

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO A NIVEL DE LABORATORIO DE UN LODO DE
PERFORACIÓN POLIMÉRICO BASE AGUA MEDIANTE LA ADICIÓN DE DOS
NANO-ADITIVOS PARA EL CONTROL DE FILTRADO Y DAÑO DE FORMACIÓN
EN LA ZONA PRODUCTORA DE LA FORMACIÓN MUGROSA EN LA CUENCA
DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA**

**ERIKA MARIA GALVIS DUITAMA
ALEJANDRA GUACHETÁ BUENDÍA**

**Proyecto integral de grado para optar por el título de
INGENIERO DE PETRÓLEOS**

**Orientador
Jorge Andrés Tovar Moreno
Ingeniero de petróleos**

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

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre
Firma del Director

Nombre
Firma del Presidente Jurado

Nombre
Firma del Jurado

Nombre
Firma del Jurado

Bogotá D. C., febrero de 2021

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claústro

(Dr.) MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA

Consejero Institucional

(Dr.) LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

(Dra.) MARÍA CLAUDIA APONTE GONZÁLEZ

Vicerrector Administrativo y Financiero

(Dr.) RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretaria General

(Dra.) ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN

Decano de la Facultad

(Dr.) JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI

Director de programa

(Ing.) JUAN CARLOS RODRÍGUEZ ESPARZA

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios por guiarme en cada etapa de mi vida y permitirme finalizar este sueño.

A mis padres Maria Elena Duitama Castañeda y Juan Norberto Galvis Rodríguez por su esfuerzo y apoyo a lo largo de mi carrera. Gracias por siempre guiarme, ser un ejemplo para mí y por enseñarme a dar lo mejor.

Al Señor Raúl Grisales Giraldo por su apoyo incondicional, sus consejos y por creer en mí.

A mi compañera de tesis Alejandra por ser una gran amiga, por su continuo esfuerzo y dedicación para culminar este proyecto, así como a su familia por apoyarnos constantemente.

Erika Maria Galvis Duitama

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, a mis padres y a mi hermana, por confiar en mí siempre y ser un apoyo incondicional en cada paso que doy en mi vida, cuidándome y dándome la fortaleza en los momentos más críticos que he necesitado para continuar con los retos que quería asumir, gracias a ellos soy lo que soy ahora. Mi abuela por estar siempre pendiente de mí. A Mateo Noriega por la comprensión que me ha brindado apoyándome en este proyecto y a mi compañera de tesis Erika por su paciencia y darme la oportunidad de realizar el proyecto a su lado.

Y, por último, a mis mascotas que me acompañaron a lo largo de mi carrera y mis trasnochos.

Alejandra Guachetá Buendía

AGRADECIMIENTOS

Principalmente queremos expresar nuestro agradecimiento a Dios y a nuestras familias, por brindarnos su apoyo constantemente y guiarnos en cada etapa de la carrera, así como a nuestros amigos por creer en nosotras.

De manera muy especial agradecemos al ingeniero Yesid Orjuela y la ingeniera Yessica Martínez por su disposición, paciencia, orientación y apoyo incondicional durante el desarrollo del proyecto.

A la ingeniera Natalia Ospina de Petroraza S.A quien donó las nanopartículas empleadas en esta investigación.

Al ingeniero Jorge Tovar por manifestarnos siempre su apoyo y orientación en cada fase de esta investigación.

Al ingeniero Nelson Fernández por apoyarnos al facilitarnos instrumentos de crucial importancia para formular los lodos investigados en este proyecto.

A la Fundación Universidad de América por formarnos como profesionales integras, y por proporcionarnos conocimientos necesarios para culminar la carrera.

Finalmente, a las personas que de cierta forma nos ayudaron, acompañaron y apoyaron para poder finalizar este trabajo.

