

Evaluación de las propiedades reológicas de los lodos de perforación base agua como efecto de la adición de nanocables de cobre (Cu)

Luzelly Ortiz Espinel

Autor

Trabajo de Grado para Optar al Título de Química

Director

Enrique Mejía Ospino

PhD. en Ciencias Químicas

Codirector

Iván Felipe Díaz Izaquita

Químico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Química

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

Principalmente a Dios por darme la sabiduría y las habilidades para permitirme alcanzar una meta más en mi vida.

A mis padres, Deoclides y Mery, por su amor y apoyo incondicional, sus esfuerzos para brindarme la oportunidad de formarme como profesional y hacer posible este logro.

A mi hermano Albeiro por su apoyo, sus consejos y su compañía durante los primeros años de formación lejos de nuestro hogar.

A mi hermana Erika por su apoyo y cariño brindado.

A mi familia que siempre ha estado apoyándome y de alguna manera fue parte de este proceso.

A todas aquellas personas que conocí durante la carrera, que me brindaron su amistad, su compañía y sus consejos.

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander, a la Escuela de Química y a su personal académico y administrativo, por permitirme llevar a cabo mi proceso formativo como profesional.

Al grupo de investigación LEAM por poner a mi disposición sus laboratorios ubicados en las instalaciones del parque tecnológico Guatiguará, por permitirme formar parte de su grupo de trabajo, por la orientación, enseñanzas y experiencias adquiridas.

A mi director PhD. Enrique Mejía Ospino por su disposición, confianza y orientación durante el desarrollo del trabajo de investigación.

A mi codirector Iván Felipe Diaz Izaquita, estudiante de maestría de la Escuela de Química UIS, por su disposición, aportes y apoyo en la ejecución del proyecto.

A Nicolas Cárdenas Acevedo, estudiante de maestría de la Escuela de Ingeniería de Petróleos UIS, por sus aportes y ayuda en la ejecución del proyecto.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Marco de Referencia	18
1.1 Lodos de perforación	18
1.1.1 Lodos a base de agua (WBM).....	19
1.1.2 Formulación del lodo de perforación.....	20
1.1.3 Propiedades reológicas de los lodos de perforación	22
1.1.3.1 Viscosidad aparente (VA).....	24
1.1.3.2 Viscosidad plástica (VP).....	24
1.1.3.3 Punto cedente (YP)	25
1.1.3.4 Resistencia de gel (GS).....	25
1.1.4 Pérdida de filtrado (FL)	25
1.2 Nanotecnología	26
1.2.1 Nanocables de cobre	28
1.2.1.1 Métodos de síntesis	29
1.3 Sistemas dispersos	30
1.4 Técnicas instrumentales	33
1.4.1 Microscopia electrónica de barrido (SEM).....	33
1.4.2 Difracción de rayos X (DRX)	33
2. Objetivos	35
2.1 Objetivo General	35
2.2 Objetivos Específicos.....	35

3. Metodología	35
3.1 Materiales y reactivos	35
3.2 Síntesis de nanocables de cobre (CuNW) por ruta de reducción en solución acuosa.....	36
3.3 Caracterización de los nanocables de cobre (CuNW).....	37
3.3.1 Microscopia electrónica de barrido de emisión de campo (FE-SEM).....	37
3.3.2 Difracción de Rayos X (DRX).....	37
3.3.3 Potencial zeta	37
3.4 Preparación de la dispersión del nanomaterial.....	37
3.5 Preparación del lodo con nanomaterial.....	38
3.6 Evaluación de las propiedades reológicas del lodo base y el lodo con CuNW	38
3.7 Prueba de filtrado	40
4. Análisis de resultados	40
4.1 Síntesis y caracterización de los nanocables de cobre (CuNW).....	40
4.1.1 Microscopia electrónica de barrido (SEM).....	42
4.1.2 Difracción de rayos X (DRX)	43
4.1.3 Potencial zeta	44
4.2 Efecto de los CuNW en las propiedades reológicas y de filtrado del WBM.....	45
4.2.1 Viscosidad aparente (VA).....	47
4.2.2 Viscosidad plástica (VP).....	50
4.2.3 Punto cedente (YP)	51
4.2.4 Resistencia de gel (GS).....	53
4.2.5 Pérdida de filtrado (FL)	54
5. Conclusiones.....	56

6. Recomendaciones	57
Referencias bibliográficas.....	58
Apéndices.....	64

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Clasificación de lodos de perforación acorde a su constituyente principal</i>	19
Tabla 2 <i>Resultados de la viscosidad aparente</i>	49
Tabla 3 <i>Resultados de la viscosidad plástica</i>	50
Tabla 4 <i>Resultados del punto cedente</i>	52
Tabla 5 <i>Resultados de las medidas de resistencia de gel</i>	53

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Datos del esfuerzo cortante a diferentes tasas de corte para el lodo base y lodos con diferente concentración de CuNW	64
Apéndice B. Datos obtenidos en la prueba de filtrado para el lodo base y el lodo con 2000 ppm de CuNW	65

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Estructura de la goma xantana (GX)</i>	21
Figura 2 <i>Comparación del comportamiento reológico de varios modelos de flujo</i>	23
Figura 3 <i>Formación de una torta de filtración</i>	26
Figura 4 <i>Formación de los CuNW</i>	30
Figura 5 <i>Diagrama de potencial zeta en nanopartículas</i>	31
Figura 6 <i>Síntesis de nanocables de cobre por reducción acuosa</i>	36
Figura 7 <i>Esquema de preparación del lodo</i>	38
Figura 8 <i>Viscotester IQ (Thermo Scientific)</i>	39
Figura 9 <i>Filtro-prensa Fann 250</i>	40
Figura 10 <i>Montaje experimental de la síntesis de CuNW</i>	41
Figura 11 <i>CuNW liofilizados</i>	42
Figura 12 <i>Micrografías de los CuNW</i>	42
Figura 13 <i>EDS de los CuNW</i>	43
Figura 14 <i>Patrón de DRX de CuNW</i>	44
Figura 15 <i>Potencial zeta de los CuNW</i>	45
Figura 16 <i>Reología</i>	46
Figura 17 <i>Viscosidad Aparente de los lodos de perforación evaluados</i>	49
Figura 18 <i>Viscosidad Plástica de los lodos de perforación evaluados</i>	51
Figura 19 <i>Punto Cedente de los lodos de perforación evaluados</i>	52
Figura 20 <i>Resistencia de gel de los lodos de perforación evaluados</i>	54

Figura 21 *Prueba de filtrado API* 55

Figura 22 *Tortas de filtración de lodos de perforación*..... 56

Glosario

API: american petroleum institute por sus siglas en inglés, instituto americano del petróleo.

CuNW: copper nanowires por sus siglas en inglés, nanocables de cobre

FL: fluid loss por sus siglas en inglés, pérdida de fluido

GS: gel strength por sus siglas en inglés, resistencia de gel

GX: goma xantana

NP: nanopartículas

PAC: celulosa polianiónica

SEM: scanning electron microscopes por sus siglas en inglés, microscopía electrónica de barrido

VA: viscosidad aparente

VP: viscosidad plástica

WBM: water based mud por sus siglas en inglés, lodo base agua

DRX: difracción de rayos X

YP: yield point por sus siglas en inglés, punto cedente

Resumen

Título: Evaluación de las propiedades reológicas de los lodos de perforación base agua como efecto de la adición de nanocables de cobre (Cu)*

Autor: Luzelly Ortiz Espinel**

Palabras Clave: Lodos de perforación, Fluido de perforación, Propiedades reológicas, Filtrado, Nanocables de cobre

Descripción: El fluido de perforación es un componente clave en las operaciones de perforación. Hay varios tipos según su componente principal, sin embargo, el lodo a base de agua (WBM) es el preferido por su costo y bajo impacto ambiental. Las propiedades que caracterizan a este fluido incluyen la reología y la pérdida de filtrado. Estas pueden ser mejoradas con la adición de ciertos nanomateriales, ya que, debido a su escala entre 1 y 100 nanómetros, poseen cualidades únicas. Se ha reportado el uso de una gran variedad de nanopartículas, sin embargo, existen otros nanomateriales como nanotubos, nanocables, nanoplacas y nanofibras con propiedades particulares. Los nanocables (NW), con nanoestructuras metálicas 1D, se han distinguido por su conductividad eléctrica, térmica y por su flexibilidad mecánica. En este estudio, se adicionaron nanocables de cobre (CuNW) a un lodo de perforación a base de agua para evaluar su efecto sobre las propiedades reológicas y de pérdida de filtrado. Los CuNW se sintetizaron a través de una reducción de un precursor de cobre en solución acuosa mediando su crecimiento anisotrópico con etilendiamina. Su caracterización se realizó mediante microscopía electrónica de barrido por emisión de campo (FE-SEM) y difracción de rayos X (DRX). Los experimentos para estudiar la reología se llevaron a cabo a temperaturas de 25, 50, 65 y 80 °C y concentraciones de 500, 1000 y 2000 ppm de CuNW en el lodo de perforación. Los resultados mostraron una disminución de la viscosidad aparente (AV), viscosidad plástica (PV), punto de cedente (YP) y resistencia del gel (GS). El filtrado API se realizó a temperatura ambiente y 100 psi con una concentración de 2000 ppm de CuNW en el lodo. Se observó una reducción de 16.6% en la pérdida de fluido.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Director: PhD. Enrique Mejía Ospino. Codirector: Iván Felipe Díaz Izaquita.

Abstract

Title: Evaluation of the rheological properties of water-based drilling mud as an effect of the addition of copper nanowires (Cu)*

Author(s): Luzelly Ortiz Espinel**

Key Words: Drilling mud, Drilling fluid, Rheological properties, Filtration, Copper Nanowires

Description: Drilling fluid is a very important component in drilling operations. There are several types according to their main component, however, water-based mud (WBM) is preferred for its cost and low environmental impact. Properties that characterize this fluid include rheology and filtration loss. These can be enhanced with the addition of certain nanomaterials, since due to their scale between 1 and 100 nanometers they have unique qualities. The use of a wide variety of nanoparticles has been reported, however, there are other nanomaterials such as nanotubes, nanowires, nanoplates and nanofibers with particular properties. Nanowires (NW), with 1D metallic nanostructures, have been distinguished by their electrical and thermal conductivity and their mechanical flexibility. In this study, copper nanowires (CuNW) were added to a water-based drilling fluid to assess its effect on rheological and filtrate loss properties. CuNW were synthesized through a reduction of a copper precursor in aqueous solution mediating its anisotropic growth with ethylenediamine. Its characterization was performed by field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) and X-ray diffraction (XRD). The experiments to study rheology were carried out at temperatures of 25, 50, 65, and 80 °C and concentrations of 500, 1000 and 2000 ppm CuNW in the drilling fluid. The results showed a decrease in apparent viscosity (AV), plastic viscosity (PV), yield point (YP) and gel strength (GS). API filtration was performed at room temperature and 100 psi with a concentration of 2000 ppm CuNW in the fluid. A 16.6% reduction in fluid loss was observed.

* Degree Work

** Science Faculty. School of Chemistry. Director: PhD. Enrique Mejia Ospino. Co-director: Iván Felipe Diaz Izaquita.

Introducción

La operación de perforación de pozos se considera un proceso crucial para la extracción de petróleo y gas natural de depósitos subterráneos (Li et al., 2015). Durante esta operación, el lodo de perforación es uno de los elementos más importantes. El éxito o fracaso de este proceso depende de la composición y las propiedades del fluido utilizado. Además, este realiza múltiples funciones críticas, incluida la limpieza del pozo, el control de la presión, el mantenimiento de la integridad de la formación del subsuelo y el suministro de energía y telemetría para las herramientas de fondo del pozo (Mitchell, 2019).

Teniendo en cuenta los componentes principales, los fluidos de perforación pueden clasificarse como lodos a base de agua (WBM), lodos a base de aceite (OBM) y lodos a base de gas. Los WBM se emplean comúnmente como fluidos apropiados en el proceso de perforación considerando su bajo costo, características biodegradables y ecológicas (Kazemi-Beydokhti & Hajiabadi, 2018). Sin embargo, aunque los WBM son los fluidos amigables con el medio ambiente, la posible degradación de sus propiedades reológicas a altas temperaturas es una gran preocupación. Esta degradación puede provocar fallas en la operación de perforación, como cerrar el pozo, llenar el fondo del pozo con recortes de perforación, velocidad de incrustación reducida, agrandamiento del pozo, tubería atascada y pérdida de circulación (Perween et al., 2018).

En los últimos años, el uso de la nanotecnología ha mejorado el rendimiento de los lodos de perforación al modificar sus propiedades reológicas y de transferencia de calor, lo cual puede atribuirse al tamaño y forma de las nanopartículas, además de sus interacciones químicas con los componentes del lodo (Perween et al., 2018). El beneficio potencial de agregar nanomateriales a los lodos es aumentar la estabilidad del pozo y la eficiencia de perforación, lo que reduce los costos de dicho proceso. Esto se logra a través de una filtración reducida de los fluidos (grosor reducido

de la torta del filtro) que puede evitar el pegue diferencial. También se ve reflejado en sus propiedades reológicas mejoradas que afectan el transporte de los recortes a la superficie y reduce la fricción para un menor torque y arrastre en las tuberías de perforación. Las nanopartículas pueden mejorar las propiedades de transferencia de calor de los fluidos, lo que reducirá la degradación térmica de los equipos utilizados en la operación (Perween et al., 2019).

Kazemi-Beydokhti & Hajiabadi (2018) utilizaron un complejo sintetizado de nanotubos de carbono de paredes múltiples oxidados envueltos en polietilenglicol (POCNT), para investigar el rendimiento de los lodos de perforación a base agua a través de análisis reológicos y pruebas de filtración. El estudio mostró mejoras significativas en el punto cedente (YP), la viscosidad y la resistencia de gel (GS), debido a las características hidrofílicas de esta fórmula. Se demostró que el POCNT puede reducir significativamente la permeabilidad de la torta de lodo y exhibir una tasa de filtración mucho menor que el fluido base convencional. En general, concluyeron que las características sobresalientes del POCNT confirman un alto potencial en la eliminación de recortes y reducción de la pérdida de filtrado incluso a concentraciones muy bajas.

