

Aplicación de nanohilos de cobre para mejorar las propiedades reológicas y de filtración de fluidos de perforación en base agua

L. Ortiz, Universidad Industrial de Santander; I. Diaz, Universidad Industrial de Santander; E. Mejía, Universidad Industrial de Santander.

Categoría: Marque con una "X"

- Artículo Técnico
- Tesis Pregrado
- Tesis Posgrado

Derechos de Autor 2022, ACIPET

Este artículo técnico fue preparado para presentación en el XIX Congreso Regional Colombiano de Petróleo, Gas y Energía organizado por ACIPET en Cartagena, Colombia.
Este artículo fue seleccionado para presentación por el comité técnico de ACIPET, basado en información contenida en un resumen enviado por el autor(es).

Resumen

El fluido de perforación es un componente clave en las operaciones de perforación. De sus propiedades depende el éxito o el fracaso de la posterior producción de petróleo. Las propiedades que caracterizan a este fluido incluyen la reología y la pérdida de filtrado. Los fluidos a base de aceite y sintéticos ofrecen un alto rendimiento; no obstante, en los últimos años, se ha buscado fabricar sistemas a base de agua con reología mejorada y pérdidas por filtración reducidas que cumplan con estándares ambientales y, por lo tanto, se conviertan en una mejor opción. Para controlar una o más de estas propiedades generalmente se agregan polímeros. También se pueden mejorar con la adición de ciertos nanomateriales. Los nanomateriales, debido a su escala de longitud entre 1 y 100 nanómetros exhiben propiedades únicas. Las nanopartículas son las más utilizadas, sin embargo, existen otros nanomateriales como nanotubos, nanofibras, nanoplacas y nanohilos con propiedades particulares. Las nanoestructuras metálicas 1D, como los nanohilos (NW), se han distinguido por su conductividad eléctrica, flexibilidad mecánica, características térmicas y catalíticas. En este estudio, se utilizaron nanohilos de cobre (CuNW) para mejorar las propiedades reológicas y de pérdida filtrado de un fluido de perforación a base de agua. Los CuNW se sintetizaron a través de una reducción acuosa con crecimiento anisotrópico mediado por etilendiamina. Su caracterización se realizó mediante microscopía electrónica de barrido por emisión de campo (FE-SEM) y difracción de rayos X (DRX). Los experimentos se llevaron a cabo a concentraciones de 500, 1000 y 2000 ppm de CuNW a temperaturas de 25, 50, 65 y 80 ° C para evaluar su influencia en la reología y filtrado API a temperatura normal y 100 psi. Los resultados experimentales muestran una disminución de la viscosidad aparente (VA), viscosidad plástica (VP), punto de cedente (YP) y pérdida de fluido API.

Introducción

La operación de perforación de pozos se considera un proceso crucial para la extracción de petróleo y gas natural de depósitos subterráneos ¹. Durante esta operación, el fluido de perforación es uno de los elementos más importantes. Este realiza múltiples funciones, 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 ². Hay varios tipos de fluidos de perforación dependiendo de su componente principal, uno de ellos es el lodo a base de agua (WBM). Los WBM se emplean comúnmente como fluidos apropiados en el proceso de perforación considerando su bajo costo, características biodegradables y ecológicas ³. En esta clase de lodo se suspenden partículas sólidas en agua o salmuera. Los sólidos consisten en arcillas, coloides orgánicos, minerales pesados y sólidos de la formación dispersados en el lodo en el curso de perforación. Estos le imparten propiedades viscosas, de filtración y densidad al lodo. Además, el agua puede contener sales disueltas, ya sea por contaminación con agua de formación o agregados para diversos fines ⁴.

Se han desarrollado un número considerable de formulaciones de fluidos de perforación para adaptarse a diversas condiciones del subsuelo. Un aspecto crítico 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 fluido de perforación que provocan el taponamiento de los poros de la formación debido a la invasión de filtrados y/o finos en los poros ⁵. Los fluidos drill-in están diseñados para mitigar este aspecto, además, para que se presten para fácil limpieza, sean efectivos con relación al costo y provean el índice de filtración más bajo posible. El puenteo 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) y sal dimensionados ⁶.

Los aditivos poliméricos, como la goma xantana (XG), se utilizan generalmente como viscosificantes debido a su estructura molecular y configuración química. La XG tiene un gran peso molecular con una estructura helicoidal que proporciona propiedades reológicas únicas, como una alta viscosidad a baja tasa de corte y un fuerte carácter de adelgazamiento por cizallamiento, es decir, disminución de la viscosidad al aumentar la tasa de corte, esto debido a la presencia de una red compleja en la solución formada por cadenas poliméricas rígidas. Polímeros como la celulosa polianiónica (PAC), el almidón y otros generan una torta delgada con baja permeabilidad lo que reduce la pérdida de filtrado al impedir el flujo del lodo hacia la formación del pozo ⁷.

