingeniería y Región*, no. 13, pp. 73–90, 2015 [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5432290.pdf>. [Accedido: Sep. 11, 2020]
- [15] L. Acosta Estrada, “Desarrollo de Nanopartículas de Magnetita Soportadas en un Material Micrométrico para Remoción y Subsecuente Descomposición Catalítica de Crudo Emulsionado en Aguas de Producción,” trabajo fin de master, Fac. de Minas, Dpto. de Geoc. y Med. Amb., Fund. Univ. Nacional de Colombia, Medellín, Antioquia, 2019 [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/77512/1036630429.2019.pdf?sequence=4&isAllowed=y>. [Accedido: Sep 20, 2020].
- [16] *Revista De Física*, “SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE MAGNETITA PARA LA REMOCIÓN DE CU<sup>2+</sup> DE AGUAS RESIDUALES. SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF MAGNETITE NANOPARTICLES FOR REMOVING CU,” vol. 31, no. 1 E, 2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.revistacubanadefisica.org/RCFextradata/OldFiles/2014/Vol31-N1E/RCF-31-1E-E016.pdf>. [Accedido: Feb 20, 2021].
- [17] “ESTUDIO DE LA SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE MAGNETITA POR MÉTODOS ELECTROQUÍMICOS’ DOCTOR EN ELECTROQUÍMICA,” 2012. [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/ytrwt> [Accedido: May 15, 2021].

- [18] "Síntesis y Caracterización de Nanopartículas de Magnetita," 2017. [En línea]. Disponible en: <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/rpolit/v39n2/2477-8990-rpolit-39-02-00061.pdf> [Accedido: May 15, 2021].
- [19] J. Field, "Biorremediación de Metales Pesados." [En línea]. Disponible en: [http://binational.pharmacy.arizona.edu/sites/binational.pharmacy.arizona.edu/files/al\\_files/Bioreem-MP.pdf](http://binational.pharmacy.arizona.edu/sites/binational.pharmacy.arizona.edu/files/al_files/Bioreem-MP.pdf) [Accedido: May 15, 2021]
- [20] D. L. Vullo, "Microorganismos y metales pesados: una interacción en beneficio del medio ambiente." [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/863/86320303.pdf> [Accedido: May 15, 2021]
- [21] "Cobre (Cu) Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente," Lenntech.es, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/cu.htm#:~:text=El%20cobre%20no%20es%20magn%C3%A9tico,acompa%C3%B1ada%20de%20una%20alta%20ductibilidad> [Accedido: May 15, 2021].
- [22] "Decreto 1076 de 2015" [En línea]. Disponible en: <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/col150098.pdf> [Accedido: Sep. 20, 2020].
- [23] DIGESA, "Parámetros organolépticos," GESTA, 2005 [En línea]. Disponible en: [http://www.digesa.minsa.gob.pe/DEPA/informes\\_tecnicos/GRUPO%20DE%20USO%201.pdf](http://www.digesa.minsa.gob.pe/DEPA/informes_tecnicos/GRUPO%20DE%20USO%201.pdf) [Accedido: Oct. 10, 2020]
- [24] Remtavares, "Los metales pesados en las aguas residuales | El Agua," Madrimasd.org, 2008. <https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2008/02/02/83698> [Accedido: Nov. 06, 2020]
- [25] D. W. Apaza Asqui, "Remoción de metales Plomo (Pb) y Zinc (Zn) de las aguas del río T'oro Q'ocha por precipitación alcalina en la ciudad de Juliaca," Unap.edu.pe, 2015, doi: <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/1774>.
- [26] "REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA 24 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA FIGURA 2.2 Solubilidades de hidróxidos metálicos en función de pH." [En línea]. Disponible en: [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/leia/padilla\\_s\\_mf/capitulo2.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leia/padilla_s_mf/capitulo2.pdf). [Accedido: Nov. 06, 2020]
- [27] Y. Velasco Gómez, "Sistemas de biofiltración empacados con turba y nanopartículas de TiO<sub>2</sub> y MgO para remoción de fenol," Unam.mx, 2011 [En línea]. Disponible en: <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/4441>. [Accedido: Sep. 13, 2020]
- [28] S. L. Estupiñan Balaguera y E. F. Bermúdez Cruz, "Utilización de nanopartículas magnéticas en la modificación de coagulante para proceso de tratamiento de agua lluvia," trabajo de grado, Fac. de Ing., Prog. Ing. Civil, Univ. Católica de Colombia,

- Bogotá D. C., 2019 [En línea]. Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/24361/1/Trabajo%20de%20grado%20C%20oagulaci%C3%B3n.pdf> [Accedido: Agos. 25, 2020]
- [29] J. de Viana, “Disposición y tratamiento del agua producida,” ARPEL, pp. 12-111, [En línea]. Disponible en: <http://www.ingenieroambiental.com/4000/GUIA%2001%20-%20OK.pdf> . [Accedido: Agos. 25, 2020]
- [30] J. S. Bejarano Pachón y C. V. Gonzalez Illidge, “Evaluación Técnico-Financiera Del Nuevo Tratamiento Del Agua De Inyección Para El Proyecto De Recobro Secundario En El Campo Moquetá,” trabajo de grado, Fac. de Ing., Prog. de Ing. de Petróleos, Fund. Univ. de América, Bogotá D. C., Colombia, 2019 [En línea]. Disponible en: <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7336/1/5132713-2019-1-IP.pdf> . [Accedido: Sep. 20, 2020]
- [31] SUPERINTENDENCIA NACIONAL DE SERVICIO DE SANEAMIENTO y Cooperación Técnica Alemana, “Análisis de Agua Parte 2: Alcalinidad” [En línea]. Disponible en: <http://bvspers.paho.org/texcom/cd048437/sunassal.pdf>. [Accedido: Mar. 15, 2021].
- [32] Garay, J.A., J. M. Betancourt, y G. Ramírez, “Manual de técnicas analíticas para la determinación de parámetros fisicoquímicos y contaminantes marinos: aguas, sedimentos y organismos,” 2003. [En línea]. Disponible en: <http://www.invemar.org.co/redcostera1/invemar/docs/7010manualTecnicasanaliticas..pdf>. [Accedido: Mar. 15, 2021].
- [33] Hach, Company, “Manual de análisis de agua”, 2000. [En línea] Disponible en: <https://www.hach.com> [Accedido: May 15, 2021].
- [34] ThemeGrill, “Equipo para análisis DBO - Oxitop - GreenView Corporation,” GreenView Corporation, Ene. 04, 2018. <https://n9.cl/1ogbu> [Accedido: Mar. 15, 2021].
- [35] Ciencias Ambientales “Práctica 2 DETERMINACIÓN DE CALCIO Y MAGNESIO EN AGUAS POR COMPLEXOMETRÍA 1. Objetivo” [En línea]. Disponible en: [https://www.upo.es/depa/webdex/quimfis/docencia/TAQ/curso0405/TAQP2\\_0405.pdf](https://www.upo.es/depa/webdex/quimfis/docencia/TAQ/curso0405/TAQP2_0405.pdf). [Accedido: Mar. 15, 2021].
- [36] C. Aguilera Rodríguez, P. Silva y M. Reyes, Revista Cubana de Química, vol. 3, pp. 39–44, 2010, [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/4435/443543720007.pdf>. [Accedido: Mar. 15, 2021].
- [37] Universidad de América Departamento de Ingenierías Facultad De Petróleos. A. F. Nieto y J. Molina. “Guías prácticas laboratorio de crudos y aguas”, 2011.





## **ANEXOS**

## ANEXO 1.

# CARACTERIZACIÓN DEL AGUA SIN TRATAR Y TRATADA POR EL MÉTODO CONVENCIONAL

Figura 53.