Bayat et al. (2018) realizaron un estudio con nanopartículas (NP) de óxidos metálicos (Al_2O_3 , TiO_2 , CuO y SiO_2) en el cual probaron las propiedades reológicas básicas de los lodos preparados, como la viscosidad plástica (VP), YP, GS, el espesor de la torta de filtración y la pérdida de filtrado (FL). Este estudio se llevó a cabo agregando diferentes concentraciones de cada una de las NP ya mencionadas a un lodo de perforación a base de agua y bentonita. Se observó que la VP, YP y GS del lodo se incrementaron añadiendo NP de Al_2O_3 lo que es favorable, pero aumentaron la pérdida de fluido, lo cual es indeseable. Las NP de TiO_2 y CuO dieron como resultado una disminución de la VP, YP y GS. Las NP de SiO_2 revelaron una buena mejora en la reología de Bentonita-WBM y una mejora aceptable en las características del producto de lodo

final en términos de FL y torta de filtración. Finalmente, como resultados generales los investigadores concluyeron que se pueden agregar NP a Bentonita-WBM para mejorar las propiedades de los lodos de perforación. Sin embargo, el punto importante son las concentraciones de NP, ya que juega un papel vital en su uso.

En otro estudio realizado por Perween et al. (2019) se sintetizaron nanopartículas (NP) de ferrita de bismuto BiFeO_3 (BFO) como aditivo para explorar sus efectos sobre las propiedades reológicas y de filtrado de un lodo a base agua y bentonita. Se observó que las NP mejoraron los parámetros reológicos como la viscosidad aparente (VA), VP, YP y GS. Esto se le atribuye al hecho de que las NP de BFO son altamente ferroeléctricas y tienen una polarización permanente que mejora la fuerza de atracción entre las partículas de arcilla dando como resultado propiedades reológicas mejoradas tales como VA y YP. Además, las NP ayudaron a recuperar la pérdida de propiedades como la viscosidad, YP y GS que pudieron haberse producido debido a la degradación del polímero durante el laminado en caliente. También mostraron características de agente floculante para mejorar el YP y reducir la permeabilidad de la torta de filtración, lo que provocó una reducción en FL. Finalmente concluyen que estas nanopartículas son compatibles con el lodo de perforación a base de agua e imparten un cambio positivo en las características del lodo.

Diversos autores documentan el uso de otras nanopartículas, sin embargo, se busca recurrir a nuevas tecnologías y aplicar otros nanomateriales que permitan crear fluidos mejorados, modificando la reología y mejorando así el rendimiento de los procesos de perforación. Los nanocables metálicos (NW) unidimensionales son nanomateriales con muchas propiedades únicas diferentes de su forma a granel. Además, se han obtenido buenos resultados al implementarlos en diversas aplicaciones, entre ellas se encuentran la electrónica, óptica, catalizadores y sensores (Cui et al., 2017).

Los nanocables de cobre (CuNW) sobresalen como excelentes candidatos para su uso en lodos de perforación, debido a que el cobre exhibe alta conductividad eléctrica, conductividad térmica, maleabilidad y ductilidad. Esto se debe a que se encuentra ubicado en el grupo 11 de la tabla periódica al igual que el oro (Au) y la plata (Ag), por lo que posee propiedades similares debido a su configuración electrónica y estructura cristalina cúbica centrada en las caras (FCC), (Bhanushali et al., 2015). Además, comparado con la Ag, es solo un 6% menos conductor, 1000 veces más abundante y 100 veces menos costoso (Nam & Lee, 2016).

Se han informado varios métodos para la síntesis de CuNW, como la deposición química de vapor, la descomposición térmica al vacío y el electro-spinning. Sin embargo, los métodos de solución química (CSM), incluida la síntesis hidrotermal, la reducción de una solución precursora y la síntesis catalítica han surgido como rutas importantes y principales para la síntesis de NW. Los CSM tienen varias ventajas. Menos restricciones con respecto a la selección de precursores y las condiciones de los disolventes y reacciones, y la viabilidad de la producción a gran escala. Todos los CSM son similares en el sentido de que utilizan un agente reductor para reducir los iones metálicos en átomos y un agente de protección para llevar los átomos metálicos a NW (Nam & Lee, 2016).

Para reducir un ion o complejo de iones de cobre se utilizan ligandos protectores con agentes reductores eficientes que incluyen aminas primarias, glucosa, ácido ascórbico, hidracina, silanos, o mediante métodos asistidos por catalizadores. Siempre se busca la monodispersión, la alta relación de aspecto, la controlabilidad de diámetro y los bajos costos. Para obtener un mejor control sobre la morfología de los NW sintetizados, es indispensable que la tasa de nucleación sea controlada y, por lo tanto, la elección del agente reductor debe considerarse cuidadosamente (Cui et al., 2017).

En consecuencia, en este trabajo de investigación se sintetizaron CuNW mediante una reducción en solución acuosa utilizando hidracina como agente reductor y se preparó un lodo de perforación base agua con diferentes concentraciones de este material. Finalmente, se le determinaron algunas propiedades reológicas y de filtrado tales como viscosidad plástica (VP), viscosidad aparente (VA), punto cedente (YP), resistencia de gel (GS) y pérdida de fluido (FL).

1. Marco de Referencia

1.1 Lodos de perforación

El fluido o lodo de perforación es un sistema químico complejo que circula en el pozo para llevar a cabo una operación de perforación rentable y eficiente que dé como resultado en un pozo estable y calibrado a una profundidad específica con el mínimo daño posible a las formaciones (Gandhi & Sarkar, 2016). Dentro de las funciones de este fluido se encuentran el enfriamiento y lubricación de la superficie de la broca de perforación, la limpieza del pozo mediante el transporte de fragmentos de roca fuera de este, la estabilización de sus paredes, minimizando el daño de la formación mediante la creación de un revoque de filtración adecuado en las paredes del pozo y controlando la presión del subsuelo para evitar la invasión de fluidos de formación en el pozo, minimizando así los riesgos de reventón (Al-Shargabi et al., 2022).

Los lodos de perforación se clasifican según su base o constituyente mayoritario (Tabla 1). En los lodos a base de agua, las partículas sólidas se suspenden en agua o salmuera. En los lodos a base de aceite, las partículas sólidas se suspenden en aceite. Cuando el constituyente principal es gas, los recortes de perforación se eliminan mediante una corriente de aire o gas natural a alta

velocidad y se agregan agentes espumantes para eliminar pequeñas entradas de agua (Caenn et al., 2011).

Tabla 1

Clasificación de lodos de perforación acorde a su constituyente principal

Gas	Agua	Aceite
Aire, gas natural, gas de combustión	Agua dulce	Diesel o crudo
<p>Niebla: Gotas de agua o lodo transportadas por la corriente de aire.</p> <p>Espuma: Burbujas de aire rodeadas por una película de agua que contiene tensioactivo estabilizador de espuma.</p> <p>Espuma estable: Materiales reforzantes de película que contienen espuma, como polímeros orgánicos y bentonita.</p>	<p>Soluciones: fluidos con sólidos disueltos como sales, surfactantes o coloides orgánicos como polímeros.</p> <p>Emulsión: Pequeñas gotas de un líquido aceitoso suspendidas en agua por un emulsionante.</p> <p>Lodo: suspensión de sólidos (barita, arcillas) y aditivos químicos en cualquiera de los líquidos anteriores.</p>	<p>Lodo a base de aceite: contiene agentes emulsionantes de agua, agentes de suspensión y controladores de filtración.</p>

Nota. Adaptada de “Chapter 1 - Introduction to Drilling Fluids” por R. Caenn, H.C. H. Darley and G. R. Gray, 2011, Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids (Sixth Edition), pp. 1-37

1.1.1 Lodos a base de agua (WBM)

En este tipo de lodo, los aditivos se suspenden en agua o salmuera. Los sólidos consisten en arcillas, coloides orgánicos, minerales pesados y rocas de formación que se han triturado durante la perforación. Estos aditivos proporcionan propiedades importantes en el lodo en términos de viscosidad, filtrado y densidad (Caenn et al., 2011).

1.1.2 Formulación del lodo de perforación

A lo largo de los años se ha desarrollado un número considerable de formulaciones de lodos de perforación para adaptarse a diversas condiciones del subsuelo. La selección del mejor lodo para cumplir estas condiciones minimizará los costos del pozo y reducirá el riesgo de que se presente pérdida de circulación y atascamiento en la tubería de perforación (Caenn et al., 2011). Algunos aspectos críticos requieren atención y control para la efectividad del lodo de perforación. Uno de los principales aspectos es el daño a la formación, que se refiere a la reducción de la capacidad natural de un yacimiento para producir fluidos debido a una reducción de la porosidad, la permeabilidad o ambas. Esto puede ocurrir por la distribución inadecuada del tamaño de las partículas en el lodo de perforación que provocan el taponamiento de los poros de la formación debido a la invasión de filtrados y/o finos (Ghosh et al., 2020).

Los fluidos drill-in están diseñados para que principalmente no sean dañinos a la formación productora, se presten para fácil limpieza y sean efectivos con relación al costo. Estos sistemas están diseñados para proveer el índice de filtración más bajo posible. El puenteo (obstrucción de los poros de la formación debido al alojamiento de sólidos) de la zona de producción es la clave para evitar daños a la formación. Los materiales de puenteo que se utilizan en los fluidos drill-in incluyen carbonato de calcio (CaCO_3) dimensionado (Baroid, 2000).

Los aditivos poliméricos, como la celulosa polianiónica (PAC), el almidón, entre otros, se utilizan para generar una torta delgada con baja permeabilidad, lo que provoca una reducción en la pérdida de filtrado al impedir el flujo del lodo hacia las paredes del pozo (William et al., 2014). Polímeros como la goma xantana (GX), se utilizan generalmente como viscosificantes debido a su estructura molecular y configuración química. La GX es un polisacárido aniónico con una cadena principal de β -(1,4)-D-glucosa sustituida cada dos unidades con por una cadena lateral de

adelgazamiento por cizallamiento, es decir, disminución de la viscosidad al aumentar la tasa de corte (Kennedy et al., 2015).

1.1.3 Propiedades reológicas de los lodos de perforación

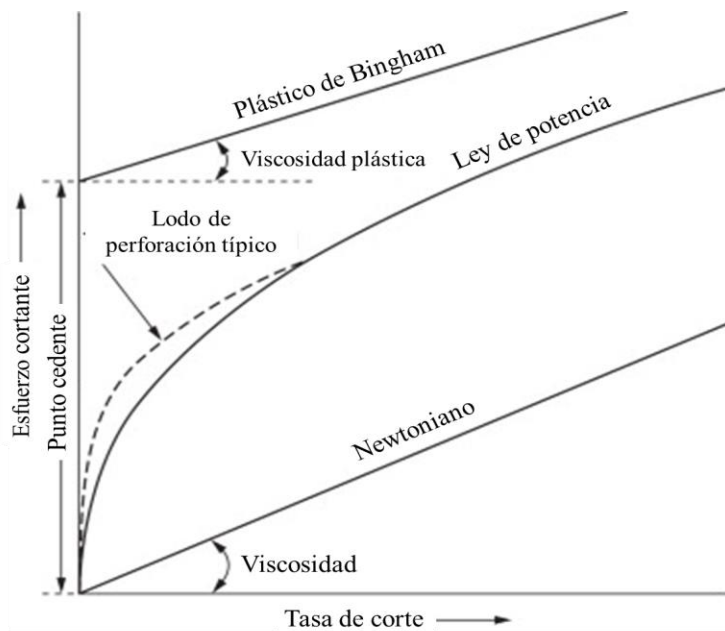
La reología es el estudio de la deformación y el flujo de materia. El comportamiento del flujo reológico de cualquier fluido se explica en términos de la relación entre el esfuerzo cortante (shear stress, τ) y la tasa de corte (shear rate, γ). El esfuerzo cortante se define como la fuerza tangencial aplicada por unidad de área y la tasa de corte se indica como el cambio de la tensión cortante por unidad de tiempo. La relación entre el esfuerzo cortante y la tasa de corte se conoce como viscosidad (η), que también se puede definir como una medida de resistencia ofrecida por las capas adyacentes entre sí durante el flujo de la suspensión líquida (Sharma et al., 2016).

El comportamiento de un fluido puede clasificarse como newtoniano y no newtoniano. Para el comportamiento newtoniano, la viscosidad permanece constante. La tasa de corte y el esfuerzo exhiben una relación lineal, mientras que, para el comportamiento no newtoniano, la viscosidad puede variar con la tasa de corte (Sharma et al., 2016).

Los lodos de perforación comúnmente presentan adelgazamiento por cizallamiento, es decir, la viscosidad disminuye con el aumento de la tasa de corte. Se utilizan varios modelos para describir el comportamiento del esfuerzo cortante frente a la tasa de corte de los fluidos (Figura 2). Los más utilizados son el plástico de Bingham, ley de potencia y Herschel-Bulkley.

Figura 2

Comparación del comportamiento reológico de varios modelos de flujo



Nota. Adaptada de “Chapter 1 - Introduction to Drilling Fluids” (p. 9), por R. Caenn, H.C. H. Darley and G. R. Gray, 2011, *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids* (Sixth Edition).

En el modelo plástico de Bingham, se requiere un valor mínimo en el esfuerzo cortante para que comience el flujo, el punto cedente (YP). Posteriormente, luego de alcanzar el YP, el flujo es similar al de un fluido newtoniano, porque la viscosidad es constante y no varía con la tasa de corte. El YP es una función del comportamiento electroquímico o el efecto de los polímeros de cadena larga en el fluido. La viscosidad plástica (VP) es otro parámetro de este modelo y representa la viscosidad de un lodo cuando se extrapola a una velocidad de corte infinita. Este parámetro depende de la viscosidad de la fase líquida y del tamaño, forma y número de partículas (Growcock & Harvey, 2005).