En los últimos años, se ha usado la nanotecnología para mejorar el rendimiento de los fluidos de perforación al modificar favorablemente 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 lodo⁸. Se ha usado una gran variedad de nanomateriales como aditivos en el WBM para investigar el rendimiento a través de análisis reológicos y pruebas de filtración. Entre los nanomateriales que se reportan en la literatura se encuentran las nanopartículas de óxidos metálicos (Al_2O_3 , TiO_2 , CuO y SiO_2) ⁹, nanotubos de carbono de paredes múltiples oxidados envueltos en polietilenglicol (POCNT) ³, nanopartículas de ferrita de bismuto BiFeO_3 (BFO) ¹⁰, entre otros.

Muchos autores documentan el uso de otras nanopartículas, sin embargo, se busca recurrir a nuevas tecnologías y aplicar otros nanomateriales que permitan crear fluidos que mejoren el rendimiento de los procesos de perforación. Los nanocables metálicos (NW) unidimensionales son nanomateriales con propiedades únicas. Además, se han obtenido buenos resultados al implementarlos en diversas aplicaciones, entre ellas se encuentran la electrónica, óptica, catalizadores y sensores ¹¹. Se han informado varios métodos para la síntesis de nanohilos de cobre (CuNW), como la deposición química en fase de vapor, la descomposición térmica al vacío y el electrohilado. Los métodos en 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 nanohilos. Todos los CSM son similares en el sentido de que utilizan un agente reductor para transformar los iones metálicos en átomos metálicos y un agente de protección para llevar los átomos metálicos a los NW. La síntesis de CuNW por CSM con un enfoque asistido por amina posee varias ventajas, como menos restricciones con respecto a la selección de precursores y las condiciones de los solventes, además, la viabilidad de la producción a gran escala ¹². Un ejemplo de CSM consiste en usar la sal de nitrato de cobre como fuente de iones cúpricos (Cu^{2+}), la EDA como agente de protección que permite el crecimiento anisotrópico de los NW, la N_2H_4 como agente reductor para reducir el ion cúprico (Cu^{2+}) a cobre (Cu) metálico y una solución concentrada de NaOH se usa para prevenir la formación de precipitados de hidróxido de cobre a partir de iones de cobre ¹³.

Se utilizan varios modelos para describir el comportamiento reológico de los fluidos de perforación., los más utilizados son el Plástico de Bingham, Ley de potencia y Herschel-Bulkley. En el modelo plástico de Bingham, se requiere un valor mínimo en el esfuerzo cortante para que comience el flujo llamado punto cedente (YP), después de lo cual el flujo es similar al de un fluido newtoniano porque la viscosidad es constante y no varía con la tasa de corte, este es una función del comportamiento electroquímico o el efecto de los polímeros de cadena larga. 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 ¹⁴. Para medir la viscosidad aparente (VA), viscosidad plástica (VP), punto cedente (YP) y resistencia del gel (GS) se siguen los estándares recomendados por el American Petroleum Institute ¹⁵.

$$VA = \Phi_{600} / 2 \quad (\text{Ec. 1})$$

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

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

Donde, Φ_{600} es la toma de la lectura a 600 rpm, Φ_{300} es la toma de la lectura a 300 rpm.

La fuerza de gel 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; esta propiedad se expresa en libras-fuerza por cien pies cuadrados ($\text{lb}/100 \text{ ft}^2$) ¹⁰. La medición del comportamiento de filtración y las características de la torta son fundamentales para el tratamiento y control de un fluido de perforación. La formulación del fluido 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 ¹⁵.

El objetivo de este estudio fue sintetizar nanohilos de cobre por método de reducción química en solución acuosa, utilizar este nanomaterial como aditivo para un WBM y estudiar su efecto sobre las propiedades reológicas y de filtrado.

Metodología y Datos

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 Duksan), celulosa Polianiónica (PAC-L comercial), Goma Xantana (XG comercial), Carbonato de Calcio (CaCO_3 comercial) con tamaños 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.