Caracterización al agua sin tratar



INFORME REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO

Código FLAB-07  
VERSION: 8  
Fecha 2021/03/11

INFORMACIÓN CLIENTE	
Empresa:	Jorge Andres Gonzalez Reyes
Dirección:	Universidad De America
Nit:	
Contacto:	Jorge Andres Gonzalez Reyes
Teléfono:	3102624050
E: mail:	<a href="mailto:jorge.gonzalez3@estudiantes.uamerica.edu.co">jorge.gonzalez3@estudiantes.uamerica.edu.co</a>
Departamento/Municipio:	Cundinamarca/Bogotá

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	
Muestra IMA No. :	4453
Matriz:	ARnD
Responsable de Muestreo:	Cliente
Plan de Muestreo IMA No. :	N.A.
Procedimiento de Muestreo:	N.E.
Tipo de Muestreo:	Puntual
Fecha y Hora de Toma:	12/3/2021
Fecha y Hora de Recep:	13/3/2021 08:00
Lugar de Muestreo:	agua sin tratar
Departamento/Municipio:	Cundinamarca/Bogotá
Fecha de Análisis	13/3/2021 a 30/3/2021

Resultado Analisis			
PARAMETRO	METODO ANALITICO	UNIDAD	Resultado Muestra
DBO <sub>5</sub>	SM 5210 B	mg/L	73
DQO	SM 5220 C	mg/L	147
Solidos totales	SM 2540 B	mg/L	4,5
solidos totales disueltos	SM 2540 D	mg/L	4,5

S.M. : Standard Methods 2005 21<sup>st</sup>, N.A. : No Aplica, N.E. No Especifica

**OBSERVACIONES:**  
El resultado corresponde únicamente a la muestra analizada y bajo condiciones de prueba.  
SM Métodos Normalizados para el análisis de agua potable y residual. Prohibida la reproducción total o Parcial de este documento sin autorización del Laboratorio

  
Nelson Fernandez Barrero  
Director Laboratorio TP 4482 CPIQ



Cel:3124015696 - 3143552939  
30/03/2021

Calle87 No. 49-21  
Bogota - Colombia  
C:\Users\Usuario\Documents\2021\2\_informes\4453 jorge Mar30

Comercial@imasas.com

1

**Nota.** Reporte entregado por el laboratorio IMA S.A.S con las pruebas DBO, DQO, Solidos totales disueltos y Solidos totales para el agua sin tratar.

**Figura 54.**

*Prueba de contenido de cobre*



**ima**  
ingeniería medio ambiental Ltda.

Análisis y Tratamiento de Aguas Potables,  
Residuales, Piscinas, Suelos  
y Cortes de Perforación.

Código FLAB-07  
VERSION : 7  
Fecha 2019/03/22

**INFORME REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO**

INFORMACIÓN CLIENTE			
Empresa:	Jorge Gonzalez		
Dirección:			
Nit:			
Contacto:	Maria Garcia		
Teléfono:	3102624050		
Email:	jorge.gonzalez3@estudiantes.uamerica.edu.co maria.garcia2@estudiantes.uamerica.edu.co		
Departamento/Municipio:	Cundinamarca / Bogota		

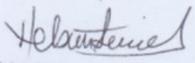
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA			
Muestra IMA No. :	4340, 4344,		
Matriz:	Agua residual Industrial, produccion pozos petroleros		
Responsable muestreo:	Cliente		
Plan de Muestreo IMA No. :	NA		
Procedimiento de Muestreo:	NA		
Tipo de Muestreo:	Puntual		
Fecha y Hora de Toma:	2020/10/19		
Fecha y Hora de Recep:	2020/10/19 17:00		
Lugar de Muestreo:	4340 sin tratar, 4344 tratada hidroxido calcio		
Departamento/Municipio:	Cundinamarca - Bogotá		
Fecha de Análisis	2020/10/19 @ 2020/11/7		

Resultados Muestra			
PARAMETRO	METODO ANALITICO	UNIDAD	Resultado Muestra
4340 Cobre	Hach 8506	mg/L	3,81
4344 Cobre	Hach 8506	mg/L	<0,04

S.M. - Standard Methods 2005 21<sup>st</sup>, N.A. : No Aplica, N.E. No Especifica

OBSERVACIONES:

El resultado corresponde únicamente a la muestra analizada y bajo condiciones de prueba.  
SM Métodos Normalizados para el análisis de agua potable y residual. Prohibida la reproducción total o Parcial de este documento sin autorización del Laboratorio



Nelson Fernandez Barrero  
TP 4482 CPIQ Director Laboratorio  
08/11/2020



INGENIERÍA  
medio ambiental  
Nit. 839.042.240-2

C:\Users\Usuariol\Documents\2020\2\_informes\4340\_4344\_jorge\_gonzalez

Calle 87 No. 49 - 21 - PBX: (571) 621 63 35  
Cel.: 312 3522475 - 314 355 2939 comercial@imasas.com  
Bogotá, D.C. Colombia

**Nota.** Reporte entregado por el laboratorio IMA S.A.S con las pruebas de contenido de cobre para el agua sin tratar y tratada por el método convencional de precipitación química.

Figura 55.

Caracterización del agua tratada convencionalmente



Código FLAB-07  
VERSION: 8  
Fecha 2021/03/11

INFORME REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO

INFORMACIÓN CLIENTE	
Empresa:	Jorge Andres Gonzalez Reyes
Dirección:	Universidad De America
NIT:	
Contacto:	Jorge Andres Gonzalez Reyes
Teléfono:	3102624050
E: mail:	<a href="mailto:jorge.gonzalez3@estudiantes.uamerica.edu.co">jorge.gonzalez3@estudiantes.uamerica.edu.co</a>
Departamento/Municipio:	Cundinamarca/Bogotá
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	
Muestra IMA No. :	4483
Matriz:	ARnD
Responsable de Muestreo:	Cliente
Plan de Muestreo IMA No. :	N.A.
Procedimiento de Muestreo:	N.E.
Tipo de Muestreo:	Puntual
Fecha y Hora de Toma:	12/3/2021
Fecha y Hora de Recep:	8/4/2021 03:51 pm
Lugar de Muestreo:	agua cruda + tratamiento convencional
Departamento/Municipio:	Cundinamarca/Bogotá
Fecha de Análisis	8/4/2021 a 15/4/2021

Resultado Analisis			
PARAMETRO	METODO ANALITICO	UNIDAD	Resultado Muestra
DBO <sub>5</sub>	SM 5210 B	mg/L	41,9
DQO	SM 5220 C	mg/L	99
salinidad	SM 2520 B	mg/L	1445
dureza total	SM 2340 C	mg/L	122
alcalinidad total	SM 2320 B	mg/L	25
sulfatos	SM 4500 SO4 E	mg/L	2
Oxígeno disuelto	SM 4500 O G	mg/L	3,1
pH	SM 4500 H B	unidades	8,7
cloruros	SM 4500 Cl B	mg/L	800
conductividad	SM 2310 B	us	1433
turbiedad	SM 2130 B	NTU	5,7
Solidos suspendidos totales	SM 2540 D	mg/L	5
solidos totales disueltos	SM 2540 D	mg/L	803

S.M. : Standard Methods 2005 21<sup>st</sup>, N.A. : No Aplica, N.E. No Especifica

**OBSERVACIONES:**  
El resultado corresponde únicamente a la muestra analizada y bajo condiciones de prueba.  
SM Métodos Normalizados para el análisis de agua potable y residual. Prohibida la reproducción total o Parcial de este documento sin autorización del Laboratorio

Nelson Fernandez Barrero  
Cel: 3124015696 - 3143552939  
Director Laboratorio P.P. 4482 CPIQ  
15/04/2021