En el modelo de ley de potencia la relación entre esfuerzo cortante y tasa de corte tiene un comportamiento exponencial. Este modelo proporciona información precisa a tasa de corte bajo, sin embargo, tiene deficiencias cuando modela los fluidos a tasas de corte altas. El modelo de Herschel-Bulkley se adapta a la existencia de un punto de fluencia (modelo plástico de Bingham), así como a la no linealidad de la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte (modelo ley de potencia), por esta razón, da como resultado modelos precisos del comportamiento reológico cuando se dispone de datos experimentales adecuados (Baba Hamed & Belhadri, 2009).

Para medir la viscosidad aparente (VA), viscosidad plástica (VP), punto cedente (YP) y resistencia de gel (GS) se siguen los estándares recomendados por el American Petroleum Institute (API RP 13B-1, 2009).

1.1.3.1 Viscosidad aparente (VA)

La viscosidad aparente es la relación entre el esfuerzo cortante y la tasa de corte y, para los fluidos no newtonianos, depende de la tasa de corte (Perween et al., 2019). Esta propiedad se expresa en centipoise (cP) y se halla mediante la ecuación 1.

$$VA = \frac{\Phi_{600}}{2} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde, Φ_{600} es la toma de la lectura a 600 rpm

1.1.3.2 Viscosidad plástica (VP)

La viscosidad plástica es la resistencia al flujo causada por la fricción mecánica y se ve afectada por la concentración, tamaño y forma de los sólidos. La medición de esta propiedad se logra mediante la ecuación 2. Esta propiedad se expresa en centipoise (cP).

$$VP = \Phi_{600} - \Phi_{300} \quad (\text{Ecuación 2})$$

1.1.3.3 Punto cedente (YP)

El punto de cedente es el esfuerzo mínimo requerido para iniciar el flujo. Esta propiedad se expresa en libras-fuerza por cien pies cuadrados ($\text{lb}/100 \text{ ft}^2$) y se calcula mediante la ecuación 3.

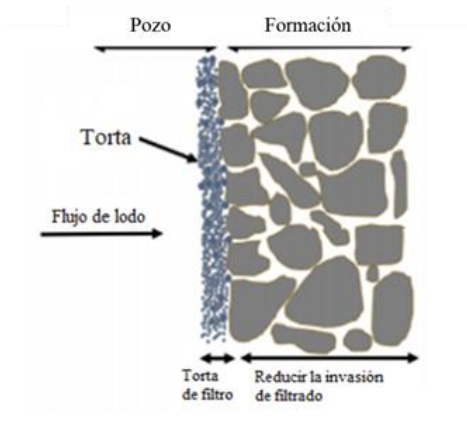
$$YP = \Phi_{300} - VP \quad (\text{Ecuación 3})$$

1.1.3.4 Resistencia de gel (GS)

La resistencia de gel es utilizada para definir las propiedades tixotrópicas del lodo de perforación. Se indica mediante la desviación máxima del cuadrante a 3 rpm, después de encender el viscosímetro rotacional, cuando el fluido ha estado en reposo durante un período de 10 s, 10 min y 30 min. Lo anterior se conoce como resistencia de gel de 10 s (Gel 10 s), resistencia de gel de 10 minutos (Gel 10 min) y resistencia de gel de 30 minutos (Gel 30 min), respectivamente. Esta propiedad se expresa en libras-fuerza por cien pies cuadrados ($\text{lb}/100 \text{ ft}^2$) (Perween et al., 2019).

1.1.4 Pérdida de filtrado (FL)

Un requisito importante para completar con éxito el pozo es que el lodo tenga la capacidad de sellar las formaciones permeables expuestas por la barrena con una torta de filtración delgada y de baja permeabilidad. Si esta torta no se forma, el lodo invadirá continuamente las formaciones permeables. Para que se forme esta torta es esencial que el lodo contenga algunas partículas de un tamaño ligeramente más pequeño que el de las aberturas de los poros de la formación (Figura 3). La permeabilidad de la torta de filtración depende de la distribución del tamaño de las partículas y de las condiciones electroquímicas. En general, cuantas más partículas haya en el rango de tamaño coloidal, menor será la permeabilidad de la torta (Caenn et al., 2011).

Figura 3*Formación de una torta de filtración*

Nota. Adaptada de “Enhancing the properties of water based drilling fluid using bismuth ferrite nanoparticles” (p. 175), por S. Perween, N. K. Thakur, M. Beg, S. Sharma, & A. Ranjan, 2019. Colloids and Surfaces. A, Physicochemical and Engineering Aspects, 561.

La medición del comportamiento de filtración y las características de la torta son fundamentales para el tratamiento y control de un lodo de perforación. La formulación del lodo se analiza con una filtro-prensa API estándar para determinar la pérdida de filtrado. Este es el volumen de fluido recibido a través de un papel de filtro después de 30 minutos a temperatura ambiente y presión de 100 psi según las especificaciones API (API RP 13B-1, 2009).

1.2 Nanotecnología

La nanotecnología es el estudio de la ciencia de los materiales a nanoescala, es decir, con dimensiones entre 1 y 100 nm, también es el estudio de la manipulación de la materia en escala atómica y molecular (Horikoshi & Serpone, 2013). Las propiedades de la materia a nanoescala son diferentes de las de una escala mayor. Cuando el tamaño cae por debajo de 100 nm, pueden ocurrir cambios dramáticos en las propiedades.

La fabricación a nanoescala se logra utilizando un enfoque bottom–up (de abajo hacia arriba) o top–down (de arriba hacia abajo) para la producción de nanomateriales, estructuras, dispositivos y sistemas. En el enfoque bottom–up, las características a nanoescala se construyen principalmente a partir de sus constituyentes elementales. Los constituyentes elementales se combinan mediante varios procesos de nanofabricación, incluidos el autoensamblaje, síntesis química, litografía de nanoimpresión, entre otras. La síntesis química se lleva a cabo utilizando precursores gaseosos y disolventes. Estos químicos reaccionan para producir nanoestructuras.

El enfoque top–down utiliza tecnologías de fabricación litográficas y no litográficas. La tecnología litográfica es una tecnología subyacente para fabricar chips y componentes semiconductores. Las continuas mejoras en la litografía para su uso en la producción de nanocomponentes han resultado en anchos de línea tan pequeños como 10 nanómetros. El enfoque top–down se usa comúnmente para fabricar componentes de micro y nanosistemas, que varían en tamaño desde micro hasta nanómetros (Bhushan, 2017).

Debido a su tamaño a nanoescala y su gran área de superficial, los nanomateriales exhiben propiedades físicas y químicas especiales. La nanotecnología tiene aspectos amplios y prometedores hacia una amplia gama de aplicaciones en campos emergentes de la ciencia y la tecnología. Esta es útil en diversas áreas, como la ciencia médica, farmacéutica, alimentaria, biotecnología, medio ambiente, electrónica, ciencia de los materiales, informática, defensa, aeroespacial, transporte y energía (Dulta et al., 2022).

Otras aplicaciones de los nanomateriales es su uso potencial en la industria del petróleo para mejorar el rendimiento de varios procesos, como exploración, perforación y terminación, producción y operaciones mejoradas de recuperación de petróleo. Por ejemplo, se han utilizado para mejorar los diseños de materiales y así resistir la corrosión y/o la erosión, mejorar la

recuperación de petróleo y/o gas, desplegar nanosensores y nanorrecubrimientos para evitar la adhesión de depósitos no deseados, entre otras (Al-Shargabi et al., 2022).

En los procesos de perforación, se han usado en la preparación de nanofluidos. Un nanofluido es una suspensión coloidal diseñada mediante la dispersión de partículas (como nanopartículas, nanofibras, nanotubos, nanocables y nanovarillas) en un fluido base, como agua, etilenglicol, aceite o una solución de polímero. En comparación con el fluido base, presentan propiedades termofísicas distintivas y mejoradas, entre las que se encuentran la conductividad térmica, conductividad eléctrica y viscosidad (Ponmani et al., 2014).

1.2.1 Nanocables de cobre

Las nanoestructuras metálicas 1D, como las nanovarillas (NR), los nanocables (NW) y los nanotubos (NT), se han tenido un papel fundamental en diversas aplicaciones, incluidas la micro/nanoelectrónica, optoelectrónica, catalizadores y sensores debido a su distinguida conductividad eléctrica, flexibilidad mecánica, características térmicas y catalíticas (Zhao et al., 2018). Un ejemplo, son los nanocables de oro, plata y cobre que han atraído gran atención en los últimos años debido a sus propiedades físicas inusuales, a la vez que sus posibles aplicaciones en sensores químicos, biológicos e interconectores para dispositivos electrónicos y optoelectrónicos a nanoescala (Shi et al., 2005). Sin embargo, el cobre es un candidato prometedor ya que se destaca por su alta conductividad intrínseca cuando se utilizan en electrodos basados en nanocables (solo superada por la plata) y por su abundancia en la tierra (1000 veces más abundante que la plata). También, se han dedicado esfuerzos a la preparación de nanocables de cobre ya que se ha observado que el cobre a granel exhibe una conductividad térmica y eléctrica más alta que muchos otros metales, además se ha utilizado comúnmente como interconector en circuitos electrónicos (Cui et al., 2015).

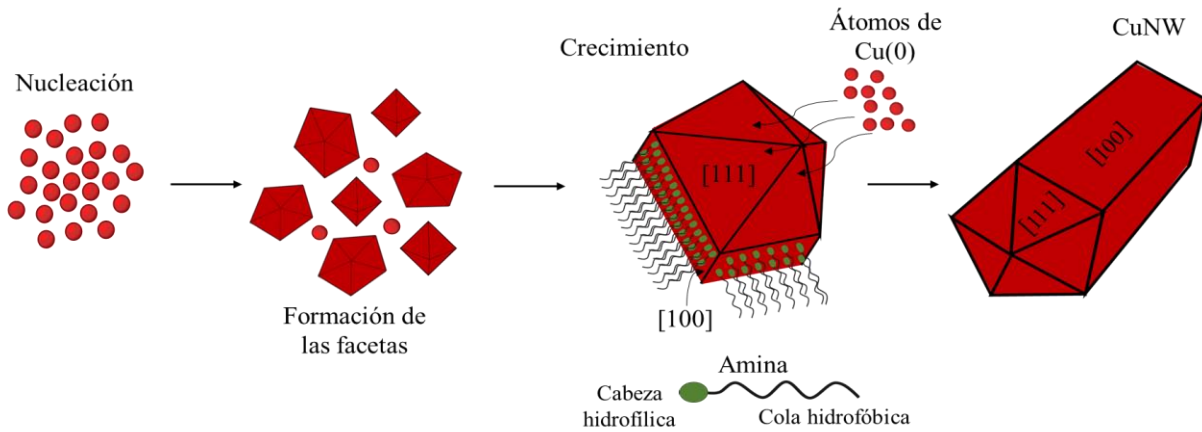
1.2.1.1 Métodos de síntesis

Se han informado varios métodos para la síntesis de nanocables de Cu, como la deposición química en fase de vapor, la descomposición térmica al vacío y el electrohilado. Los métodos de solución química (CSM), incluida la síntesis hidrotermal, la reducción de una solución precursora y la síntesis catalítica han surgido como rutas importantes y principales para la síntesis de nanocables (Nam & Lee, 2016).

En el caso de la síntesis de CuNW por reducción de un precursor de cobre en solución acuosa mediando su crecimiento con etilendiamina (EDA), se requiere un corto tiempo de reacción y se puede realizar a presión atmosférica y temperatura de ~ 60 °C. En esta síntesis se utiliza una solución concentrada de hidróxido de sodio (NaOH), nitrato de cobre como fuente de iones Cu^{2+} , hidracina (N_2H_4) y etilendiamina (EDA). La solución concentrada de NaOH proporciona un entorno de pH adecuado para que se produzca la reacción redox y evita la formación de precipitado de hidróxido de cobre ($\text{Cu}(\text{OH})_2$) ya que permite la formación del complejo tetrahidratado de cobre ($\text{Cu}(\text{OH})_4^{2-}$) debido a la hidrólisis repetida del cobre (Maji & Chakraborty, 2019). Se ha reportado que este complejo presenta una coloración azul en la solución y permanece después de agregar la EDA, sin embargo, al agregar N_2H_4 como agente reductor, la coloración desaparece y se formaron burbujas debido a la reducción de $\text{Cu}(\text{OH})_4^{2-}$ a $\text{Cu}(\text{OH})_2^-$. Luego ocurre la reducción lenta de este complejo permitiendo la generación de semillas que se unen para formar los nanocables (Figura 4). Estudios demuestran que la EDA induce la anisotropía mediante la unión específica a las facetas cristalinas (100) y por tanto la reducción de $\text{Cu}(\text{OH})_4^{2-}$ es la reacción dominante en Cu(111) (Kim et al., 2017).

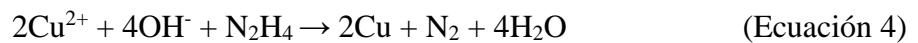
Figura 4

Formación de los CuNW



Nota. Adaptada de “1D Copper Nanostructures: Progress, Challenges and Opportunities” (p. 1235), por S. Bhanushali, P. Ghosh, A. Ganesh & W. Cheng, (2015). Small (Weinheim an Der Bergstrasse, Germany), 11(11).

La reacción principal que tiene lugar para formar CuNW se basa en la reacción redox que se muestra en la Ecuación 4, donde ocurre la reducción de iones Cu^{2+} (agente oxidante) por la N_2H_4 que actúa como agente reductor.