Síntesis de nanocables de cobre (CuNW). La síntesis de nanocables se realizó mediante una reducción acuosa con crecimiento anisotrópico mediado por etilendiamina ¹³. Se prepararon 150 mL de una solución acuosa 15 M de NaOH con agua Tipo I en un balón de fondo plano de 250 mL y se calentó a 60 °C. A continuación, se añadió un total de 1,207 mL de EDA y se agitó la solución a 900 rpm. Después de 2 min, se añadieron 240 μL de $\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ al 60% a la solución con agitación vigorosa. Luego de 2 min, se añadieron 7,5 mL de solución acuosa 0,1 M de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. Se continuó agitando durante otros 3 min y se detuvo. Se forma una capa gruesa (torta) de CuNW en la parte superior de la mezcla de reacción después de 90 min de reacción. Los productos de cobre se centrifugaron, se lavan, se liofilizan y se almacenan. El esquema de la síntesis se muestra en la figura 1.

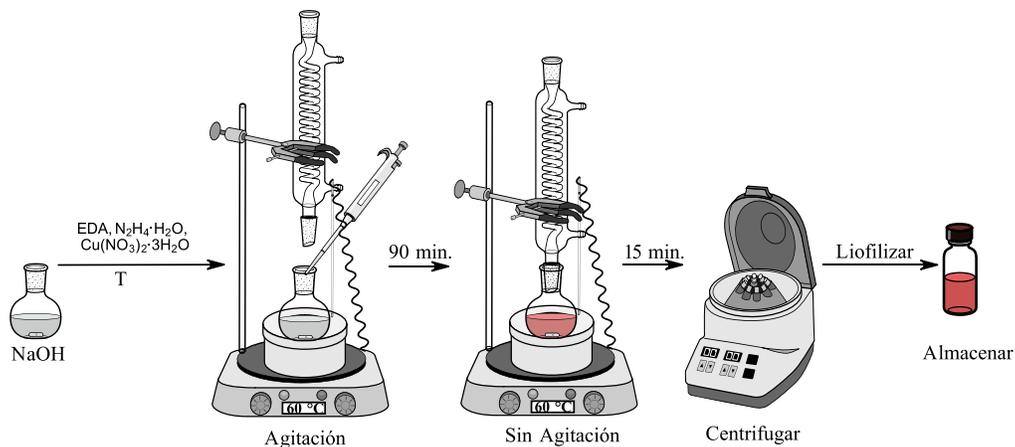


Figura 1. Esquema de síntesis de los CuNW por reducción acuosa

Caracterización de los CuNW por microscopía electrónica de barrido (SEM). Para estudiar la morfología de los CuNWs 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 electrón detector (BSED) tipo SSD).

Caracterización de los CuNW por Difracción de Rayos X (DRX). El patrón de difracción de rayos X 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° (2θ), la medida tuvo un tiempo de duración de 35 min.

Preparación del nanofluido. Se utilizaron 175 mg, 350 mg y 700 mg de CuNW para preparar nanofluidos de 500 ppm, 1000 ppm y 2000 ppm respectivamente. Primero se realizó la dispersión del nanomaterial añadiendo los CuNW a un tubo de centrifuga con 35 mL de agua Tipo I, se colocó el tubo en un baño de ultrasonido hasta observar una dispersión homogénea; se añadieron 150 mg de XG y se repite el proceso de baño de ultrasonido.

La dispersión se agregó a un vaso de precipitado con 305 mL de agua Tipo I, se añadieron 3g de PAC-L y 1,35g de XG. Finalmente se agregó carbonato de calcio con 3 tamaños de partícula diferentes: 20 g de CaCO_3 M-600, 20 g de CaCO_3 M-325 y 6 g de CaCO_3 M-200 respectivamente. El esquema de la preparación se muestra en la figura 2.

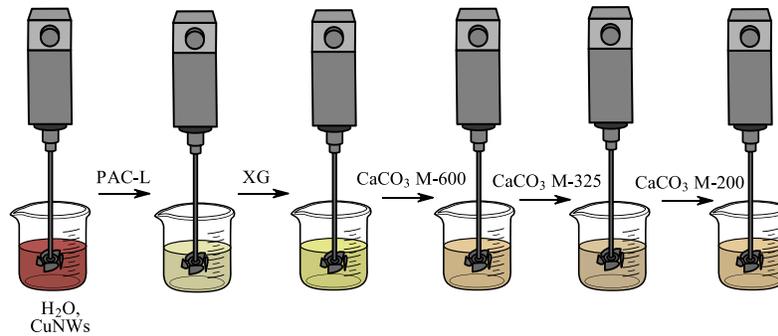


Figura 2. Esquema de la preparación del nanofluido

Evaluación de las propiedades reológicas del nanofluido. Los estudios reológicos se realizaron en un Viscotester IQ (Thermo Scientific) usando la geometría de cilindro coaxial. Las propiedades reológicas del fluido de perforación se realizaron a temperaturas de 25, 50, 65 y 80 °C. Se colocaron aproximadamente 16 mL de cada muestra de fluido 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). Para la medición de la fuerza del gel, la geometría del viscosímetro se giró a una tasa de corte de 3 rpm para medir el esfuerzo cortante después de que el fluido de perforación descansó durante 10 s, 10 min y 30 min para determinar la fuerza del gel a los 10 s (Gel 10 s), la fuerza del gel a los 10 min (Gel 10 min) y la fuerza del gel a los 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.