Calle 87 No. 49-21  
Bogota - Colombia

Comercial@imasas.com

C:\Users\Usuario\Documents\2021\2. informes\4483 jorge abril 15

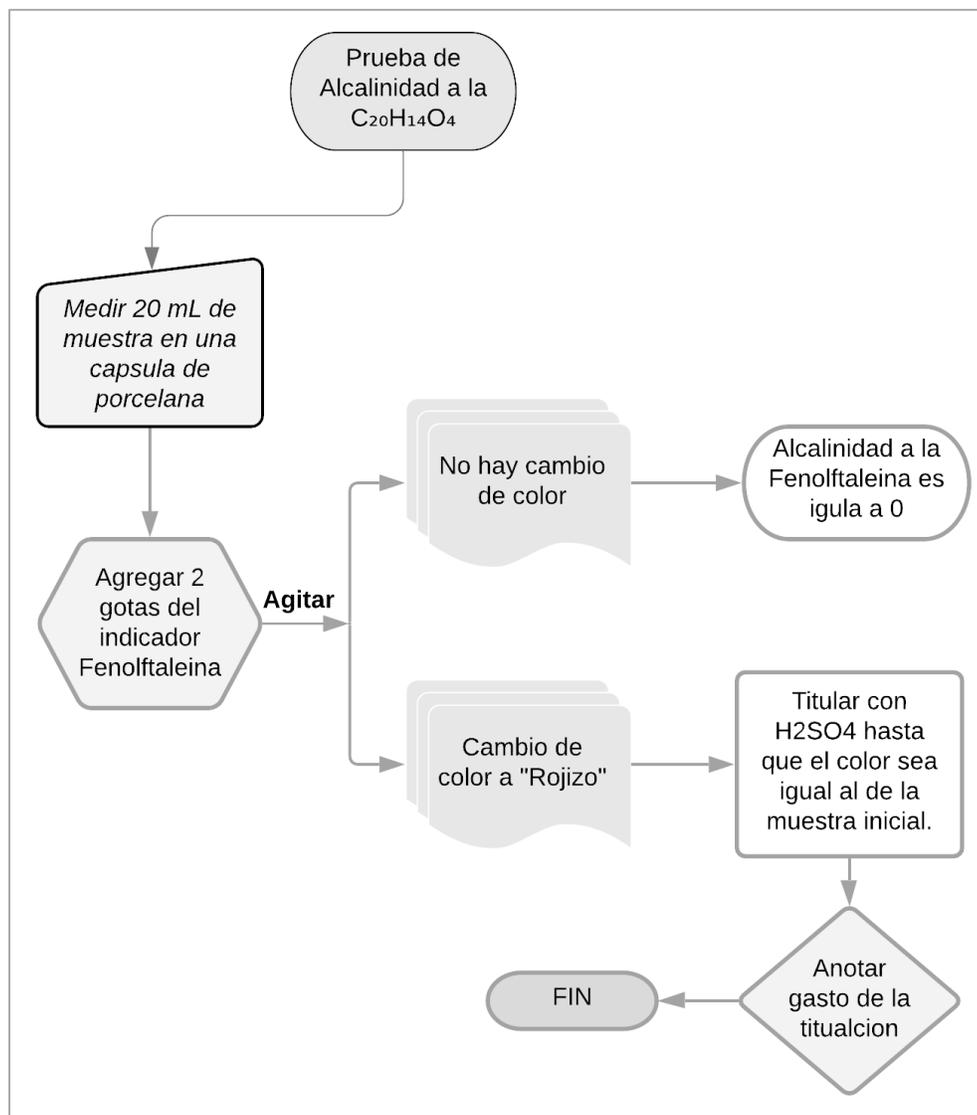
1

**Nota.** Reporte entregado por el laboratorio IMA S.A.S con la caracterización fisicoquímica del agua tratada con el método convencional de precipitación química.