1.3 Sistemas dispersos

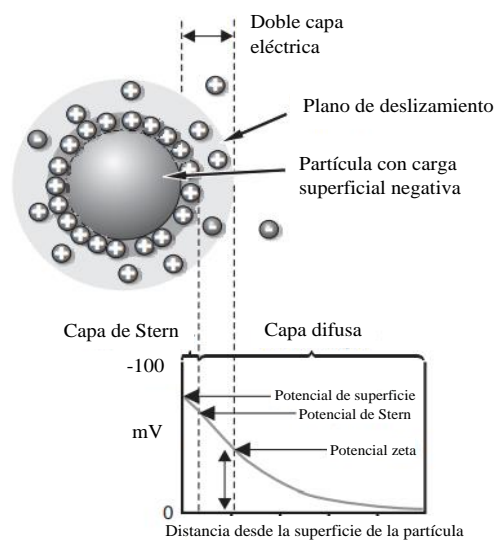
Hay diferentes tipos de sistemas dispersos que se pueden formar dependiendo de la naturaleza de la fase dispersa y del dispersante. Un ejemplo de estos sistemas son las suspensiones, en las cuales, partículas sólidas se encuentran dispersas en una fase líquida. Si estas partículas tienen dimensiones entre 1 nm a 1 μm se clasifican como sistemas coloidales, si tienen dimensiones mayores a 1 μm la suspensión es una mezcla heterogénea. Estas partículas presentan propiedades

en su interfaz que hacen que se separen del medio en el que se encuentran, ya sea para formar agregados o para permanecer como partículas individuales en el sistema (Tadross, 2011).

Las partículas pueden generar una carga superficial que afecta la distribución de iones en la región interfacial circundante, esta carga se compensa cerca de la interfaz por lo que se desarrolla una doble capa. Una región interna llamada capa Stern donde los iones están fuertemente unidos y una región externa difusa donde los iones están menos unidos. Dentro de la capa difusa hay un límite teórico dentro del cual los iones y las partículas forman una entidad estable. Cuando una partícula se mueve (por ejemplo, debido a la gravedad), hay iones de la capa difusa que se mueven con la nanopartícula y otros que permanecen con el dispersante. Este límite se denomina plano de deslizamiento en el cual existe un potencial electrostático denominado potencial zeta. Este último está relacionado con la carga superficial de la nanopartícula (Figura 5) (Malvern Instruments, 2004).

Figura 5

Diagrama de potencial zeta en nanopartículas



Nota. Adaptada de “Zetasizer Nano Series User Manual” (p. 232), por Malvern Instruments Ltd. (2004).

La estructura de la región interfacial determina la interacción entre partículas en un sistema disperso. Cuando dos partículas tienen sus capas dobles extendidas y se acercan a una distancia en la que las partes difusas de las capas dobles comienzan a superponerse, se produce una fuerte repulsión, esto debido a que las capas dobles ya no pueden desarrollarse sin restricciones. Sin embargo, las partículas también presentan fuerzas de atracción, estas son las de Van der Waals. Por ejemplo, si hay efectos de adsorción en el sistema (capas adsorbidas de polímeros) la interacción de superposición entre las capas dobles o las capas adsorbidas conducirá a una repulsión y por tanto a un sistema coloidalmente estable. Por otro lado, si la energía repulsiva no es suficientemente grande, la atracción de van der Waals dominará la interacción y resultará un sistema agregado. Estas interacciones determinan las características reológicas del sistema (Tadross, 2011).

Dentro de las interacciones intermoleculares denominadas fuerzas de van der Waals se encuentran las fuerzas dipolo-dipolo, dipolo-dipolo inducido y las fuerzas de dispersión. Las fuerzas dipolo-dipolo son las fuerzas de atracción entre moléculas polares, es decir, entre moléculas que poseen momentos dipolares. El puente de hidrógeno es un tipo de interacción dipolo-dipolo. La interacción dipolo-dipolo inducido ocurre por la interacción atractiva entre una molécula polar y un dipolo inducido. Si una molécula polar se acerca a una molécula no polar, la distribución electrónica de la molécula no polar se distorsiona por la fuerza que ejerce la molécula polar. Esta proximidad provoca la separación de sus cargas positiva y negativa a lo que se le llama dipolo inducido. Cuando los iones y dipolos se atraen entre sí mediante fuerzas electrostáticas se conocen como fuerzas ion-dipolo, pero no son fuerzas de van der Waals. En las fuerzas ion-dipolo, se atraen entre sí un ion y una molécula polar. La intensidad de esta interacción depende de la

carga y el tamaño del ion, la magnitud del momento dipolar y el tamaño de la molécula (Chang & Goldsby, 2013).

1.4 Técnicas instrumentales

1.4.1 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

El método de microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) proporciona imágenes de la morfología externa de los sólidos. Para obtener una imagen por este método, se enfoca un haz de electrones muy fino sobre la superficie de la muestra sólida. En este proceso se producen varios tipos de señales desde la superficie, incluidos electrones retrodispersados, secundarios y Auger, fotones debidos a la fluorescencia de rayos X y otros fotones de diversas energías. Todas estas señales se han utilizado en estudios de superficies. En los instrumentos para microscopía electrónica de barrido los electrones retrodispersados y secundarios se detectan y se utilizan para construir la imagen (Skoog et al., 2008).

1.4.2 Difracción de rayos X (DRX)

La difracción de rayos X (DRX) proporciona información sobre estructuras, fases, orientaciones cristalinas y otros parámetros estructurales de una muestra cristalina. Los picos de difracción de rayos X se producen por la interferencia constructiva de un haz monocromático de rayos X dispersados en ángulos específicos desde cada conjunto de planos reticulares en la muestra, sus intensidades están determinadas por la distribución de átomos dentro de la red. Estos rayos X son generados por un tubo de rayos catódicos, filtrados para producir radiación monocromática, colimados para concentrarlos y dirigidos hacia la muestra. Las condiciones para que tenga lugar una interferencia constructiva ocurre cuando las condiciones cumplen la ley de Bragg:

$$n\lambda=2d \text{ Sen}\theta \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde n es un número entero, λ es la longitud de onda de los rayos X, d es el espacio interplanar que genera la difracción y θ es el ángulo de difracción. Esta ley relaciona la longitud de onda de la radiación electromagnética con el ángulo de difracción y el espaciado de la red en la muestra cristalina. Estos rayos X difractados luego se detectan, procesan y cuentan. La conversión de los picos de difracción a espacios d permite la identificación del compuesto ya que cada compuesto tiene un conjunto de espacios d únicos. Por lo general, esto se logra mediante la comparación de espacios d con patrones de referencia estándar (Bunaciu et al., 2015).

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Evaluar el efecto que tiene la adición de nanocables de cobre en las propiedades reológicas de un lodo de perforación base agua.

2.2 Objetivos Específicos

Preparar un lodo de perforación base agua.

Sintetizar nanocables de cobre por una ruta de reducción acuosa.

Caracterizar los nanocables de cobre por microscopía electrónica de barrido (SEM) y difracción de rayos X (DRX).

Evaluar el efecto de los nanocables sintetizados sobre la viscosidad plástica, viscosidad aparente, punto cedente, resistencia de gel y pérdida de filtrado del lodo de perforación.

3. Metodología

3.1 Materiales y reactivos

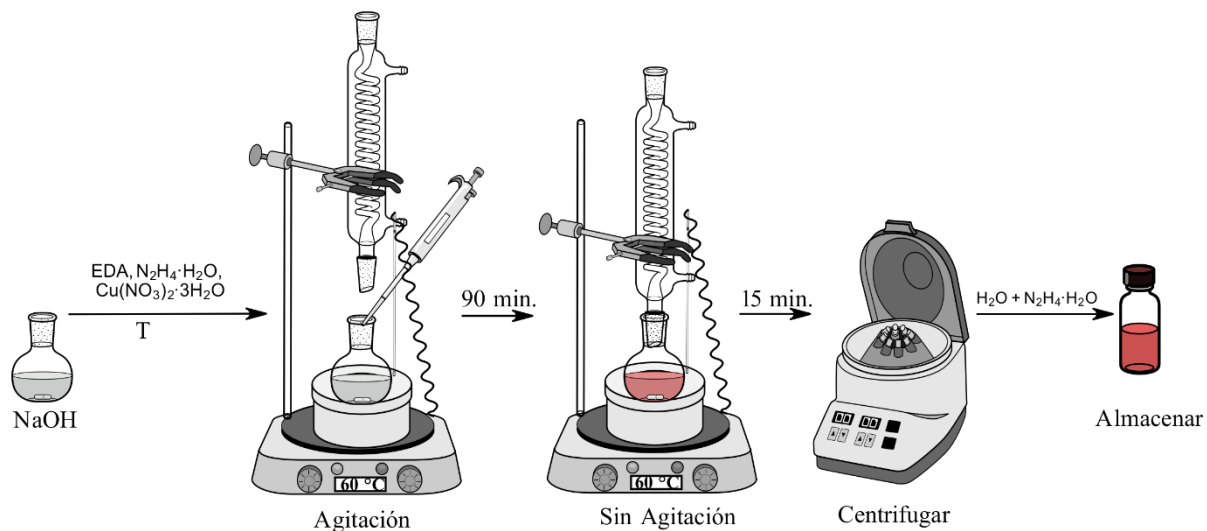
Nitrato de cobre trihidrato ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ de Merck), hidrato de hidracina ($\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 60% de Merck), etilendiamina (EDA de Merck), hidróxido de sodio en gránulos (NaOH de Merck), celulosa Polianiónica (PAC-L comercial), Goma Xantana (GX comercial), Carbonato de Calcio (CaCO_3 comercial) con distribución de partícula clasificadas en malla 600, 325 y 200 (M-600, M-325 y M-200 respectivamente). Estos materiales fueron suministrados por el Laboratorio de Espectroscopia Atómica y Molecular.

3.2 Síntesis de nanocables de cobre (CuNW) por ruta de reducción en solución acuosa

La síntesis de nanocables es realizada mediante una reducción acuosa con crecimiento anisotrópico mediado por etilendiamina (Maji & Chakraborty, 2019). Se prepararon 150 mL de una solución acuosa 15 M de hidróxido de sodio (NaOH) disolviendo 90 g de gránulos de NaOH en agua Tipo I en un balón de fondo plano de 250 mL. La solución se llevó a una temperatura de 60 ° C. A continuación, se añadió un total de 1,207 mL de EDA y se agitó a 900 rpm. Después de 2 min, se añadieron 240 μ L de solución de $N_2H_4 \cdot H_2O$ a la solución con agitación vigorosa. Luego de 2 min, se añadieron 7,5 mL de solución acuosa 0,1 M de $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$. Se continuó agitando durante otros 3 min y se detuvo la agitación. Se dejó reaccionar por 90 min. Los productos de cobre se centrifugaron, se lavaron y se almacenaron en una solución de agua-hidracina para evitar la oxidación. El esquema de la síntesis se muestra en la Figura 6.

Figura 6

Síntesis de nanocables de cobre por reducción acuosa



3.3 Caracterización de los nanocables de cobre (CuNW)

3.3.1 Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FE-SEM)

Para estudiar la morfología de los CuNW se tomaron imágenes con un Microscopio Electrónico de Barrido FEG (Field Emission Gun) QUANTA FEG 650. Las muestras se colocaron sobre stubs metálicos con cinta adhesiva de carbón y se recubrieron con oro. Las imágenes fueron tomadas a alto vacío, con un voltaje de aceleración de 25 kV, con detector de electrones secundarios (SE) (Everhart Thornley detector ETD) y electrones retrodispersados (BSE) (Back scattered electron detector (BSED) tipo SSD).

Para obtener información semi-cuantitativa de los elementos químicos se realizó análisis EDS (Energy-Dispersive Spectroscopy) donde se utilizó el detector EDAX APOLO X resolución de 126,1 eV (en. Mn $K\alpha$) y Software EDX Genesis.

3.3.2 Difracción de Rayos X (DRX)

El patrón de difracción de rayos X (DRX) se obtuvo con un difractómetro D8-Advance marca Bruker. El registro de datos se realizó en el rango de 4° (2θ) a 70° (2θ) con un tiempo por paso de 0,6 s y paso de $0,02035^\circ$ (2θ), la medida tuvo un tiempo de duración de 35 min.

3.3.3 Potencial zeta

Para evaluar la carga superficial de los CuNW se prepararon 3 dispersiones del nanomaterial a pH 7, 9 y 11. Las mediciones se realizaron mediante un analizador de potencial zeta (Nano Series, Malvern Instruments).

3.4 Preparación de la dispersión del nanomaterial

Se utilizaron 175 mg, 350 mg y 700 mg de los CuNW previamente sintetizados y liofilizados para preparar las dispersiones. Cada dispersión se realizó agregando a un tubo de centrifuga los CuNW con 35 mL de agua Tipo I, luego, el tubo de centrifuga se colocó en un baño

de ultrasonido hasta observar una dispersión homogénea. Finalmente, se añadieron 150 mg de GX a cada tubo y se volvieron a colocar en el baño de ultrasonido.

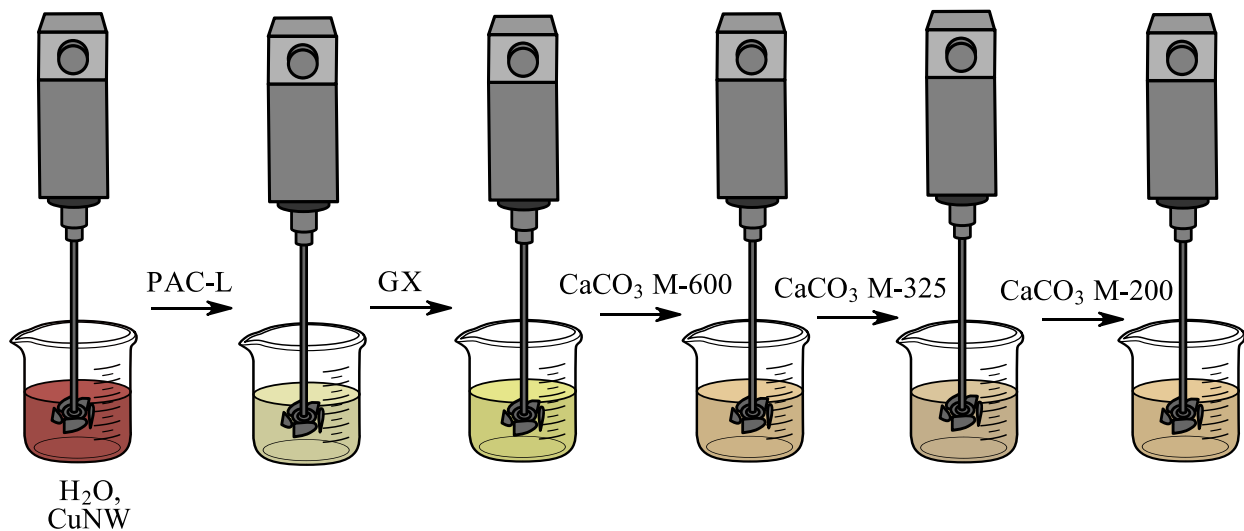
3.5 Preparación del lodo con nanomaterial

Para la preparación de 3 lodos de 350 mL con concentraciones de 500, 1000 y 2000 ppm de CuNW se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

Se agregó el contenido del tubo de centrifuga a un vaso de precipitado con 298 mL de agua Tipo I, se añadieron 3g de PAC-L y 1,35g de GX. Finalmente se agregó carbonato de calcio con 3 con distribuciones de partícula diferentes: 20 g de CaCO₃ M-600, 20 g de CaCO₃ M-325 y 6 g de CaCO₃ M-200 respectivamente. El esquema de la preparación se muestra en la Figura 7.