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-B1¹⁵. Los estudios se llevaron a cabo a temperatura ambiente y a una presión de 100 psi en una filtro-prensa Fann 250; la pérdida de fluido se midió a través del papel de filtro Whatmann grado 50 con un tamaño de poro de 3µm.

Resultados

Síntesis y caracterización de los nanocables de cobre (CuNW). La imagen de la solución madre al finalizar la reacción, la imagen obtenida por microscopía electrónica de barrido (SEM) y el patrón de difracción obtenido por difracción de rayos X (DRX) de los CuNW sintetizados por el método de reducción en solución acuosa se muestran en la Figura 3 a–c, respectivamente.

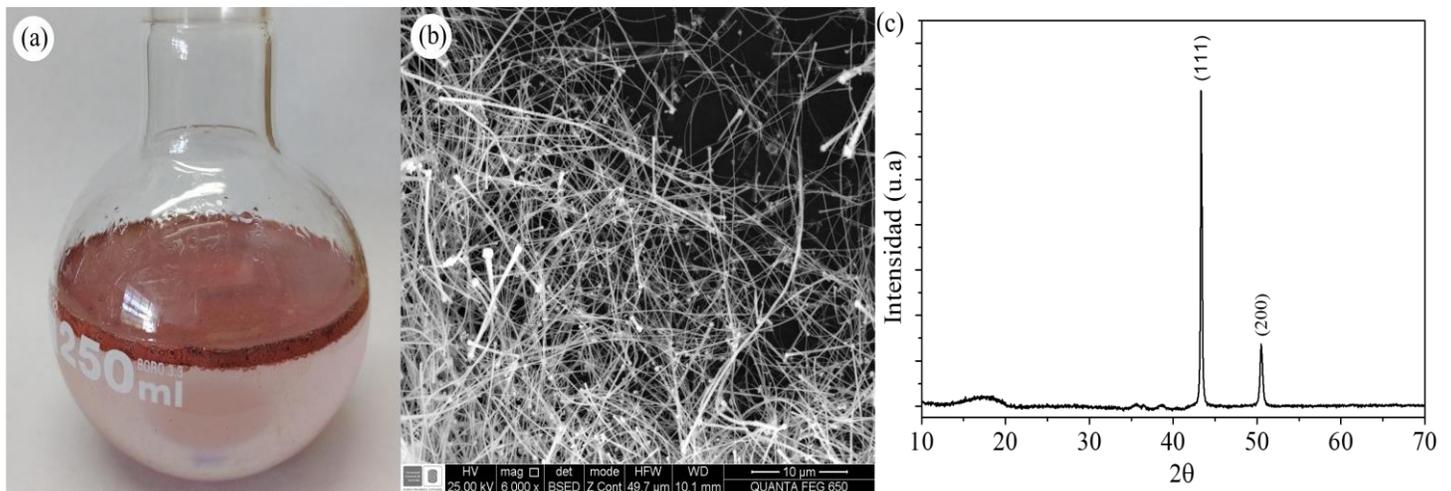


Figura 3. (a) Solución madre luego de 90 min de reacción, (b) imagen SEM de los CuNW, (c) patrón de difracción obtenido por DRX.

Evaluación de las propiedades reológicas del nanofluido. Se realizaron estudios reológicos a diferentes condiciones de temperatura (25, 50, 65 y 80 °C) al fluido base y al fluido con tres concentraciones de CuNW. Las relaciones esfuerzo cortante-tasa de corte se muestran en la figura 4 a–d.