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

TABLA DE CONTENIDO

| | Pág. |
|--|------|
| RESUMEN | 12 |
| INTRODUCCIÓN | 13 |
| 1. MARCO TEÓRICO | 16 |
| 1.1 Fluidos de perforación | 16 |
| 1.2 Nanotecnología aplicada a la industria petrolera | 22 |
| 2. METODOLOGÍA Y DATOS | 27 |
| 2.1 Etapa 1. Caracterización de las nanopartículas | 28 |
| 2.2 Etapa 2. Formulación del fluido base y nano-fluidos | 29 |
| 2.3 Etapa 3. Desarrollo de las pruebas de laboratorio fisicoquímicas | 33 |
| 2.4 Etapa 4. Evaluación del desempeño entre el lodo base y los nano-aditivos | 43 |
| 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS | 44 |
| 3.1 Caracterización de las nanopartículas | 44 |
| 3.2 Resultados de las pruebas básicas | 45 |
| 3.3 Resultados de las pruebas químicas | 55 |
| 3.4 Resultados de las pruebas especiales | 57 |
| CONCLUSIONES | 66 |
| REFERENCIAS | 68 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|------|
| Figura 1. Clasificación de los fluidos de perforación. | 17 |
| Figura 2. Propiedades fisicoquímicas de un fluido de perforación base agua. | 20 |
| Figura 3. Demostración de las nanosílice en los poros de la formación. | 25 |
| Figura 4. Metodología diseño experimental. | 27 |
| Figura 5. Orden de adición de los aditivos para la preparación de los lodos. | 30 |
| Figura 6. Clasificación de las pruebas fisicoquímicas. | 34 |
| Figura 7. Pruebas físicas básicas. | 35 |
| Figura 8. Pruebas físicas especiales. | 36 |
| Figura 9. Pruebas químicas. | 37 |
| Figura 10. Densidad. | 46 |
| Figura 11. Contenido de sólidos antes de rolar. | 47 |
| Figura 12. Contenido de sólidos después de rolar. | 47 |
| Figura 13. Reología API – Viscosidad plástica. | 48 |
| Figura 14. Reología API – Punto cedente. | 49 |
| Figura 15. Reología API – Geles antes de rolar. | 50 |
| Figura 16. Reología API – Geles después de rolar. | 51 |
| Figura 17. Filtrado API antes de rolar. | 52 |
| Figura 18. Función de las nanopartículas para el control de filtrado. | 53 |
| Figura 19. Revoque. | 53 |
| Figura 20. Lubricidad. | 54 |
| Figura 21. pH. | 55 |
| Figura 22. Alcalinidad. | 56 |
| Figura 23. Cloruros. | 57 |
| Figura 24. Filtrado HPHT. | 58 |
| Figura 25. Filtrado PPT – Filtración total. | 59 |
| Figura 26. <i>Filtrado PPT – Filtración total.</i> | 60 |
| Figura 27. Filtración dinámica en el fluido base. | 61 |
| Figura 28. Filtración dinámica en el fluido con 1 PPM de nano-sílice. | 62 |

| | |
|--|----|
| Figura 29. Filtración dinámica en el fluido con 2 PPM de nano-grafito. | 63 |
| Figura 30. Reología HPHT – Viscosidad plástica. | 64 |
| Figura 31. Reología HPHT – Punto cedente. | 65 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|---|------|
| Tabla 1. Formulaci3n del lodo base. | 31 |
| Tabla 2. Formulaci3n del lodo con nano-PetroSil500. | 32 |
| Tabla 3. Formulaci3n del lodo con nano-Grafito. | 33 |
| Tabla 4. Pruebas realizadas al lodo base. | 38 |
| Tabla 5. Pruebas realizadas a los nanofluidos de las dos concentraciones de nano-silice. | 39 |
| Tabla 6. Pruebas realizadas al lodo base modificado con la concentraci3n de nanopartcula de silice seleccionada. | 40 |
| Tabla 7. Pruebas realizadas al lodo base modificado con la concentraci3n de nanopartcula de silice no seleccionada. | 40 |
| Tabla 8. Pruebas realizadas a los nanofluidos de las dos concentraciones de nano-grafito. | 41 |
| Tabla 9. Pruebas realizadas al lodo base modificado con la concentraci3n nanopartcula de grafito seleccionada. | 42 |
| Tabla 10. Pruebas realizadas al lodo base modificado con la concentraci3n de nanopartcula de grafito no seleccionada. | 42 |
| Tabla 11. Caracteristicas de la nanopartcula de silice. | 44 |
| Tabla 12. Caracteristicas de la nanopartcula grafito. | 45 |
| Tabla 13. Valores m3ximos recomendados FANN 90. | 61 |
| Tabla 14. Condiciones de la prueba de reologfa HPHT. | 63 |