**ANEXO 2.**  
**PROCEDIMIENTOS DE LAS PRUEBAS FISICOQUÍMICAS.**

**Figura 56.**

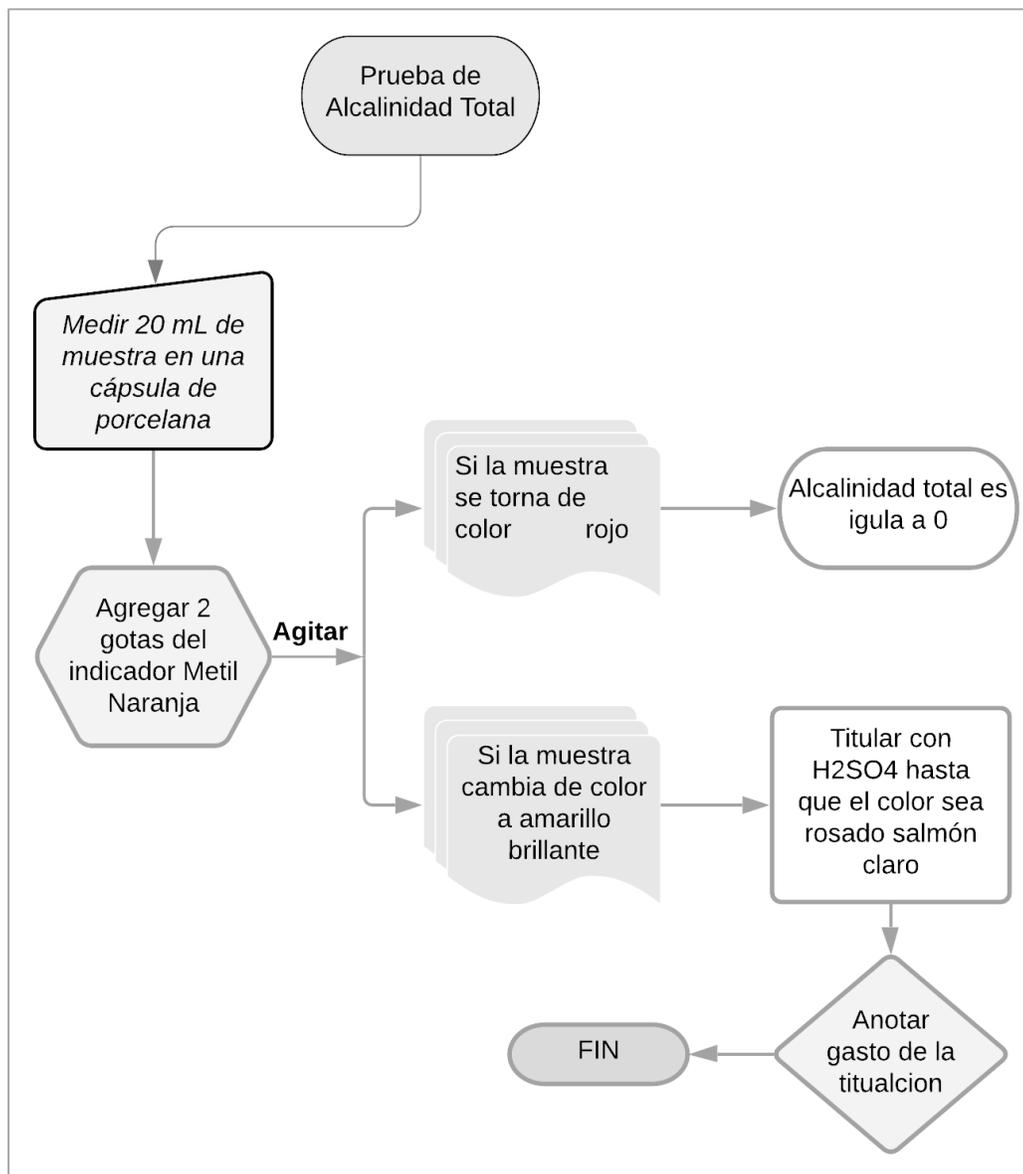
*Alcalinidad a Fenolftaleína*



**Nota.** La figura describe el procedimiento que se realizó para la prueba de alcalinidad a fenolftaleína.

**Figura 57.**

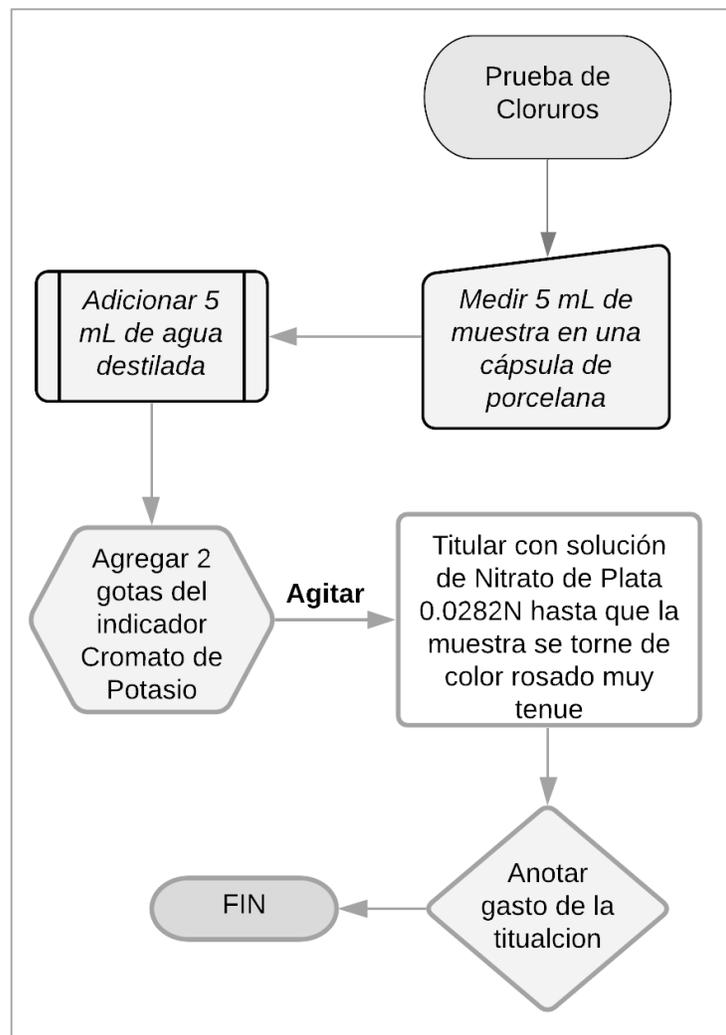
*Alcalinidad Total*



**Nota.** La figura describe el procedimiento que se realizó para la prueba de alcalinidad total.

**Figura 58.**

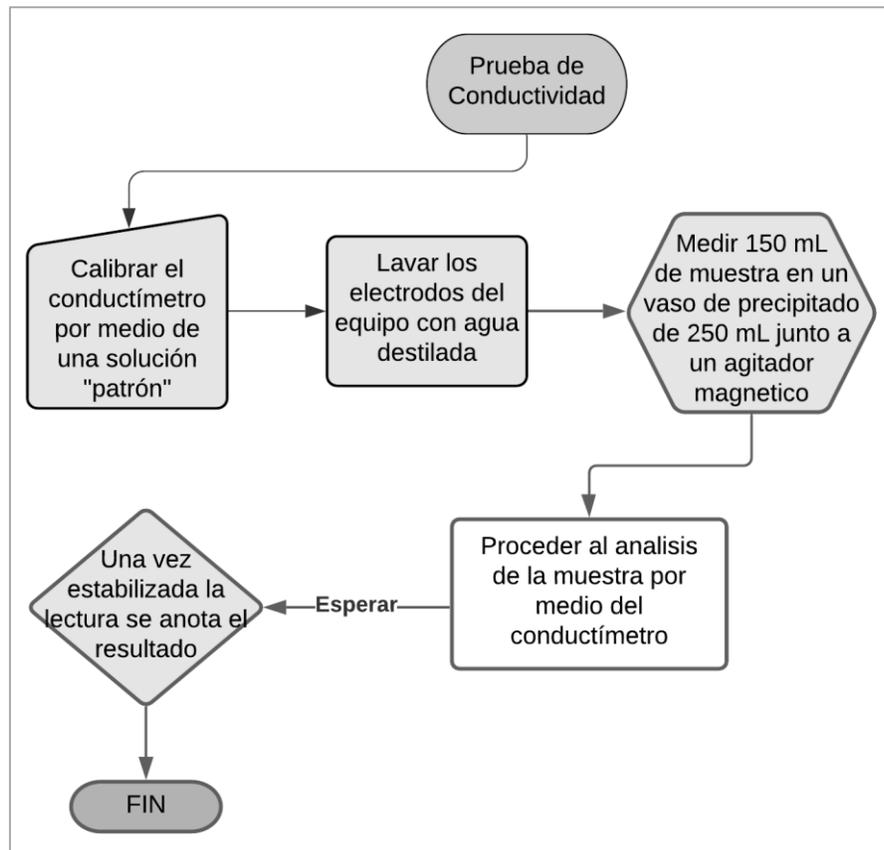
*Cloruros*



**Nota.** La figura describe el procedimiento que se realizó para la prueba de cloruros.

**Figura 59.**

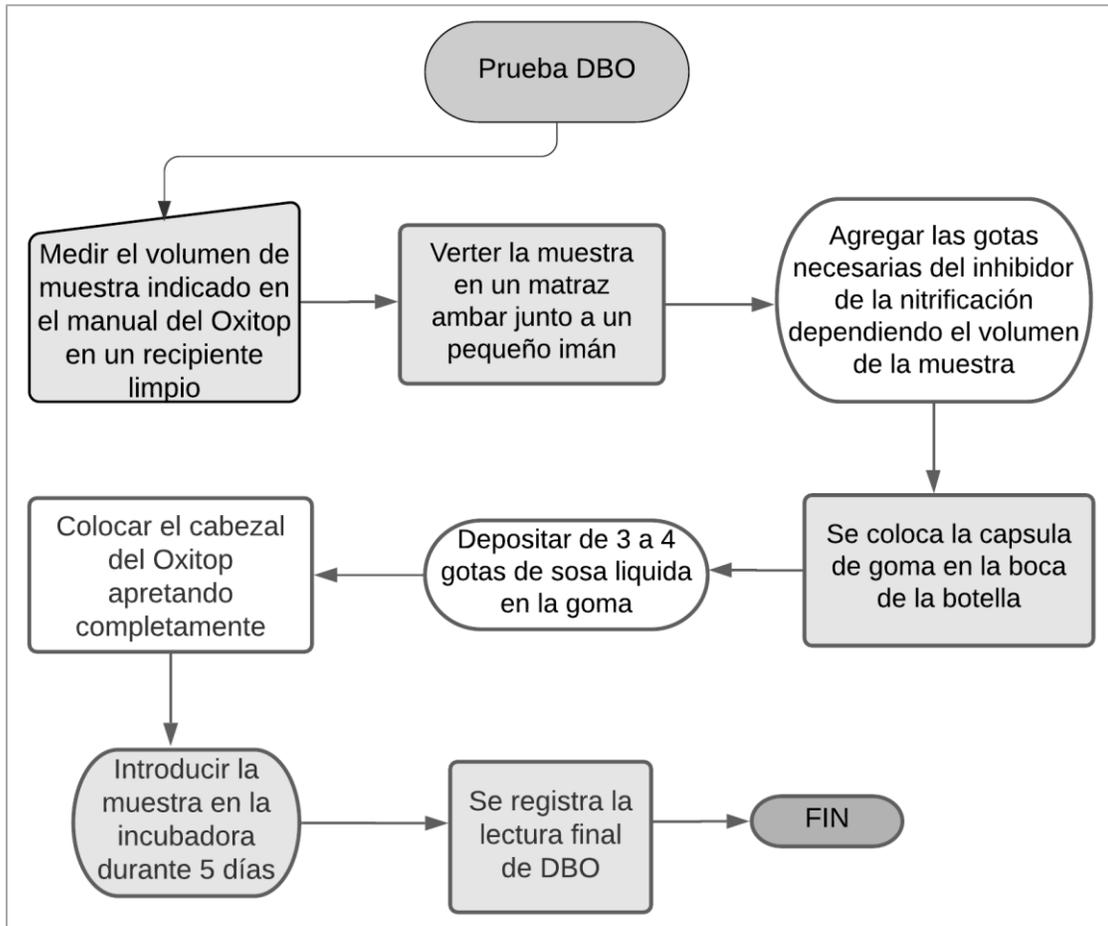