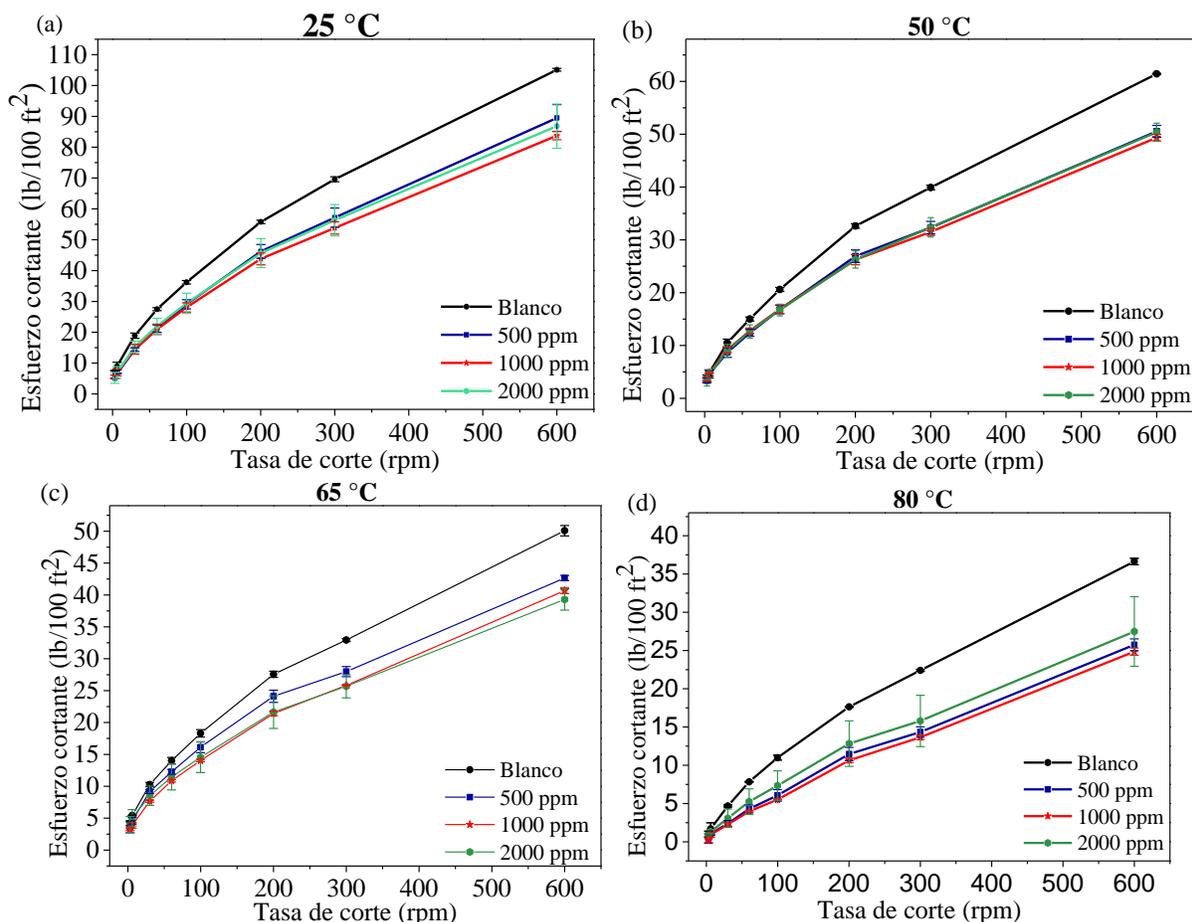


Figura 4. Variación del esfuerzo cortante con respecto a la tasa de corte del fluido base y el fluido con 500, 1000 y 2000 ppm de CuNW a (a) 25 °C, (b) 50 °C, (c) 65 °C, (d) 80 °C

Los datos obtenidos de la variación del esfuerzo cortante con respecto a la tasa de corte se usaron para calcular la viscosidad aparente (VA), la viscosidad plástica (VP) y el punto cedente (YP). Los resultados obtenidos se muestran en la figura 5 a-c.