RESUMEN

Este proyecto tuvo como fin evaluar el desempeño a nivel de laboratorio de un lodo de perforación polimérico base agua mediante la adición de dos nano-aditivos para el control de filtrado y daño de formación en la zona productora de la Formación Mugrosa en el VMM. En el cual se analizó las nanopartículas de sílice y de grafito a concentraciones de 1 PPM y 2 PPM, a través de pruebas físicas básicas (densidad, reología API, filtrado API, control de sólidos, lubricidad), químicas (pH, alcalinidad y cloruros) y físicas especiales (filtrado HPHT, reología HPHT, filtrado PPT y filtración dinámica), donde se tiene en cuenta que estas últimas solo fueron realizadas al lodo base y a los nanofluidos que presentaron un mejor desempeño en las pruebas básicas. Adicionalmente el lodo fue sometido a un proceso de envejecimiento dinámico (Rolado por 16 hr) para simular las condiciones reales del reservorio.

En las pruebas básicas se demostró que las nanopartículas (sílice y grafito) logran disminuir en promedio un 23% en el filtrado API y a su vez disminuyen el espesor del revoque cerca del 50% en referencia al fluido base. Por otro lado, se observó que la adición de nanopartículas no genera cambios en las pruebas químicas, ni en el contenido de sólidos. Es importante resaltar que el fluido con 1 PPM de nano-sílice evidenció un descenso del 67% en el CDI, así como en la prueba PPT en la cual el filtrado descendió 13%. En cuanto al filtrado HPHT se obtiene una reducción del filtrado cercana al 10% y 4% para nano-sílice a 1 PPM y nano-grafito a la misma concentración, respectivamente.

PALABRAS CLAVES: fluido perforación, nanopartículas, filtrado, retorta, daño formación, sílice, grafito.

INTRODUCCIÓN

En la industria de petróleo y gas un pozo puede transitar por distintas etapas operativas, una de estas es la perforación, donde uno de los aspectos más relevantes es la adecuada formulación del fluido de perforación para asegurar que este cumpla sus funciones, algunas de estas son mantener el hoyo estable, manejo adecuado de los recortes a superficie, proveer a la broca energía hidráulica, mantener la lubricación de los equipos en fondo y evitar alteraciones en las propiedades del yacimiento. Todo esto con el fin de obtener un pozo en óptimas condiciones para continuar de forma satisfactoria con las demás operaciones.

En pozos que se encuentran a condiciones de alta temperatura y presión, un fluido de perforación polimérico base agua puede presentar distintos problemas asociados al diseño inapropiado del mismo, puesto que las condiciones extremas suelen causar degradación de los aditivos lo que a su vez provocaría que el fluido no logre cumplir con sus funciones, llegando a generar problemas con la tubería de perforación, como por ejemplo pegadas de tubería por falta de limpieza eficiente del pozo y aumento en el torque y arrastre e incluso problemas en la cementación del hueco al registrar un bajo rendimiento en el control de filtrado y daño de formación a causa de que el revoque no se logró formar de manera adecuada. Sumado a esto, la baja inversión en nuevas tecnologías para el desarrollo de nuevos aditivos disminuye la rentabilidad de un proyecto, aumentando los costos y los tiempos no productivos.

El proyecto pone a prueba las innovaciones tecnológicas que se han desarrollado en el campo de las nano-partículas teniendo en cuenta las interacciones que tienen estas con el medio en el que son aplicadas, para esto, se utilizaron fluidos base agua que generalmente no se utilizan en pozos HPHT, debido a que la resistencia térmica de su estructura no es efectiva, para así poder demostrar la rentabilidad y la eficiencia del uso de nanopartículas en fluidos de perforación para pozos profundos, además de reducir el índice de contaminación que provocan los lodos base aceite, los cuales son utilizados generalmente para este tipo de condiciones extremas de perforación.