*Conductividad*



**Nota.** La figura describe el procedimiento que se realizó para la prueba de conductividad.

**Figura 60.**

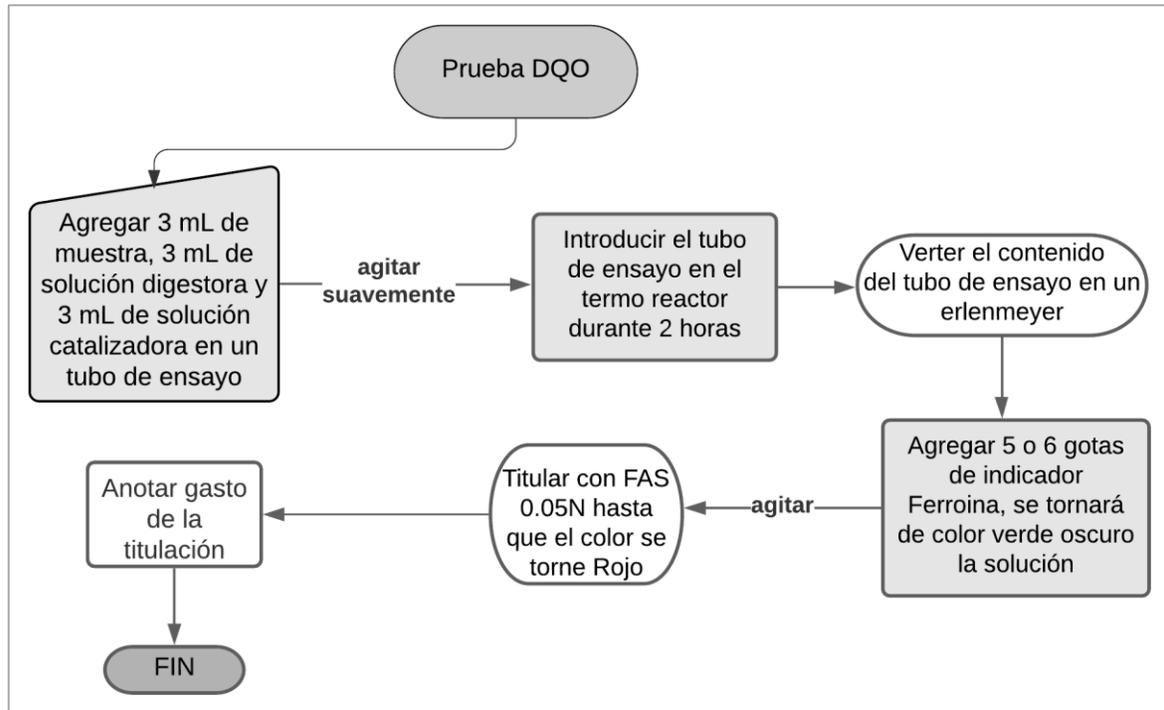
DBO



**Nota.** La figura describe el procedimiento que se realizó para la prueba de demanda biológica de oxígeno (DBO).

**Figura 61.**

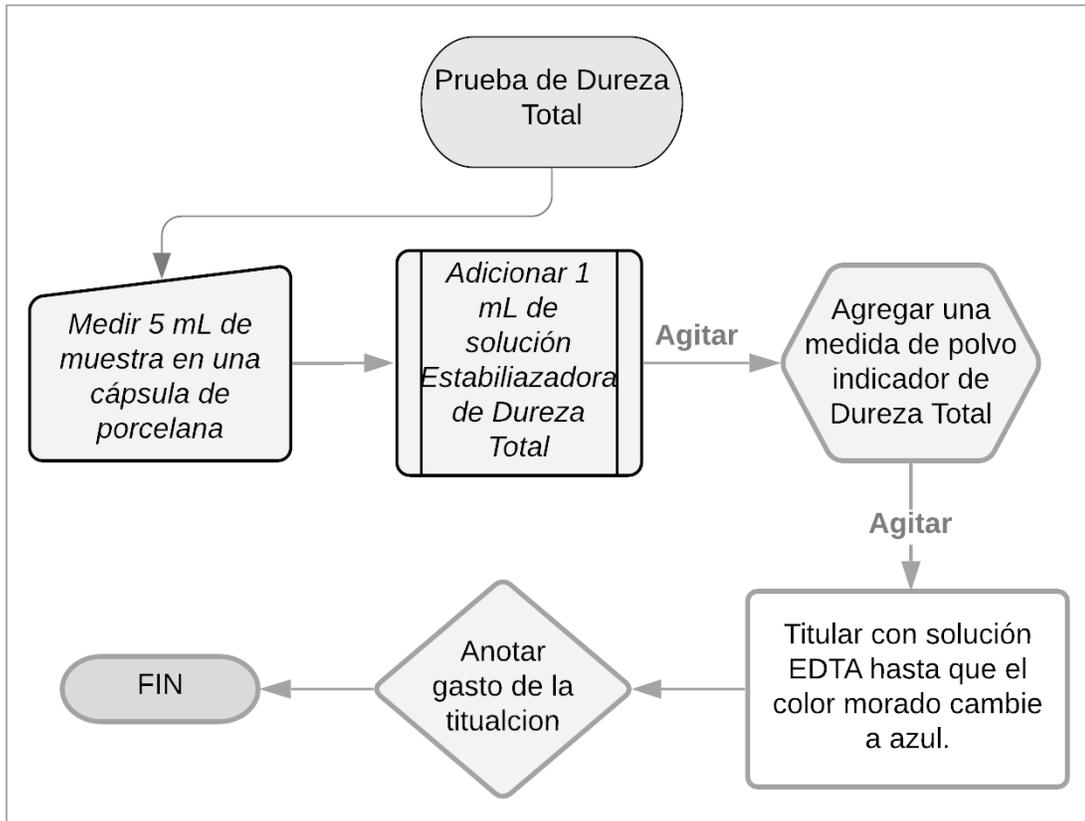
DQO



**Nota.** La figura describe el procedimiento que se realizó para la prueba de demanda química de oxígeno (DQO). Para la toma del blanco se realiza el mismo procedimiento con agua destilada en lugar de muestra simultáneamente.