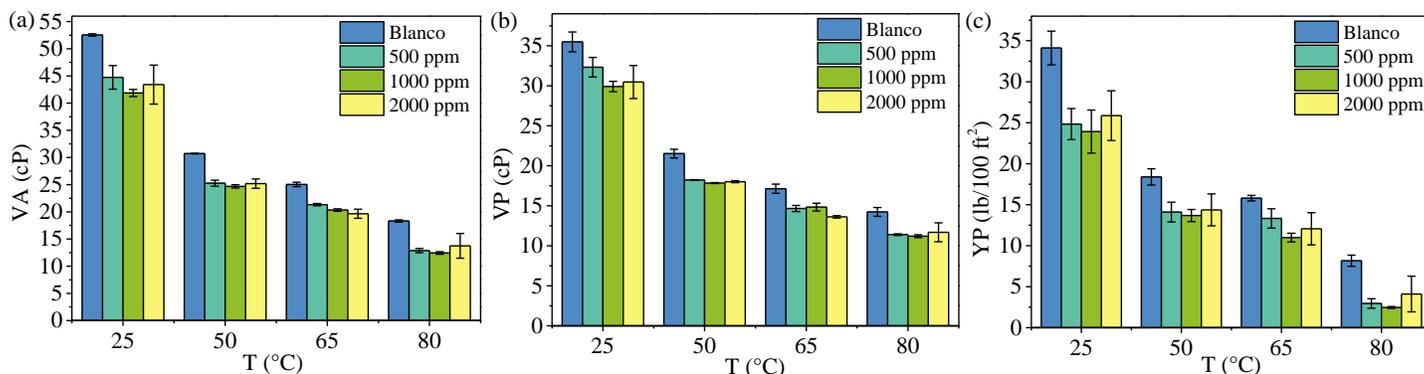


Figura 5. Propiedades reológicas del fluido base y del fluido con diferentes concentraciones de CuNW a 25 °C, 50 °C, 65 °C y 80 °C (a) viscosidad aparente (VA), (b) viscosidad plástica (VP) y (c) punto cedente (YP).

Las figuras 6 a-b ilustran los resultados de los siguientes parámetros reológicos: Gel 10 s, Gel 10 min y Gel 30 min a 25 °C y 50 °C para el fluido base y el fluido con tres concentraciones de CuNW.

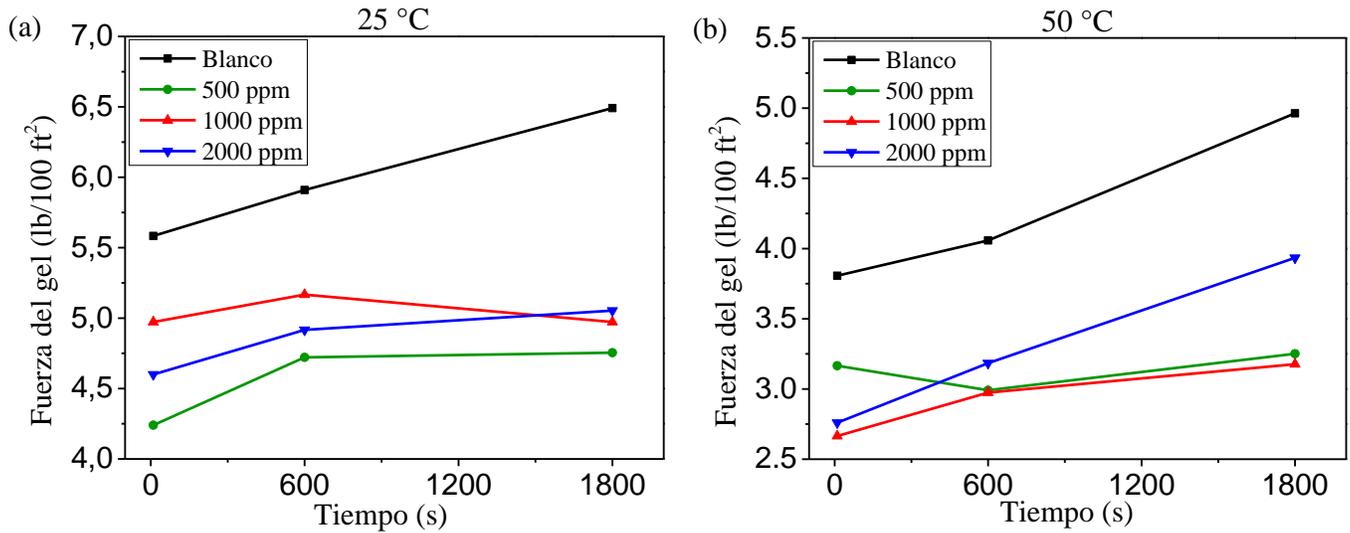


Figura 6. Gel 10 s, Gel 10 min y Gel 30 min del fluido base y el fluido con 500 ppm, 1000 ppm y 2000 ppm de CuNW a (a) 25 °C y (b) 50 °C

Prueba de filtrado. La figura 7 muestra los resultados de la prueba de filtrado para el fluido base y para el fluido con una concentración de 2000 ppm de CuNW durante un periodo de 30 minutos.