Figura 7

Esquema de preparación del lodo



3.6 Evaluación de las propiedades reológicas del lodo base y el lodo con CuNW

Los estudios reológicos se realizaron en un Viscotester IQ (Thermo Scientific) (Figura 8) usando la geometría de cilindro coaxial. Las propiedades reológicas del lodo de perforación se

realizaron a concentraciones de nanocables de 0, 500, 1000 y 2000 ppm a temperaturas de 25, 50, 65 y 80 °C.

Se colocaron aproximadamente 16 mL de cada muestra de lodo de perforación en la copa de prueba y su esfuerzo cortante se midió a tasa de corte de 600, 300, 200, 100, 60, 30, 6 y 3 rpm. Los valores medidos se utilizaron para calcular la viscosidad plástica (VP), la viscosidad aparente (VA) y el punto de cedencia (YP).

Luego, se realizaron mediciones a una tasa de corte de 3 rpm para medir el esfuerzo cortante después de que el lodo de perforación estuvo en reposo durante 10 s, 10 min y 30 min. Los valores obtenidos se utilizaron para calcular la resistencia de gel a los 10 s (Gel 10 s), 10 min (Gel 10 min) y 30 min (Gel 30 min), respectivamente. Estas propiedades se midieron según los estándares recomendados por el Instituto Americano del Petróleo en la Norma API RP 13B-1.

Figura 8

Viscotester IQ (Thermo Scientific)



3.7 Prueba de filtrado

La pérdida de fluido API se cuantificó recolectando el filtrado a 4, 5, 7,5; 10, 12,5; 15, 17,5; 20, 25 y 30 min según lo recomendado en la norma API RP 13-B1. Los estudios se llevaron a cabo a temperatura ambiente y a una presión de 100 psi en un filtro-prensa Fann 250 (Figura 9). La pérdida de fluido se midió a través del papel de filtro Whatmann grado 50 con un tamaño de poro de $3\mu\text{m}$.

Figura 9

Filtro-prensa Fann 250



4. Análisis de resultados

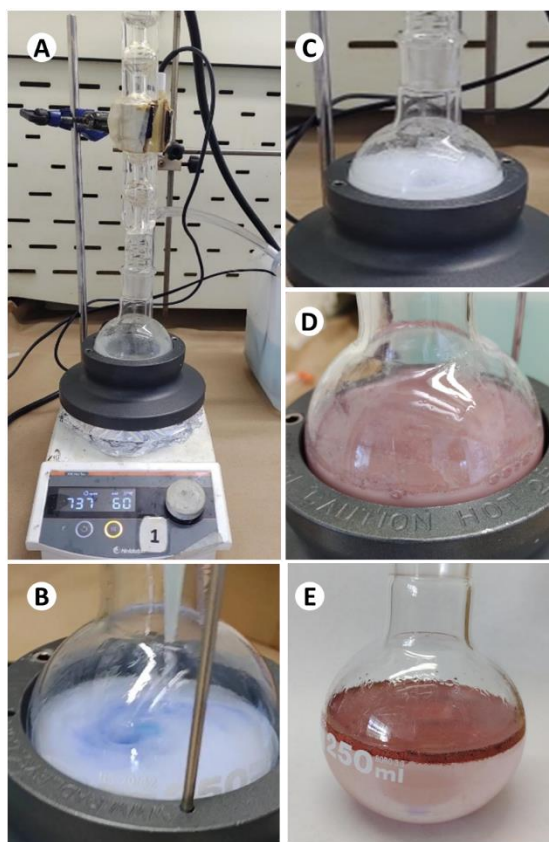
4.1 Síntesis y caracterización de los nanocables de cobre (CuNW)

Al balón de reacción se agregó la solución precursora que contenía NaOH, EDA e $\text{N}_2\text{H}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$ (Figura 10A). Al agregar la solución acuosa de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ se observa una coloración azul (Figura 10B) correspondiente a la formación del complejo tetrahidratado de cobre

$[\text{Cu}(\text{OH})_4]^{2-}$, esta coloración desaparece rápidamente mientras aparece una coloración blanca (figura 10C) esto puede ser debido a que la hidracina, presente en la mezcla de reacción, comienza a reducir este complejo y se da la formación de otro complejo, en este caso un complejo Cu(I)-EDA. Finalmente, al dejar reaccionar por 90 min, se observa la torta de nanocables sintetizados en la parte superior (Figura 10E) debido a la alta densidad de la solución y al atrapamiento de burbujas de nitrógeno.

Figura 10

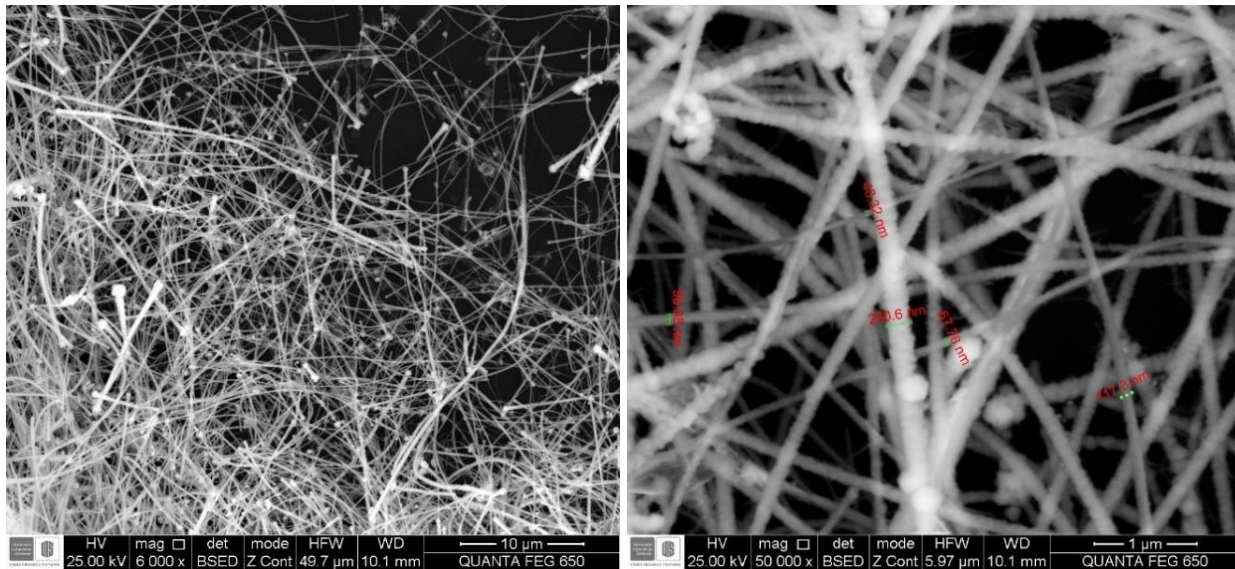
Montaje experimental de la síntesis de CuNW



Para obtener los CuNW se utilizaron 7,5 mL de solución 0,1 M de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, por lo que se esperaba obtener 47,66 mg de CuNW por cada síntesis, sin embargo, se obtuvo un rendimiento experimental entre el 70-80% debido a la pérdida de material al realizar los lavados. Los CuNW liofilizados se observan en la Figura 11.

Figura 11*CuNW liofilizados***4.1.1 Microscopia electrónica de barrido (SEM)**

En la Figura 12 se puede observar la morfología de los nanocables que tiene una estructura alargada 1D. Se observa que los CuNW presentan diámetros variables entre 40-260 nm.

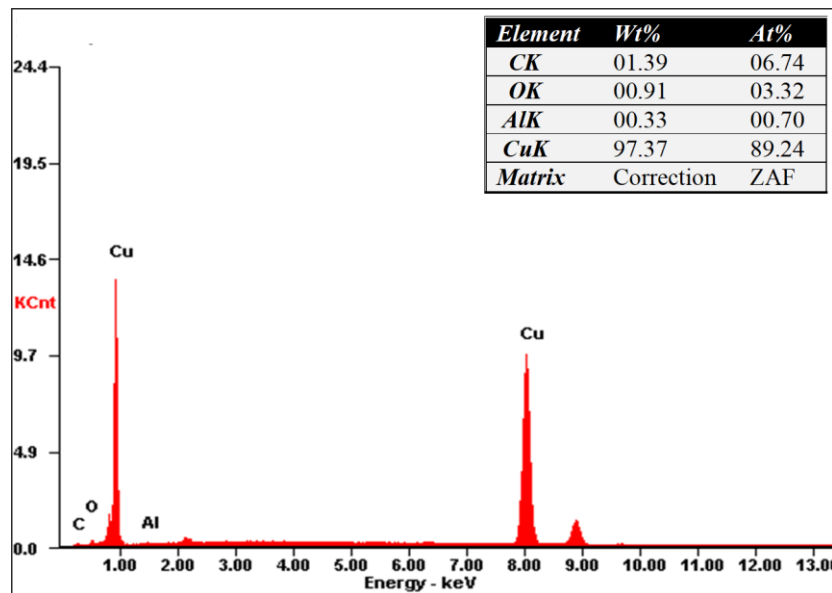
Figura 12*Micrografías de los CuNW*

El análisis elemental semicuantitativo (EDS) (Figura 13) reporta la presencia de cobre (Cu) que es el precursor de los nanocables; oxígeno (O) ya que el cobre tiende a oxidarse; carbono (C)

proveniente de la EDA o la cinta adhesiva de carbón sobre la que se coloca la muestra y aluminio (Al) que es una impureza reportada en el certificado de análisis del NaOH utilizado en la reacción.

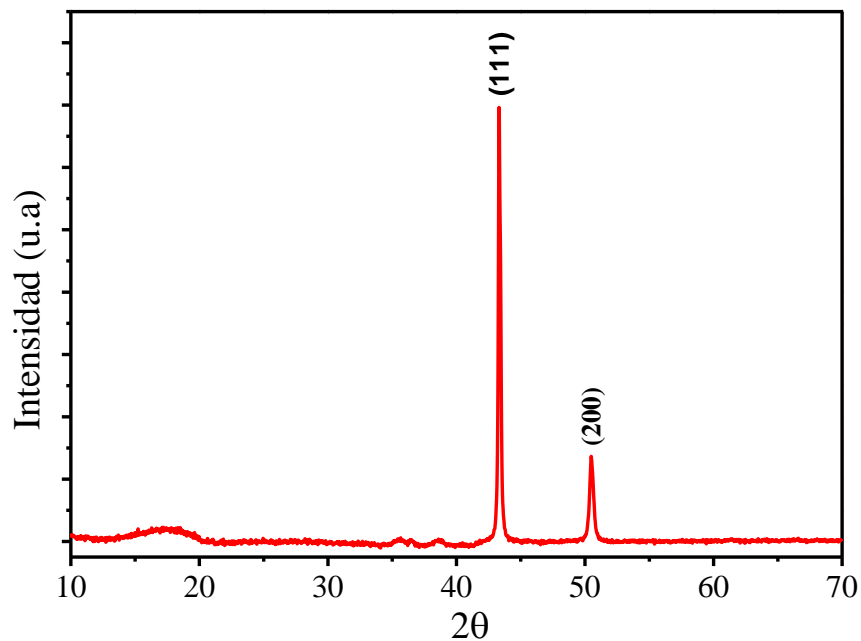
Figura 13

EDS de los CuNW



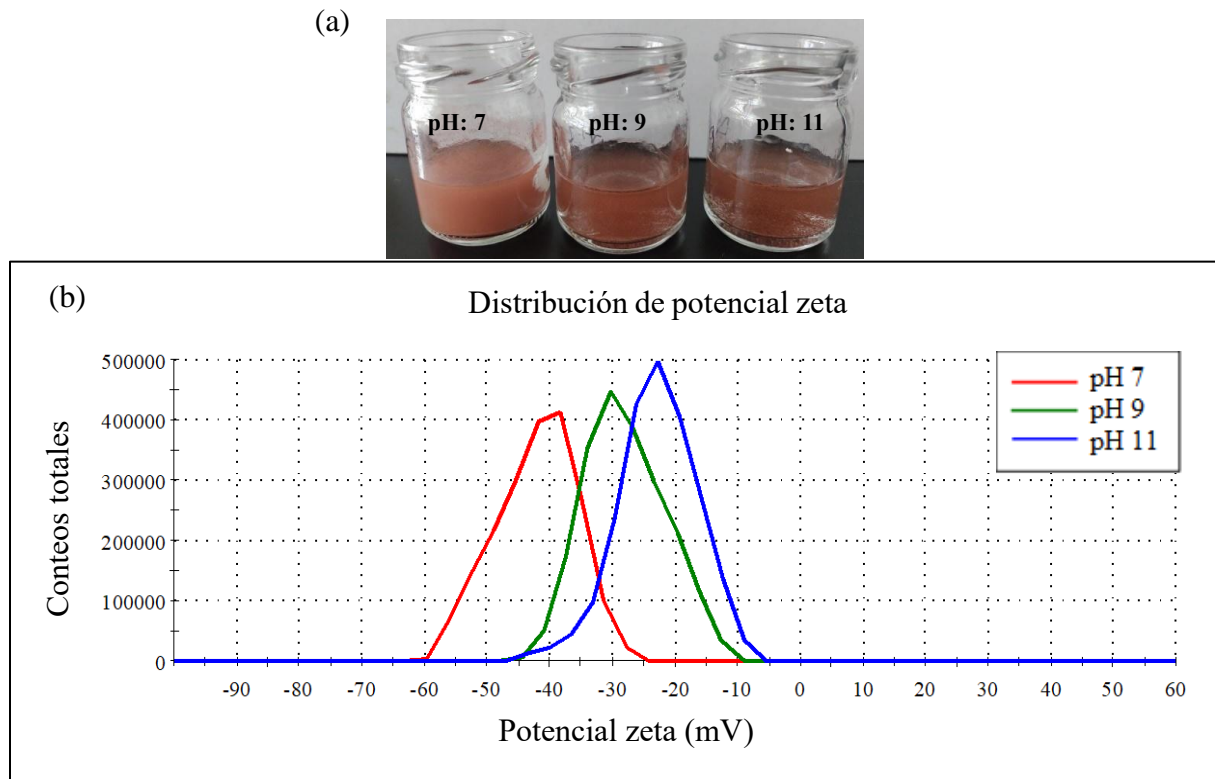
4.1.2 Difracción de rayos X (DRX)

En la Figura 14 se observa el patrón de difracción de los CuNW sintetizados el cual presenta dos señales características. La primera se observa a un ángulo $2\theta = 43,3^\circ$ correspondiente a la difracción en el plano (111) y la segunda se observa a un ángulo $2\theta = 50,5^\circ$ correspondiente a la difracción en el plano (200). La señal correspondiente a la difracción en el plano (111) presenta una mayor intensidad en relación con la señal (200) debido a que hay más cantidad de estos planos cristalinos en la estructura de los nanocables. Estos resultados son consistentes con los reportados en la literatura (Maji & Chakraborty, 2019).