**Figura 62.**

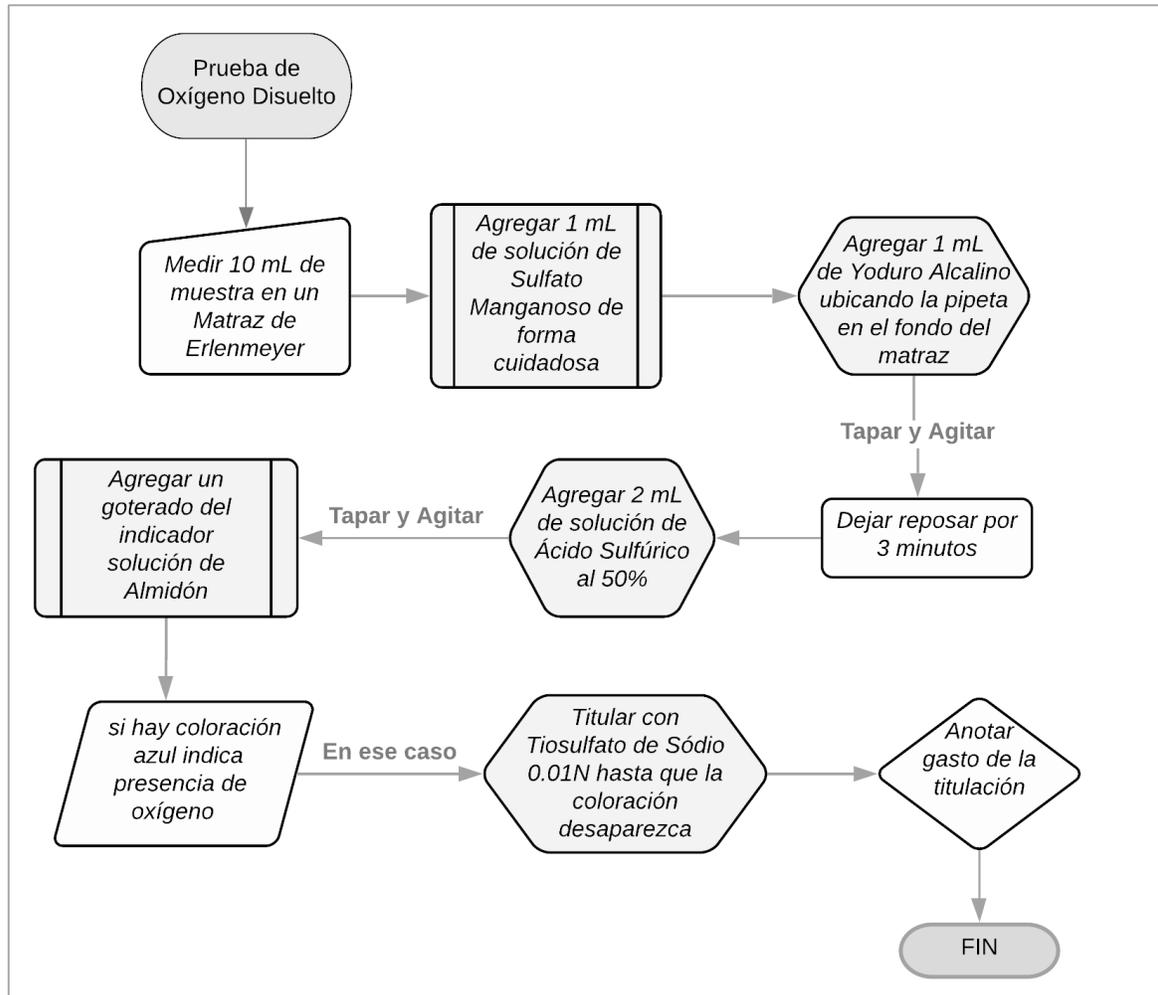
*Dureza Total*



**Nota.** La figura describe el procedimiento que se realizó para la prueba de dureza.

**Figura 63.**

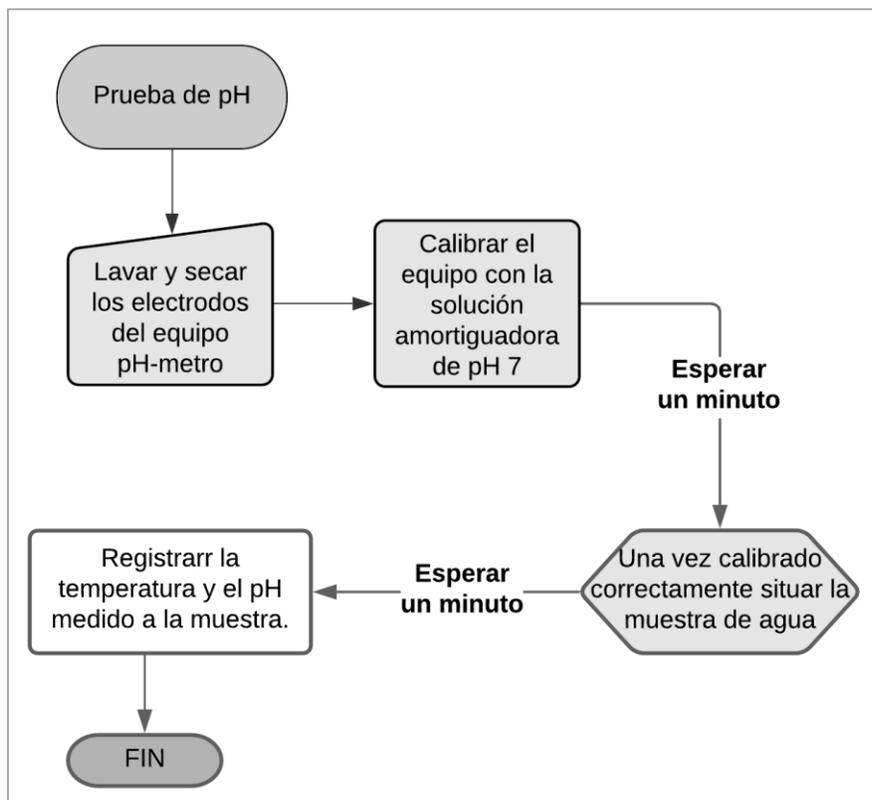
*Oxígeno disuelto*



**Nota.** La figura describe el procedimiento que se realizó para la prueba de oxígeno disuelto.

**Figura 64.**

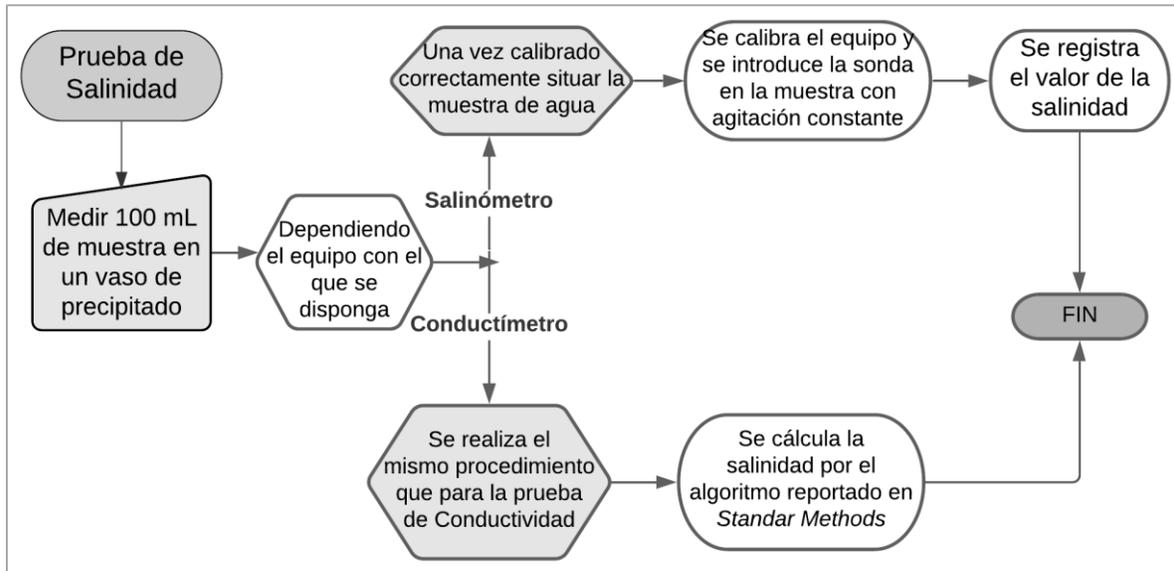
*pH*



**Nota.** La figura describe el procedimiento que se realizó para la prueba de pH.

**Figura 65.**

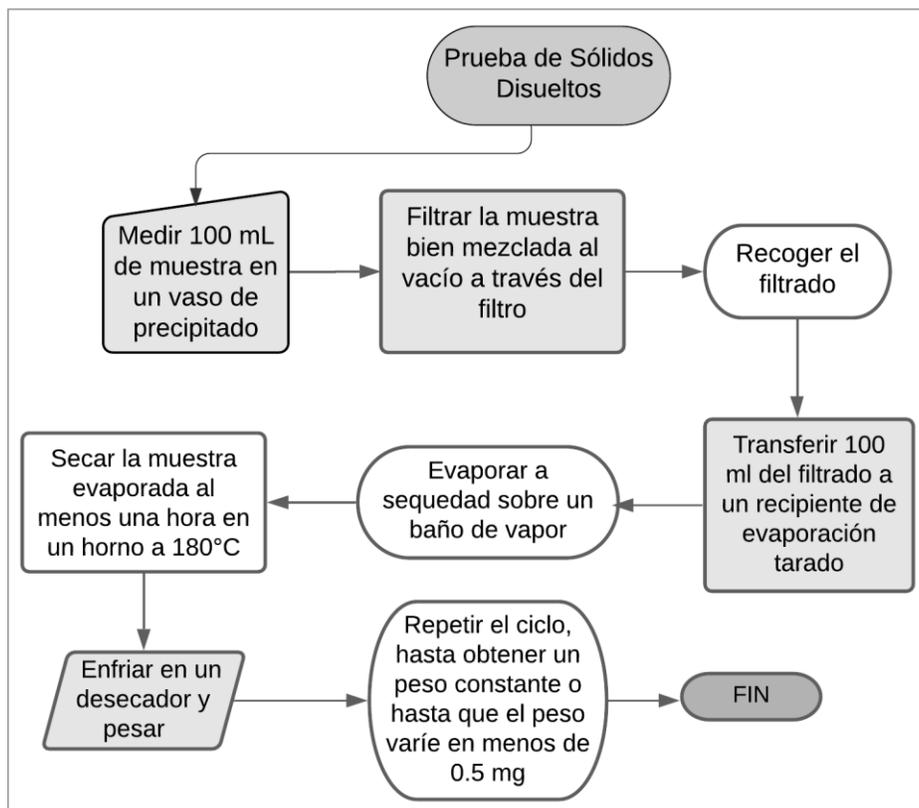
*Salinidad*



**Nota.** La figura describe el procedimiento que se realizó para la prueba de salinidad.

**Figura 66.**

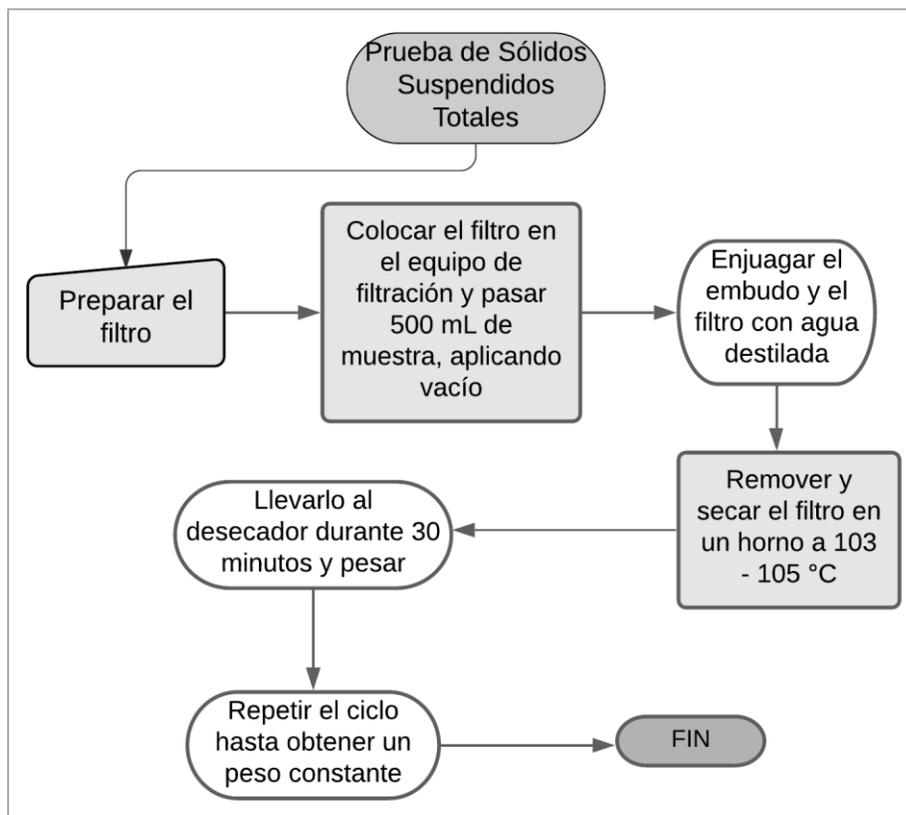