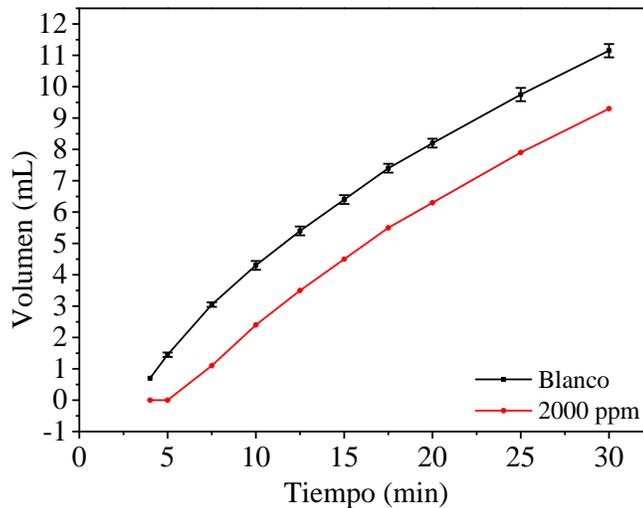


Figura 7. Pérdida de fluido durante un periodo de 30 minutos para fluido de perforación base y fluido de perforación con 2000 ppm de CuNW

Discusión

La síntesis de CuNW por reducción en solución acuosa mediado por amina permitió la obtención de este nanomaterial. Se obtuvo un polvo rojo utilizando hidrato de hidracina como agente reductor y EDA como agente de protección. Esto se puede ver en el balón de reacción, al dejar reaccionar por 90 minutos, se observa la torta de nanocables sintetizados que se suspende hasta la parte superior (Figura 3 a) debido a la alta densidad de la solución y al atrapamiento de burbujas de nitrógeno. También se observó la morfología alargada 1D de las estructuras de los nanocables metálicos mediante las imágenes SEM (Figura 3 b), los CuNW presentaron diámetros variables entre 40-200 nm. Finalmente, en el patrón de difracción (Figura 3 c) se observan dos señales características de la estructura

FCC del cobre cristalino, la primera a $2\theta = 43,3^\circ$ correspondiente a la difracción en el plano (111) y la segunda a $2\theta = 50,5^\circ$ 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 nanohilos, estos resultados son consistentes con los reportados en la literatura ¹³.

Los estudios reológicos mostraron 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 (XG) que actúa como viscosificante y agente dispersante en el fluido. Al agregar CuNW al fluido de perforación, el esfuerzo cortante se redujo significativamente con respecto al fluido base, sin embargo, se observa que no hay una tendencia en este al cambiar la concentración de CuNW.

La VA debe ser alta para subir fácilmente los recortes de perforación, sin embargo, no puede ser muy alta ya que provoca una disminución en la tasa de penetración de la broca. En los resultados obtenidos para la VA se observa que esta disminuye con la adición de CuNW, esto puede ser debido al tamaño de los nanohilos ya que, en estudios anteriores, con la adición de nanopartículas se observa un aumento de la VA gracias a que el área superficial de estas es mayor ⁸. De igual manera se observa una disminución en la VP y el YP con la adición de CuNW sin embargo, no se observa una tendencia en el comportamiento con el cambio de la concentración del nanomaterial e incluso a algunas temperaturas no hay un cambio en el valor de la medida. Para observar si hay una tendencia en el cambio en el comportamiento de las propiedades mencionadas se debería usar un rango más amplio de concentraciones de CuNW en el fluido.

La fuerza de gel es una propiedad que demuestra la capacidad del fluido de perforación para suspender los recortes y otros materiales cuando cesa la circulación ⁸. La magnitud de la fuerza del gel disminuye con la adición de nanohilos, esto indica que no hay una mejora en la capacidad de suspensión del lodo.

Se observó una reducción del 16.6 % en el volumen de filtrado, lo que demuestra la capacidad del fluido de perforación para formar una torta de lodo de baja permeabilidad y así bloquear el flujo de líquido a través del papel de filtro. Esto es favorable puesto que a una menor pérdida de fluido hay una disminución de los problemas de inestabilidad del pozo.

Conclusiones

- Se sintetizaron CuNW por un método de reducción en solución acuosa mediado por amina por el cual se obtuvieron nanohilos con morfología alargada 1D.
- Al evaluar las propiedades reológicas del fluido base y el fluido con diferentes concentraciones de CuNW se observa que hay una disminución de la VA, VP, YP y fuerza del gel del fluido con nanomaterial en comparación con el fluido base. Sin embargo, no se observa una tendencia en el comportamiento de la reología al cambiar la concentración de CuNW en el fluido.
- La disminución de la pérdida de filtrado, en comparación con el fluido de perforación base, obtenida del fluido de perforación con 2000 ppm de CuNWs fue de 16,6 %.

Nomenclatura

API: American Petroleum Institute por sus siglas en inglés, Instituto Americano del petróleo

CuNW: Copper nanowires por sus siglas en inglés, nanohilos de cobre

DRX: Difracción de rayos X

SEM: Scanning electron microscope 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

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

Agradecimientos

Los autores agradecen al laboratorio de DRX de la Universidad Industrial de Santander en especial al Dr. José Antonio Henao por su colaboración en la toma de difractogramas, al laboratorio de espectroscopia (LE) por su colaboración en la disposición de los equipos y al laboratorio central de microscopía del PTG-UIS por su colaboración en la toma de imágenes SEM.