Figura 14*Patrón de DRX de CuNW*

4.1.3 Potencial zeta

En la Figura 15a se observan las dispersiones realizadas a diferentes pH. En la Figura 15b se observan los resultados de las mediciones realizadas, estos muestran que los CuNW tienen un potencial zeta negativo de -42,1 mV, -28,0 mV y -22,7 mV a pH 7, 9 y 11 respectivamente. Las partículas con potencial zeta más negativo que -30 mV normalmente se consideran estables, lo cual es consistente con lo observado en las dispersiones realizadas, ya que se observa una mayor estabilidad en la dispersión a pH 7. Además, el potencial zeta obtenido a este pH tiene un valor de -42,1 mV.

Figura 15*Potencial zeta de los CuNW*

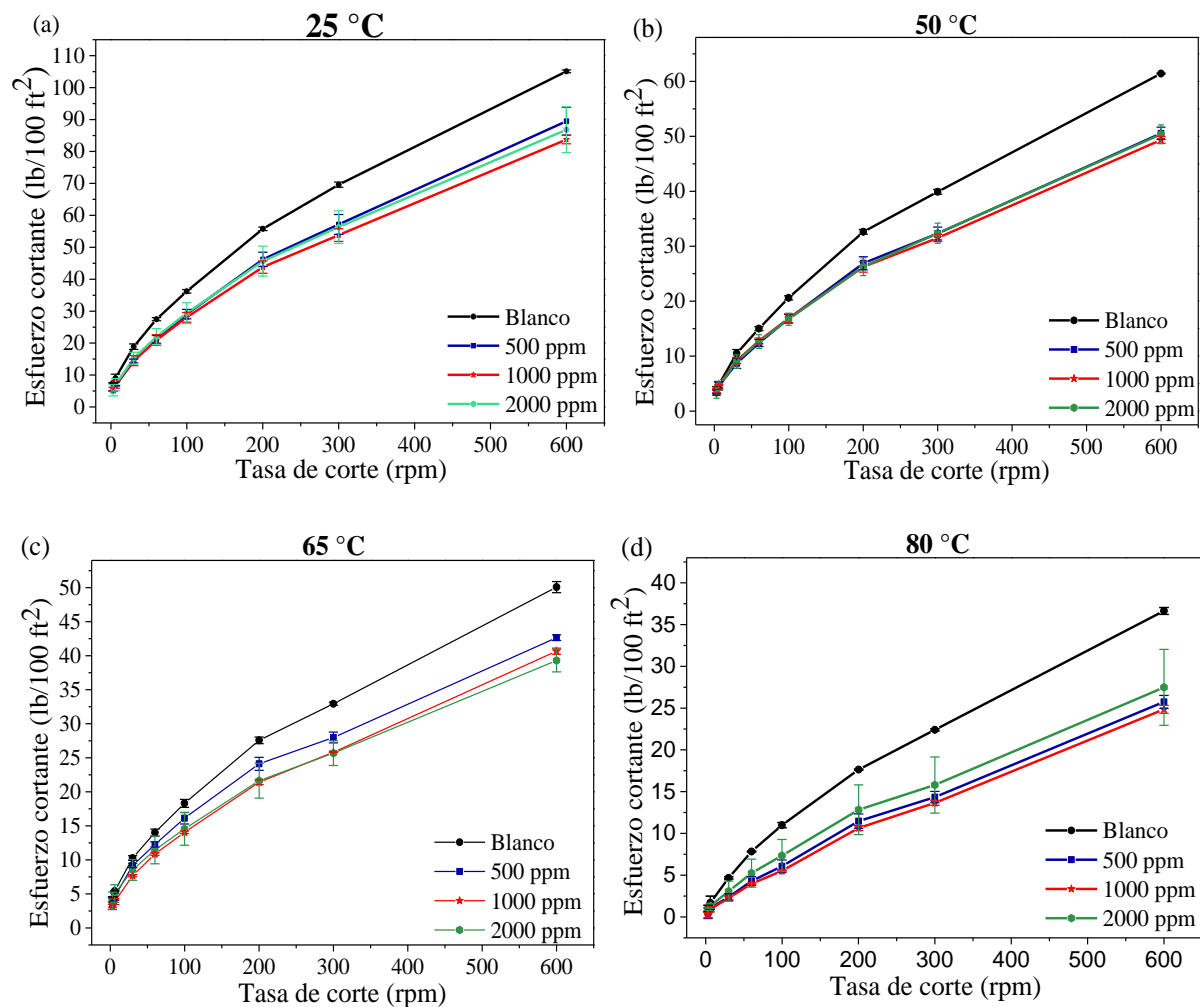
Nota. (a) Dispersiones de CuNW a pH 7, 9 y 11 (b) potencial zeta de las dispersiones de CuNW

4.2 Efecto de los CuNW en las propiedades reológicas y de filtrado del WBM

Se realizaron estudios reológicos a diferentes condiciones de temperatura (25, 50, 65 y 80 °C) al lodo base y al lodo con tres concentraciones de CuNW. Se compararon las propiedades reológicas como la viscosidad aparente (VA), la viscosidad plástica (VP), el punto cedente (YP) y la resistencia de gel (GS). Las relaciones esfuerzo cortante-tasa de corte se muestran en la Figura 16.

Figura 16

Reología



Nota. Variación del esfuerzo cortante con la tasa de corte del lodo base y el lodo con 500, 1000 y 2000 ppm de CuNW a (a) 25 °C, (b) 50 °C, (c) 65 °C, (d) 80 °C

Se observa que tanto el lodo base como el lodo con nanomaterial presentan adelgazamiento por cizallamiento ya que disminuye la viscosidad al aumentar la tasa de corte. Este comportamiento reológico se le atribuye a la goma xantana (GX) que actúa como viscosificante y agente dispersante en el fluido. Este polímero forma una red de gel a través de puentes de

hidrógeno y entramados entre sus moléculas. A medida que aumenta la tasa de corte, estas interacciones se rompen y la orientación de las cadenas de la GX se fuerza a lo largo de la dirección del flujo produciendo así una caída en la viscosidad (Xue & Sethi, 2012). Al agregar CuNW al lodo de perforación, el esfuerzo cortante se redujo significativamente con respecto al lodo base, sin embargo, no se observa una tendencia en este al cambiar la concentración de CuNW.

También se observa que al aumentar la temperatura la viscosidad del lodo disminuye, esto es debido a que la estructura de la GX cambia de una conformación helicoidal ordenada y rígida a una estructura desordenada y flexible a temperaturas más altas (Xue & Sethi, 2012). De igual manera, al agregar CuNW al lodo de perforación, el esfuerzo cortante se redujo significativamente con respecto al lodo base, sin embargo, no se observan diferencias significativas al cambiar la concentración de nanomaterial en el sistema.

4.2.1 Viscosidad aparente (VA)

La viscosidad es un parámetro importante en los lodos de perforación. Esta debe ser lo suficientemente alta para levantar fácilmente los recortes, pero, no debe ser muy alta ya que provoca una disminución en la tasa de incrustación de la broca en la formación (Perween et al., 2018).

Debido a que la GX puede formar una estructura de red, esta puede atrapar partículas coloidales y por tanto estabilizar dispersiones. Estas partículas pueden ser adsorbidas o simplemente estar rodeadas por la red de polímero dependiendo de la naturaleza de su superficie. En un estudio realizado por Kennedy et al (2015) se utilizaron nanopartículas de dióxido de silicio con grupos silanol en su superficie. Estos grupos permitieron la formación de puentes de hidrógeno con los grupos carboxílicos (COOH) de las cadenas laterales de la GX al crear sitios de unión que contribuyeron en la formación de la red y como consecuencia hubo un aumento en la viscosidad.

Sin embargo, en un estudio realizado por Oh et al (1999) donde la dispersión tenía un pH 9, provocó la disociación de los grupos silanol lo que condujo a una reducción en el número de grupos –OH disponibles para formar puentes de hidrógeno con la molécula de GX. Por lo tanto, dado que las partículas de sílice estaban cargadas negativamente, las moléculas de GX exhibieron una conformación extendida y la suspensión fue estable, pero su viscosidad disminuyó ligeramente en comparación con la solución de GX pura. A este pH, las fuerzas de atracción entre las partículas adsorbidas por las moléculas de GX eran relativamente débiles en comparación con las fuerzas de repulsión (repulsión electrostática). Por lo tanto, la estructura de la red no estaba suficientemente desarrollada.

En este caso, los CuNW también presentan una carga superficial negativa como se observó en el análisis de potencial zeta, por esta razón la disminución de la viscosidad puede ser debido a las repulsiones electrostáticas entre los grupos cargados que se encuentran en las cadenas laterales de la GX con la carga superficial negativa de los CuNW que impiden puntos de unión que contribuyan a la formación de la red rígida de polímero y por tanto a un comportamiento de gelificación del polímero. Como consecuencia de esto y observando los datos obtenidos en la tabla 2, se observa una reducción en la viscosidad con la adición de CuNW al lodo de perforación.

Tabla 2

Resultados de la viscosidad aparente

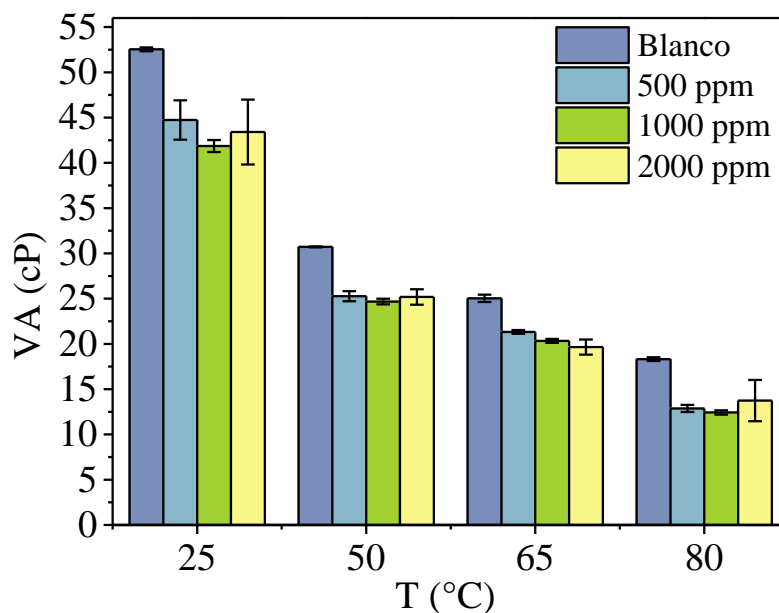
T (°C)	Viscosidad aparente (cP)						
	Blanco	500 ppm	Diferencia %	1000 ppm	Diferencia %	2000 ppm	Diferencia %
25	52,5	44,7	-14,9	41,9	-20,3	43,4	-17,4
50	30,7	25,3	-17,7	24,7	-19,7	25,2	-18,0
65	25,0	21,3	-14,8	20,3	-18,8	19,6	-21,5
80	18,3	12,9	-29,7	12,4	-32,2	13,7	-25,0

Nota. En esta tabla se muestran los resultados de la viscosidad aparente del lodo base y el lodo con 500, 1000 y 2000 ppm de CuNW. También se muestra el porcentaje de disminución de este parámetro al comparar los resultados obtenidos para los lodos con CuNW con respecto a los del lodo base.

En la Figura 17 se observa que al agregar CuNW al lodo de perforación, hay una variación en los datos obtenidos para la viscosidad aparente que no permiten identificar diferencias significativas al cambiar la concentración de nanomaterial en el sistema.

Figura 17

Viscosidad Aparente de los lodos de perforación evaluados



4.2.2 Viscosidad plástica (VP)

La viscosidad plástica es la resistencia al flujo de un fluido. Esta es causada por la fricción mecánica dentro del lodo de perforación debido a la interacción entre el líquido y sus componentes, al estar bajo esfuerzo cortante (Perween et al., 2018). En la tabla se observan los resultados obtenidos para la viscosidad plástica del lodo base y el lodo con nanomaterial a diferentes temperaturas. Se puede observar que también hay una reducción en este parámetro al agregar nanomaterial, esto puede ser debido a las interacciones intermoleculares ya mencionadas.