*Sólidos disueltos*



**Nota.** La figura describe el procedimiento que se realizó para la prueba de sólidos disueltos.

**Figura 67.**

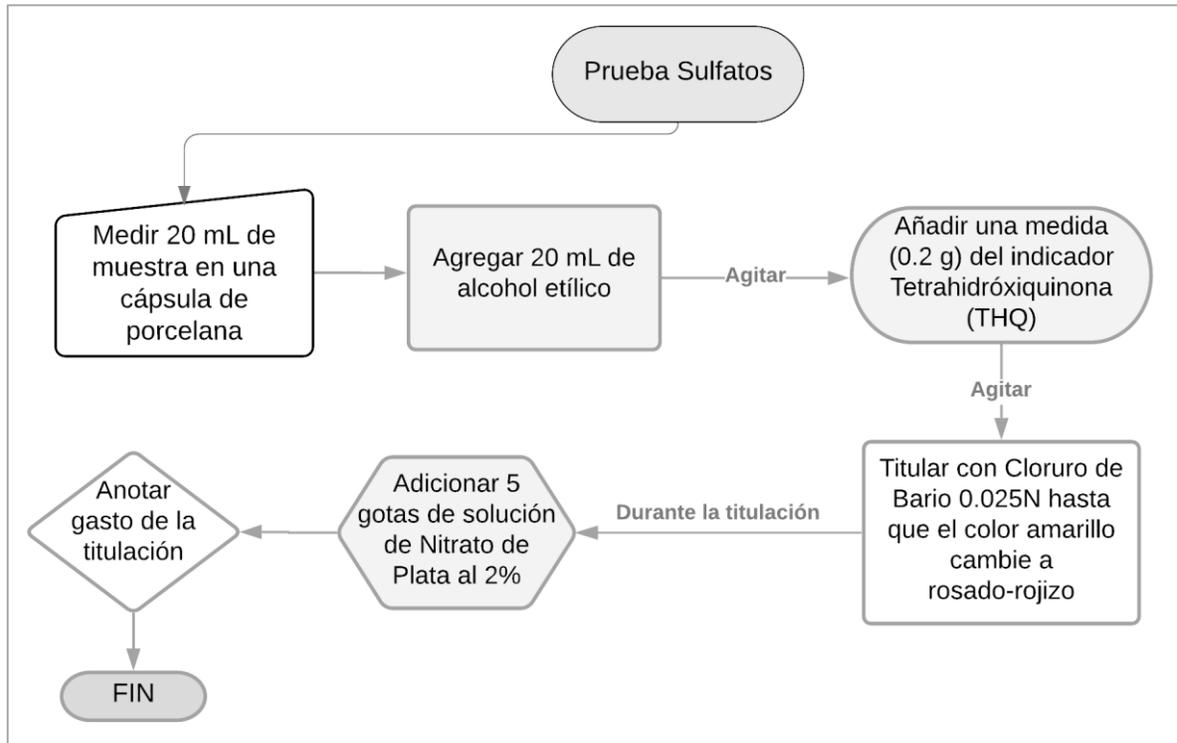
*Sólidos suspendidos totales*



**Nota.** La figura describe el procedimiento que se realizó para la prueba de sólidos suspendidos totales.

**Figura 68.**

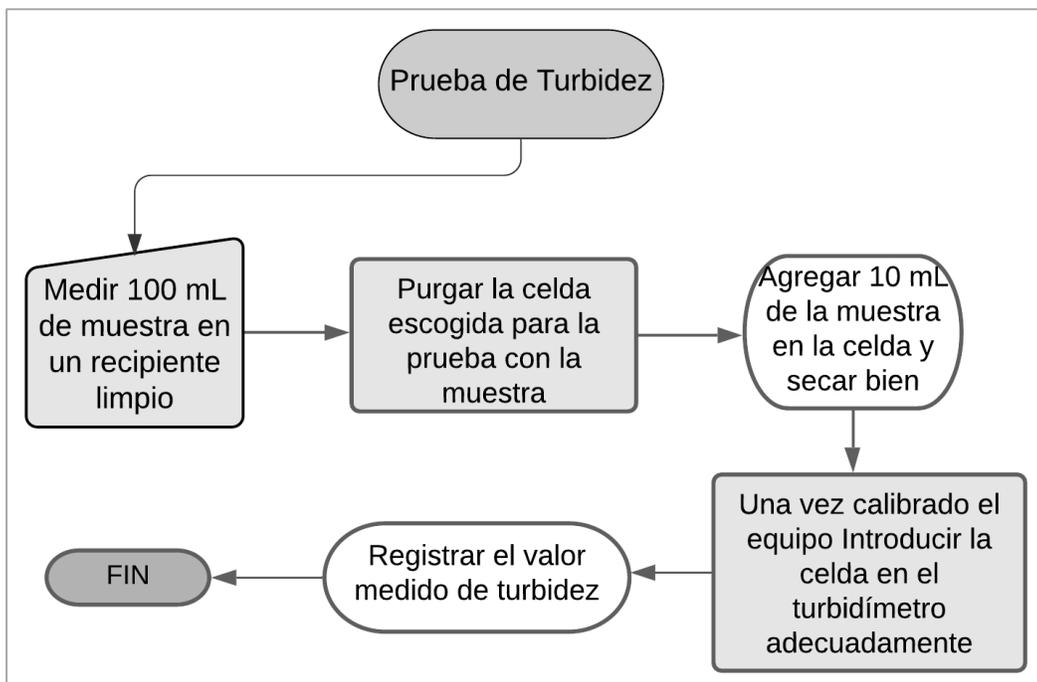
*Sulfatos*



**Nota.** La figura describe el procedimiento que se realizó para la prueba de sulfatos.

**Figura 69.**

*Turbidez*



**Nota.** La figura describe el procedimiento que se realizó para la prueba de turbidez.

## ANEXO 3.

# CARACTERIZACIÓN DEL AGUA TRATADA CON NANOPARTÍCULAS DE MAGNETITA.

Figura 70.