Referencias

- (1) Li, M.; Wu, Q.; Song, K.; Lee, S.; Jin, C.; Ren, S.; Lei, T. Soy Protein Isolate As Fluid Loss Additive in Bentonite-Water-Based Drilling Fluids. *ACS Appl Mater Interfaces* **2015**, *7*, 24799-24809, DOI: 10.1021/acsami.5b07883.
- (2) Mitchell, J. Magnetic resonance diffusion measurements of droplet size in drilling fluid emulsions on a benchtop instrument. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **2019**, *564*, 69-77, DOI: 10.1016/j.colsurfa.2018.12.033.
- (3) Kazemi-Beydokhti, A.; Hajiabadi, S. H. Rheological investigation of smart polymer/carbon nanotube complex on properties of water-based drilling fluids. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **2018**, *556*, 23-29, DOI: 10.1016/j.colsurfa.2018.07.058.
- (4) Caenn, R.; Darley, H. C. H.; Gray, G. R. In *Chapter 1 - Introduction to Drilling Fluids*; Caenn, R., Darley, H. C. H. and Gray, G. R., Eds.; Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids (Sixth Edition); Gulf Professional Publishing: Boston, 2011; pp 1-37.
- (5) Ghosh, B.; AlCheikh, I. M.; Ghosh, D.; Ossidanya, S.; Arif, M. Development of Hybrid Drilling Fluid and Enzyme–Acid Precursor-Based Clean-Up Fluid for Wells Drilled with Calcium Carbonate-Based Drilling Fluids. *ACS Omega* **2020**, *5*, 25984-25992, DOI: 10.1021/acsomega.0c03436.
- (6) Baroid. Manual de fluidos. The complete fluids company. Halliburton Company. **2000**. Houston, USA
- (7) William, J. K. M.; Ponmani, S.; Samuel, R.; Nagarajan, R.; Sangwai, J. S. Effect of CuO and ZnO nanofluids in xanthan gum on thermal, electrical and high pressure rheology of water-based drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering* **2014**, *117*, 15-27, DOI: 10.1016/j.petrol.2014.03.005.
- (8) Perween, S.; Beg, M.; Shankar, R.; Sharma, S.; Ranjan, A. Effect of zinc titanate nanoparticles on rheological and filtration properties of water based drilling fluids. *Journal of petroleum science & engineering* **2018**, *170*, 844-857, DOI: 10.1016/j.petrol.2018.07.006.
- (9) Bayat, A. E.; Jalalat Moghanloo, P.; Piroozian, A.; Rafati, R. Experimental investigation of rheological and filtration properties of water-based drilling fluids in presence of various nanoparticles. *Colloids and surfaces. A, Physicochemical and engineering aspects* **2018**, *555*, 256-263, DOI: 10.1016/j.colsurfa.2018.07.001.
- (10) Perween, S.; Thakur, N. K.; Beg, M.; Sharma, S.; Ranjan, A. Enhancing the properties of water based drilling fluid using bismuth ferrite nanoparticles. *Colloids and surfaces. A, Physicochemical and engineering aspects* **2019**, *561*, 165-177, DOI: 10.1016/j.colsurfa.2018.10.060.
- (11) Cui, F.; Dou, L.; Yang, Q.; Yu, Y.; Niu, Z.; Sun, Y.; Liu, H.; Dehestani, A.; Schierle-Arndt, K.; Yang, P. Benzoin Radicals as Reducing Agent for Synthesizing Ultrathin Copper Nanowires. *J. Am. Chem. Soc.* **2017**, *139*, 3027-3032, DOI: 10.1021/jacs.6b11900.
- (12) Nam, V. B.; Lee, D. Copper Nanowires and Their Applications for Flexible, Transparent Conducting Films: A Review. *Nanomaterials (Basel)* **2016**, *6*, DOI: 10.3390/nano6030047.
- (13) Maji, N. C.; Chakraborty, J. Gram-Scale Green Synthesis of Copper Nanowire Powder for Nanofluid Applications. *ACS Sustainable Chem. Eng.* **2019**, *7*, 12376-12388, DOI: 10.1021/acssuschemeng.9b01814.
- (14) Growcock, F.; Harvey, T. In *Chapter 2 - Drilling Fluids*; Drilling Fluids Processing Handbook; Gulf Professional Publishing: Burlington, 2005; pp 15-68.
- (15) API RP 13B-1 Recommended Practice for Field Testing Water-based Drilling Fluids. *American Petroleum Institute* **2009**.