Tabla 3

Resultados de la viscosidad plástica

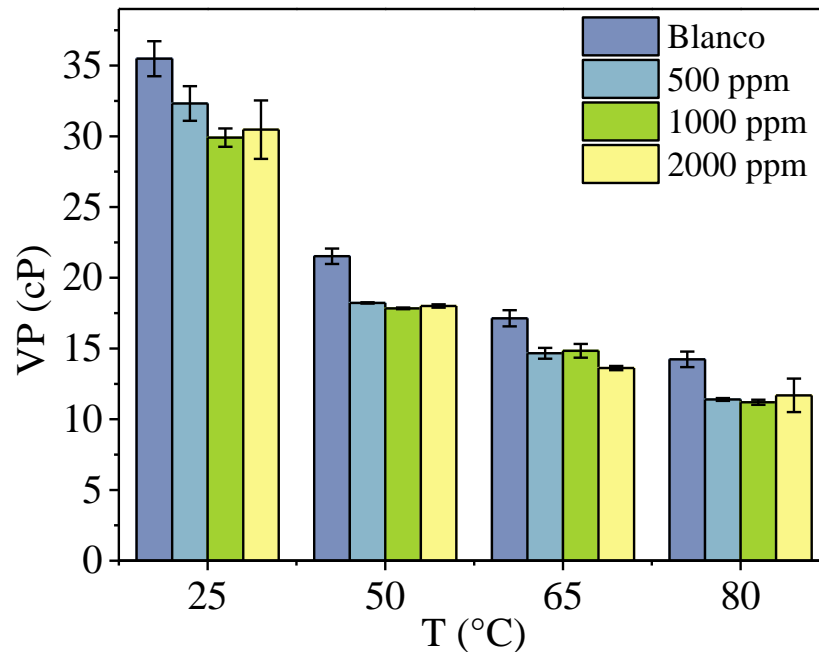
T (°C)	Viscosidad plástica(cP)						
	Blanco	500 ppm	Diferencia %	1000 ppm	Diferencia %	2000 ppm	Diferencia %
25	35,5	32,3	-8,9	29,9	-15,7	30,5	-14,1
50	21,5	18,2	-15,3	17,8	-17,1	18,0	-16,4
65	17,1	14,7	-14,4	14,8	-13,4	13,6	-20,5
80	14,2	11,4	-19,9	11,2	-21,3	11,7	-17,9

Nota. En esta tabla se muestran los resultados de la viscosidad plástica del lodo base y el lodo con 500, 1000 y 2000 ppm de CuNW. También se muestra el porcentaje de disminución de este parámetro al comparar los resultados obtenidos para los lodos con CuNW con respecto a los del lodo base.

En la Figura 18 se representa gráficamente la variación de la viscosidad plástica con la concentración de CuNW. En esta se observa que los datos obtenidos presentar variaciones en las medidas que no permite una diferenciación significativa del comportamiento de la viscosidad plástica al cambiar la concentración de nanomaterial en el lodo.

Figura 18

Viscosidad Plástica de los lodos de perforación evaluados



4.2.3 Punto cedente (YP)

El punto cedente es la resistencia inicial al flujo causada por las fuerzas electroquímicas entre las partículas. Este se utiliza para evaluar la capacidad del lodo para levantar recortes en condiciones dinámicas (Perween et al., 2018). En la tabla se observan los resultados obtenidos, estos evidencian una disminución en el punto cedente con la adición de CuNW al lodo de perforación. Esto puede ser debido a que las interacciones, entre la superficie de los CuNW y los grupos cargados de las cadenas de GX, estén dominadas por las repulsiones electrostáticas y por tanto causen menos resistencia al iniciar el flujo.

Tabla 4

Resultados del punto cedente

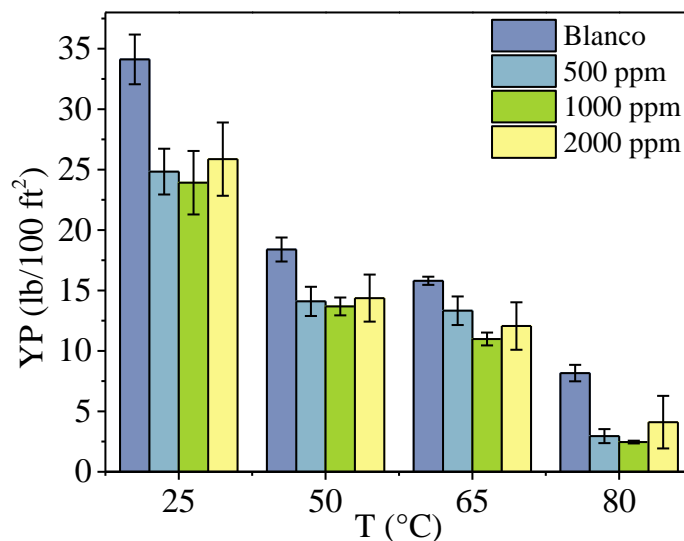
T (°C)	Punto cedente (lb/100 ft ²)						
	Blanco	500 ppm	Diferencia %	1000 ppm	Diferencia %	2000 ppm	Diferencia %
25	34,1	24,8	-27,2	23,9	-29,9	25,9	-24,2
50	18,4	14,1	-23,3	13,7	-25,6	14,4	-21,9
65	15,8	13,3	-15,7	11,0	-30,5	12,1	-23,7
80	8,2	3,0	-63,9	2,5	-69,9	4,1	-49,7

Nota. En esta tabla se muestran los resultados del punto cedente del lodo base y el lodo con 500, 1000 y 2000 ppm de CuNW. También se muestra el porcentaje de disminución de este parámetro al comparar los resultados obtenidos para los lodos con CuNW con respecto a los del lodo base.

En la Figura 19 se representa gráficamente la variación del punto cedente con la concentración de CuNW. En esta se observa que los datos obtenidos presentar variaciones en las medidas que no permite una diferenciación significativa del comportamiento del punto cedente al cambiar la concentración de nanomaterial en el lodo.

Figura 19

Punto Cedente de los lodos de perforación evaluados



4.2.4 Resistencia de gel (GS)

La resistencia de gel mide la capacidad del lodo de perforación para mantener en suspensión los recortes de perforación cuando cesa el flujo. En la Tabla se observan los resultados de las medidas de resistencia de gel obtenidos del lodo base y el lodo con tres concentraciones de CuNW a 25 °C y 50 °C. Se evidencia que la magnitud de la resistencia de gel disminuye con la adición de CuNW lo que representa una reducción de la capacidad de suspensión del lodo de perforación, sin embargo, no se observa una tendencia al cambiar la concentración del nanomaterial.

Tabla 5

Resultados de las medidas de resistencia de gel

	Resistencia de gel (lb/100 ft ²)						
	25 °C						
	Blanco	500 ppm	Diferencia %	1000 ppm	Diferencia %	2000 ppm	Diferencia %
Gel 10 s	5,6	4,2	-24,1	5,0	-10,9	4,6	-17,6
Gel 10 min	5,9	4,7	-20,1	5,2	-12,6	4,9	-16,8
Gel 30 min	6,5	4,8	-26,8	5,0	-23,4	5,1	-22,2
	50 °C						
Gel 10 s	3,8	3,2	-16,8	2,7	-30,0	2,8	-27,5
Gel 10 min	4,1	3,0	-26,3	3,0	-26,7	3,2	-21,5
Gel 30 min	5,0	3,3	-34,5	3,2	-36,0	3,9	-20,7

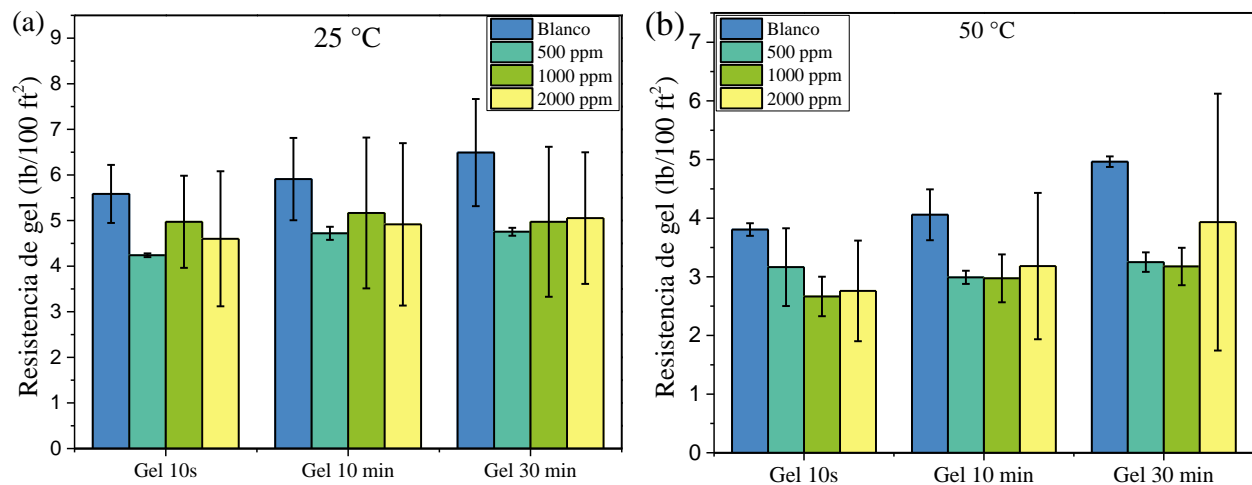
Nota. En esta tabla se muestran los resultados de la resistencia de gel del lodo base y el lodo con 500, 1000 y 2000 ppm de CuNW. También se muestra el porcentaje de disminución de este parámetro al comparar los resultados obtenidos para los lodos con CuNW con respecto a los del lodo base.

No obstante, en la Figura 20 se observa que las medidas de la resistencia de gel presentan un comportamiento inconstante, con una variación entre las medidas que no permite una

diferenciación significativa, lo que indica que hay una baja precisión en la medición y por tanto los resultados obtenidos no son del todo confiables.

Figura 20

Resistencia de gel de los lodos de perforación evaluados



Nota. Resistencia de gel a 10 s, 10 min y 30 min del lodo base y del lodo de perforación con 500, 1000 y 2000 ppm de CuNW a a) 25 °C y b) 50 °C

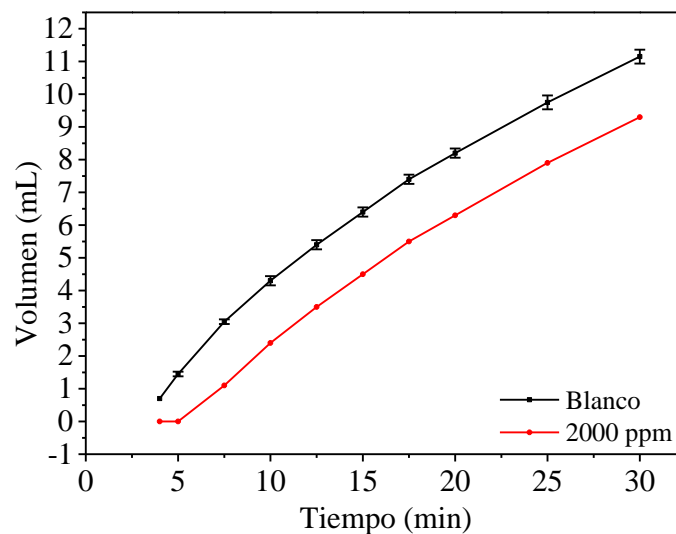
4.2.5 Pérdida de filtrado (FL)

En la Figura 21 se observan los resultados obtenidos en la prueba de filtrado. Estos muestran que la adición de CuNW al lodo de perforación base exhibe una reducción en el volumen de pérdida de filtrado durante toda la prueba. Además, el volumen recibido a los 30 min para el lodo base fue 11,2 mL y para el lodo con CuNW fue 9,3 mL, por tanto, se obtuvo una reducción del 16,6% en la pérdida de filtrado. Los resultados anteriores indican que el nanomaterial fue un reductor eficiente de la pérdida de filtrado ya que tiene la capacidad de formar una torta de baja permeabilidad para impedir el fluido del líquido a través del papel de filtro. Estos resultados son

favorables ya que se busca que la formulación del lodo de perforación tenga la menor pérdida de fluido posible para disminuir los problemas de daño a la formación.

Figura 21

Prueba de filtrado API



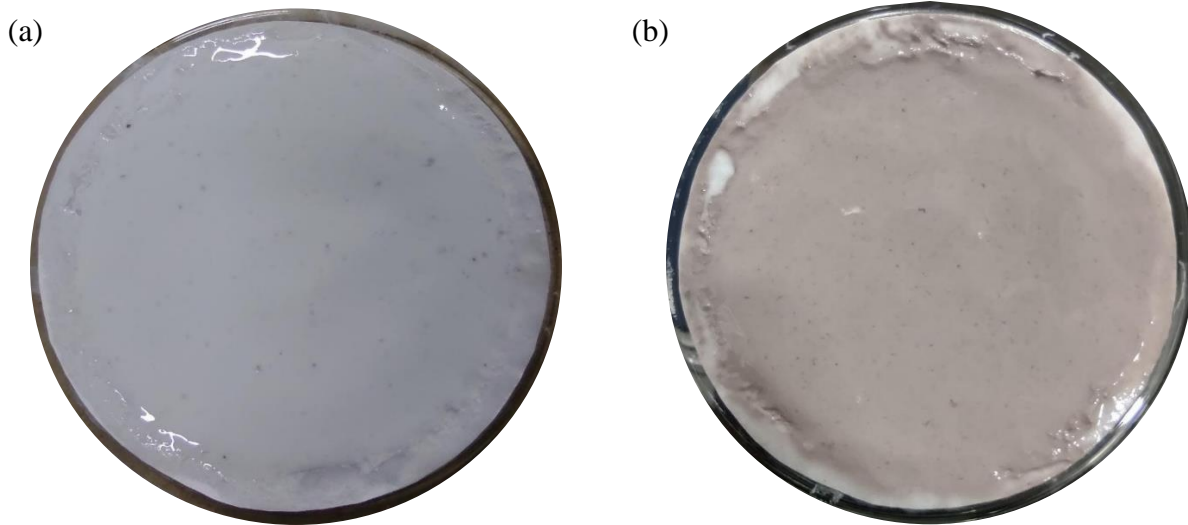
Nota. Volumen recibido durante la prueba de filtrado realizada al del lodo base y el lodo con 2000 ppm de CuNW por un periodo de 30 min.