Caracterización del agua tratada con nanopartículas de magnetita



INFORME REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO

Código FLAB-07  
VERSION: 8  
Fecha 2021/03/11

INFORMACIÓN CLIENTE	
Empresa:	Jorge Andres Gonzalez Reyes
Dirección:	Universidad De America
Nit:	
Contacto:	Jorge Andres Gonzalez Reyes
Teléfono:	3102624050
E: mail:	<a href="mailto:jorge.gonzalez3@estudiantes.uamerica.edu.co">jorge.gonzalez3@estudiantes.uamerica.edu.co</a>
Departamento/Municipio:	Cundinamarca/Bogotá

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	
Muestra IMA No. :	4454
Matriz:	ARnD
Responsable de Muestreo:	Cliente
Plan de Muestreo IMA No. :	N.A.
Procedimiento de Muestreo:	N.E.
Tipo de Muestreo:	Puntual
Fecha y Hora de Toma:	12/3/2021
Fecha y Hora de Recep:	13/3/2021 08:00
Lugar de Muestreo:	TRATADA NANOPARTICULA 1
Departamento/Municipio:	Cundinamarca/Bogotá
Fecha de Análisis	13/3/2021 a 30/3/2021

Resultado Analisis			
PARAMETRO	METODO ANALITICO	UNIDAD	Resultado Muestra
DBO <sub>5</sub>	SM 5210 B	mg/L	49
DQO	SM 5220 C	mg/L	104
Solidos totales	SM 2540 B	mg/L	4,5
solidos totales disueltos	SM 2540 D	mg/L	4,5

S.M.: Standard Methods 2005 21<sup>st</sup>, N.A.: No Aplica, N.E. No Especifica

#### OBSERVACIONES:

El resultado corresponde únicamente a la muestra analizada y bajo condiciones de prueba.  
SM Métodos Normalizados para el análisis de agua potable y residual. Prohibida la reproducción total o  
Parcial de este documento sin autorización del Laboratorio

  
Nelson Fernandez Barrero  
Director Laboratorio TP 4482 CPIQ



Cal:3124015696 - 3143552939  
30/03/2021

Calle87 No. 49-21  
Bogota - Colombia

Comercial@imasas.com

C:\Users\Usuario\Documents\2021\2\_informe\4454 Jorge Mar30

1

**Nota.** Reporte entregado por el laboratorio IMA S.A.S con las pruebas DBO, DQO, Solidos totales disueltos y Solidos totales para el agua tratada con nanopartículas de magnetita.

## ANEXO 4.

### RECOMENDACIONES

Para posteriores trabajos con temas semejantes a los tratados en este proyecto de investigación se hacen las siguientes recomendaciones:

Evaluar nanopartículas de diferentes compuestos para la remoción de cobre con el fin de establecer una comparación en términos de eficiencia.

Aplicar las nanopartículas de magnetita para procesos de remoción de otros metales pesados como el zinc o el mercurio.

Implementar las nanopartículas de magnetita a nivel industrial con el fin de evaluar su eficiencia a gran escala.

Analizar detalladamente el agua original de formación y las características petrofísicas del campo, para así verificar su compatibilidad con el agua tratada para procesos de reinyección.

Realizar la medición del potencial Z de las nanopartículas de magnetita para identificar su nivel de magnetismo con precisión.

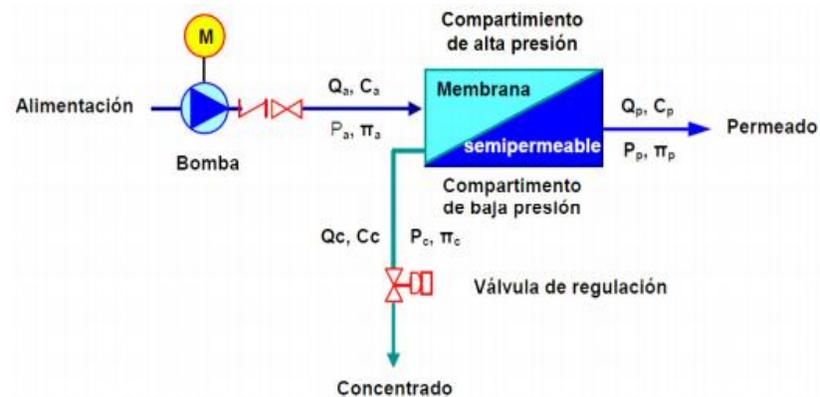
En caso de ser necesario modificar los parámetros fisicoquímicos del agua tratada con el fin de ajustarla a los requeridos para un agua de reinyección, se recomienda tener en cuenta los siguientes procedimientos:

- Alcalinidad Total. Cuando la alcalinidad es elevada se provoca un aumento de pH en el sustrato, por lo tanto, se debe hacer uso de ácido en dicha agua para neutralizar el aumento y disminuir el contenido de bicarbonatos y carbonatos. Los ácidos comúnmente utilizados son los ácidos cítrico, nítrico, fosfórico y sulfúrico siendo este último el más asequible en cuanto al costo [46].
- Dureza Total. Para la disminución de este parámetro se recomienda utilizar compuestos químicos que “secuestren” el calcio y el magnesio con el fin de formar combinaciones estables solubles entre ellos. Para este caso los más recomendados son el hexametáfosfato de sodio y el ácido etilendiaminotetraacético [47].
- Cloruros. Para la eliminación de cloruros se hace uso del proceso de osmosis inversa que tiene una eficiencia aproximada del 90%, este procedimiento consiste en

someter el agua a presión a través de una membrana semipermeable [48], cuyo objetivo es permitir el paso selectivo del agua a una velocidad mucho más alta que la velocidad de cualquier componente presente en el agua, reteniendo así los cloruros en el lado de alimentación como se muestra en la **figura 71**.

**Figura 71.**

*Proceso Osmosis Inversa*



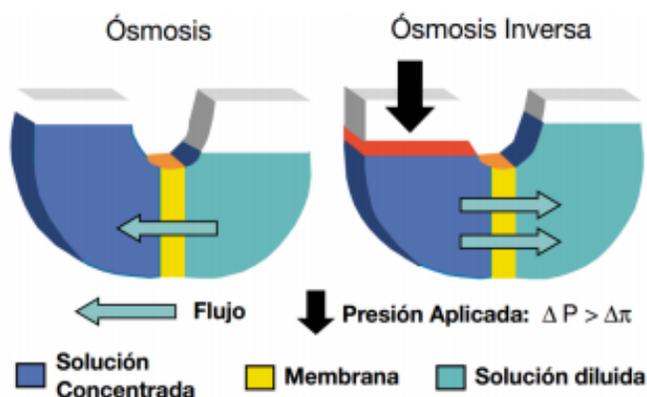
**Nota.** El gráfico representa el proceso de Osmosis Inversa. Tomado de: Planeta Barros P. y Jarava Galván R., “Análisis de alternativas para la remoción de cloruros presentes en las aguas residuales industriales de producción del campo Cicuco Ecopetrol S.A.,” *Unad.edu.co*, 2017, doi: <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/13789>.

- Oxígeno Disuelto. Es fundamental tener un elevado nivel de oxígeno disuelto y debido a la materia orgánica generalmente estas aguas vienen con bajas concentraciones. Para esto se recomienda utilizar peróxido de hidrogeno el cual ayudara con el aumento del oxígeno hasta el nivel deseado.
- DBO. Para disminuir este parámetro se deben hacer procesos de aireación, inyección de aire o usar peróxido de hidrogeno para así hacer que se degrade el oxígeno completamente.

- DQO. Este parámetro se relaciona con el DBO debido a que producen los mismos efectos y se resuelve con los mismos procedimientos, el más recomendado es la inyección de aire por su asequibilidad.
- TDS. Este parámetro también es posible ajustarlo con el proceso de osmosis inversa ya que maneja el mismo principio y los retiene en el lado de la alimentación de la membrana permeable RO, sin embargo, eliminan tamaños desde  $1,666054 \times 10^{-24}$  por lo cual presenta una eficiencia del 90% aproximadamente [48].
- TSS. Para esta parte existen diversos métodos, pero el más eficiente también es el de osmosis inversa debido a que es poco común encontrar sólidos en suspensión menores al tamaño aceptado por dicha membrana por lo cual la eficiencia de este subiría a más del 90 [48]. La diferencia entre el proceso de osmosis y osmosis inversa se muestra en la **figura 72**.

**Figura 72.**

*Fenómenos de Osmosis y Osmosis Inversa*



**Nota.** En la imagen se muestra la diferencia entre Osmosis y Osmosis inversa. Tomado de: Planeta Barros P. y Jarava Galván R., "Análisis de alternativas para la remoción de cloruros presentes en las aguas residuales industriales de producción del campo Cicuco Ecopetrol S.A.," *Unad.edu.co*, 2017, doi: <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/13789>.