En la Figura 22 se observan las tortas de filtración obtenidas para el lodo base y el lodo con 2000 ppm de CuNW. Visualmente se observa que las tortas de filtración son de buena calidad ya que son uniformes, flexibles, delgadas y no se agrietan ni se quiebran fácilmente. En la figura 22b se observa una coloración rojiza en la torta de filtrado debido a la presencia de nanomaterial. Debido su tamaño y área superficial, el nanomaterial actúa como un agente de taponamiento. Este ayuda a obstruir la garganta de los poros, dando como resultado una torta de filtración delgada e impermeable que evita una mayor pérdida de fluido. Además, al tener una buena dispersión y alta concentración en el lodo, este podría presentar una distribución homogénea sobre la superficie del

papel de filtro y así formar una torta de filtración compacta y de baja porosidad (Perween et al., 2018; Li et al., 2015).

Figura 22

Tortas de filtración de lodos de perforación



Nota. Tortas de filtración formadas sobre papel de filtro durante la prueba de filtrado realizada al (a) lodo base y (b) al lodo con 2000 ppm de CuNW.

5. Conclusiones

Se sintetizaron nanocables de cobre por una ruta de reducción en solución acuosa en la cual se utilizó nitrato de cobre como la sal precursora de iones Cu^{2+} , hidracina para reducir estos iones a cobre metálico y EDA como agente de protección para obtener la morfología 1D de los nanocables.

Mediante las técnicas de microscopía electrónica de barrido (SEM) y difracción de rayos X (DRX) fue posible caracterizar los nanocables de cobre para comprobar la morfología de su estructura y su composición química.

Se evaluó el comportamiento de la viscosidad plástica, viscosidad aparente, punto cedente y resistencia de gel al agregar nanomaterial al lodo de perforación. Como resultado se obtuvo una disminución en todos los parámetros con respecto a los del lodo base. Esto puede ser debido a las interacciones intermoleculares entre los grupos cargados presentes en la estructura polimérica de la goma xantana y la superficie con carga negativa de los CuNW que impide que haya puntos de unión que contribuyan al comportamiento de gelificación del polímero en el lodo de perforación.

Se obtuvo una reducción de 16,6% en la pérdida de filtrado para el lodo de perforación con una concentración de 2000 ppm de CuNW, en comparación con el lodo de perforación base.

6. Recomendaciones

Se recomienda reciclar la solución madre de hidróxido de sodio ya que se reporta en la literatura que se puede usar como precursor en un siguiente lote de síntesis después de su debido procesamiento. Esto reduciría los costos y los residuos generados en el proceso.

Se recomienda utilizar otro rango de concentraciones de nanomaterial en el lodo de perforación base para estudiar si hay una tendencia en el comportamiento de las propiedades reológicas como efecto de esta variación.

Referencias bibliográficas

- Al-Shargabi, M., Davoodi, S., Wood, D. A., Al-Musai, A., Rukavishnikov, V. S., & Minaev, K. M. (2022). Nanoparticle applications as beneficial oil and gas drilling fluid additives: A review. *Journal of Molecular Liquids*, 352, 118725. 10.1016/j.molliq.2022.118725
- API RP 13B-1. (2009). *Recommended Practice for Field Testing Water-based Drilling Fluids* (5th ed.). Washington, D.C.
- Baba Hamed, S., & Belhadri, M. (2009). Rheological properties of biopolymers drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 67(3), 84-90. 10.1016/j.petrol.2009.04.001
- Baroid. (2000). *Manual de fluidos*. Halliburton Company.
- Bhanushali, S., Ghosh, P., Ganesh, A., & Cheng, W. (2015). 1D Copper Nanostructures: Progress, Challenges and Opportunities. *Small (Weinheim an Der Bergstrasse, Germany)*, 11(11), 1232-1252. 10.1002/sml.201402295
- Bhat, I. M., Wani, S. M., Mir, S. A., & Masoodi, F. A. (2022). Advances in xanthan gum production, modifications and its applications. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 42, 102328. 10.1016/j.bcab.2022.102328
- Bhushan, B. (2017). Introduction to Nanotechnology. *Springer Handbook of Nanotechnology* (pp. 1-19). Springer. 10.1007/978-3-662-54357-3_1

- Bunaciu, A. A., Udriștioiu, E. g., & Aboul-Enein, H. Y. (2015). X-Ray Diffraction: Instrumentation and Applications. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 45(4), 289-299. 10.1080/10408347.2014.949616
- Caenn, R., Darley, H. C. H., & Gray, G. R. (2011). Chapter 1 - Introduction to Drilling Fluids. In R. Caenn, H. C. H. Darley & G. R. Gray (Eds.), *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids (Sixth Edition)* (pp. 1-37). Gulf Professional Publishing.
- Chang, R., & Goldsby, K. A. (2013). *Química* (11th ed.). McGraw-Hill.
- Cui, F., Dou, L., Yang, Q., Yu, Y., Niu, Z., Sun, Y., Liu, H., Dehestani, A., Schierle-Arndt, K., & Yang, P. (2017). Benzoin Radicals as Reducing Agent for Synthesizing Ultrathin Copper Nanowires. *Journal of the American Chemical Society*, 139(8), 3027-3032. 10.1021/jacs.6b11900
- Cui, F., Yu, Y., Dou, L., Sun, J., Yang, Q., Schildknecht, C., Schierle-Arndt, K., & Yang, P. (2015). Synthesis of Ultrathin Copper Nanowires Using Tris(trimethylsilyl)silane for High-Performance and Low-Haze Transparent Conductors. *Nano Letters*, 15(11), 7610-7615. 10.1021/acs.nanolett.5b03422
- Dulta, K., Virk, A. K., Chauhan, P., Bohara, P., & Chauhan, P. K. (2022). Chapter 8 - Nanotechnology and applications. In A. A. Elngar, R. Chowdhury, M. Elhoseny & V. E. Balas (Eds.), *Applications of Computational Intelligence in Multi-Disciplinary Research* (pp. 129-141). Academic Press.

- Gandhi, S. M., & Sarkar, B. C. (2016). Chapter 8 - Drilling. In S. M. Gandhi, & B. C. Sarkar (Eds.), *Essentials of Mineral Exploration and Evaluation* (pp. 199-234). Elsevier.
- Ghosh, B., AlCheikh, I. M., Ghosh, D., Osisanya, S., & Arif, M. (2020). Development of Hybrid Drilling Fluid and Enzyme–Acid Precursor-Based Clean-Up Fluid for Wells Drilled with Calcium Carbonate-Based Drilling Fluids. *ACS Omega*, 5(40), 25984-25992. 10.1021/acsomega.0c03436
- Growcock, F., & Harvey, T. (2005). Chapter 2 - Drilling Fluids. *Drilling Fluids Processing Handbook* (pp. 15-68). Gulf Professional Publishing.
- Horikoshi, S., & Serpone, N. (2013). Introduction to Nanoparticles. *Microwaves in Nanoparticle Synthesis* (pp. 1-24). John Wiley & Sons, Ltd.
- Kazemi-Beydokhti, A., & Hajiabadi, S. H. (2018). Rheological investigation of smart polymer/carbon nanotube complex on properties of water-based drilling fluids. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 556, 23-29. 10.1016/j.colsurfa.2018.07.058
- Kennedy, J. R. M., Kent, K. E., & Brown, J. R. (2015). Rheology of dispersions of xanthan gum, locust bean gum and mixed biopolymer gel with silicon dioxide nanoparticles. *Materials Science and Engineering: C*, 48, 347-353. 10.1016/j.msec.2014.12.040
- Kim, M. J., Flowers, P. F., Stewart, I. E., Ye, S., Baek, S., Kim, J. J., & Wiley, B. J. (2017). Ethylenediamine Promotes Cu Nanowire Growth by Inhibiting Oxidation of Cu(111). *Journal of the American Chemical Society*, 139(1), 277-284. 10.1021/jacs.6b10653

- Li, M., Wu, Q., Song, K., Lee, S., Jin, C., Ren, S., & Lei, T. (2015). Soy Protein Isolate As Fluid Loss Additive in Bentonite-Water-Based Drilling Fluids. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7(44), 24799-24809. 10.1021/acsami.5b07883
- Maji, N. C., & Chakraborty, J. (2019). Gram-Scale Green Synthesis of Copper Nanowire Powder for Nanofluid Applications. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(14), 12376-12388. 10.1021/acssuschemeng.9b01814
- Malvern Instruments. (2004). *Zetasizer Nano Series User Manual*
- Mitchell, J. (2019). Magnetic resonance diffusion measurements of droplet size in drilling fluid emulsions on a benchtop instrument. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 564, 69-77. 10.1016/j.colsurfa.2018.12.033
- Nam, V. B., & Lee, D. (2016). Copper Nanowires and Their Applications for Flexible, Transparent Conducting Films: A Review. *Nanomaterials*, 6(3)10.3390/nano6030047
- Oh, M., So, J., & Yang, S. (1999). Rheological Evidence for the Silica-Mediated Gelation of Xanthan Gum. *Journal of Colloid and Interface Science*, 216(2), 320-328. 10.1006/jcis.1999.6325
- Perween, S., Beg, M., Shankar, R., Sharma, S., & Ranjan, A. (2018). Effect of zinc titanate nanoparticles on rheological and filtration properties of water based drilling fluids. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 170, 844-857. 10.1016/j.petrol.2018.07.006

- Perween, S., Thakur, N. K., Beg, M., Sharma, S., & Ranjan, A. (2019). Enhancing the properties of water based drilling fluid using bismuth ferrite nanoparticles. *Colloids and Surfaces. A, Physicochemical and Engineering Aspects*, 561, 165-177. 10.1016/j.colsurfa.2018.10.060
- Ponmani, S., William, J. K. M., Samuel, R., Nagarajan, R., & Sangwai, J. S. (2014). Formation and characterization of thermal and electrical properties of CuO and ZnO nanofluids in xanthan gum. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 443, 37-43. 10.1016/j.colsurfa.2013.10.048
- Sharma, A. K., Tiwari, A. K., & Dixit, A. R. (2016). Rheological behaviour of nanofluids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 779-791. 10.1016/j.rser.2015.09.033
- Shi, Y., Li, H., Chen, L., & Huang, X. (2005). Obtaining ultra-long copper nanowires via a hydrothermal process. *Science and Technology of Advanced Materials*, 6(7), 761-765. 10.1016/j.stam.2005.06.008
- Skoog, D. A., Holler, F. J., & Nieman, T. A. (2008). *Principios de análisis instrumental* (6th ed.). Cengage Learning.
- Tadross, T. F. (2011). *Rheology of Dispersions: Principles and Applications*. John Wiley & Sons.
- Xue, D., & Sethi, R. (2012). Viscoelastic gels of guar and xanthan gum mixtures provide long-term stabilization of iron micro- and nanoparticles. *Journal of Nanoparticle Research*, 14(1239)10.1007/s11051-012-1239-0

Zhao, S., Han, F., Li, J., Meng, X., Huang, W., Cao, D., Zhang, G., Sun, R., & Wong, C. (2018). Advancements in Copper Nanowires: Synthesis, Purification, Assemblies, Surface Modification, and Applications. *Small*, *14*(26), 1800047. 10.1002/sml.201800047

Apéndices

Apéndice A. Datos del esfuerzo cortante a diferentes tasas de corte para el lodo base y lodos con diferente concentración de CuNW

(a)

Lodo base				
	25 °C	50 °C	65 °C	80 °C
Tasa de corte (rpm)	Esfuerzo cortante (lb/100 ft²)			
600	105,1	61,4	50,1	36,6
300	69,6	39,9	32,9	22,4
200	55,8	32,6	27,6	17,6
100	36,2	20,6	18,3	11,0
60	27,5	15,0	14,0	7,8
30	18,9	10,5	10,3	4,7
6	9,0	4,8	5,4	1,7
3	7,5	3,8	4,2	1,0

(b)

Lodo con 500 ppm de CuNW				
	25 °C	50 °C	65 °C	80 °C
Tasa de corte (rpm)	Esfuerzo cortante (lb/100 ft²)			
600	89,5	50,5	42,6	25,7
300	57,2	32,3	28,0	14,3
200	46,2	26,9	24,1	11,5
100	29,1	16,8	16,1	6,1
60	21,2	12,4	12,3	4,3
30	14,4	8,7	9,2	2,4
6	6,7	4,6	4,6	1,1
3	5,1	3,4	3,6	0,5

(c)

Lodo con 1000 ppm de CuNW				
	25 °C	50 °C	65 °C	80 °C
Tasa de corte (rpm)	Esfuerzo cortante (lb/100 ft²)			
600	83,7	49,4	40,7	24,9
300	53,8	31,5	25,8	13,7
200	43,8	26,2	21,4	10,6
100	28,1	16,9	14,0	5,5
60	20,9	12,8	10,9	4,0
30	14,5	9,2	7,7	2,3
6	7,0	4,7	3,9	0,9
3	5,5	3,7	3,3	0,2

(d)

Lodo con 2000 ppm de CuNW				
	25 °C	50 °C	65 °C	80 °C
Tasa de corte (rpm)	Esfuerzo cortante (lb/100 ft²)			
600	86,8	50,4	39,3	27,5
300	56,3	32,4	25,7	15,8
200	45,7	26,3	21,6	12,8
100	29,4	16,7	14,5	7,3
60	22,0	12,7	11,5	5,2
30	15,3	9,0	8,5	3,1
6	7,0	4,5	5,1	1,3
3	5,2	3,3	4,0	0,9

Apéndice B. Datos obtenidos en la prueba de filtrado para el lodo base y el lodo con 2000 ppm de CuNW

t, min	Filtrado (mL)	
	Blanco	2000 ppm
4	0,7	0
5	1,5	0
7,5	3,1	1,1
10	4,3	2,4
12,5	5,4	3,5
15	6,4	4,5
17,5	7,4	5,5
20	8,2	6,3
25	9,8	7,9
30	11,2	9,3