En los últimos años las nanopartículas han sido implementadas en lodos de perforación principalmente en aquellos con base acuosa con el fin de reducir los problemas que se generan durante esta operación, en muchas ocasiones para disminuir el daño de formación y el filtrado. En el texto “Application of Aluminium Oxide Nanoparticles to Enhance Rheological and Filtration Properties of Water Based Muds at HPHT Conditions” [1] se obtuvieron resultados satisfactorios, donde se evidenció que existen concentraciones óptimas de las nano partículas de sílice y de óxido

de aluminio que se pueden usar para mejorar las propiedades reológicas y de filtración de los fluidos de perforación en un 17%. Además, demostraron que los fluidos con adición de nanopartículas tienen una mejor estabilidad térmica a temperaturas elevadas de alrededor de 320 °F y pueden mantener las condiciones extremas en operaciones de perforación avanzadas. Así mismo, en el trabajo de Alejandro Flores [2] se menciona la facultad que tienen las nano-partículas para adecuarse a cualquier situación en particular, puesto que estas tienen un comportamiento no reactivo que permite ser usado para muchos propósitos, principalmente como aditivo cuando las condiciones extremas de temperatura y presión están presentes en un sistema, a causa de que su estructura molecular y tamaño permiten ajustarse a las disposiciones térmicas a las que es sometido el pozo a grandes profundidades, esto se debe a que su composición tiene la propiedad de desplazar fácilmente la temperatura, es decir, mantiene una estabilidad térmica que le permite al lodo mantener sus propiedades íntegras y facilitar el trabajo de perforación en pozos de alta complejidad y alta profundidad.

En Colombia se han realizado diversos estudios referentes a la adición de nano-partículas en el fluido de perforación base agua, como nano-aditivos de base sílice en el Campo Chichimene para el hinchamiento de arcillas, en Campo Castilla se ha trabajado con óxido de grafeno para el daño de formación y en el trabajo “Mejoramiento de los fluidos de perforación usando nano-partículas funcionalizadas: reducción de las pérdidas de filtrado y del espesor de la retorta” realizado en laboratorio [3], se evidenció un mejoramiento del filtrado con las nanopartículas de alúmina.

El objetivo general de este trabajo de grado fue evaluar el desempeño a nivel de laboratorio de un lodo de perforación polimérico base agua mediante la adición de dos nano-aditivos para el control de filtrado y daño de formación en la zona productora de la Formación Mugrosa en la Cuenca del VMM. Los objetivos específicos fueron:

- Evaluar el rendimiento del fluido polimérico base agua convencional que es usado actualmente en la perforación de la Formación Mugrosa mediante pruebas de laboratorio.
- Realizar la formulación en laboratorio de un fluido polimérico base agua empleando dos nano-aditivos de diferente base para el control de filtrado y daño de formación.
- Realizar las pruebas a nivel de laboratorio en los fluidos poliméricos a base de nanotecnología para el análisis del desempeño en el control de filtrado y daño de formación.

- Evaluar el desempeño de los dos nano-aditivos utilizados para la reducción del daño de formación y del filtrado en un lodo polimérico base agua con respecto al lodo polimérico convencional mediante la comparación de los resultados obtenidos en laboratorio.

Este estudio busca que mediante la adición de nanopartículas al fluido de perforación polimérico base agua mejoren las propiedades físicas relacionadas con el control de filtrado, reología y daño de formación, permitiendo a su vez mantener el fluido estable a condiciones HPHT al momento de la perforación de la Formación Mugrosa de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena. Por lo cual se reemplazó el aditivo de control de filtrado en la formulación del lodo base por las nanopartículas por separado, para mejorar el control de filtrado y el daño de formación.

Con el fin de dar cumplimiento a los objetivos específicos, en el capítulo de metodología, en las secciones 2.2 (2.2.1) y 2.3 (2.3.1) se describen los procedimientos para la formulación del fluido base-convencional. Así mismo en se describen las pruebas de laboratorio realizadas al fluido base-convencional dando cumplimiento al primer objetivo evaluando el rendimiento del fluido polimérico base agua convencional. Respecto al segundo objetivo específico que contempla la formulación de los (4) nano-fluidos se indica en las secciones 2.2.2 y 2.2.3. En las secciones 2.3.2 y 2.3.3 se detallan las pruebas realizadas a los nano-fluidos dando cumplimiento al tercer objetivo específico. Finalmente, en relación al cuarto objetivo específico, que hace referencia a evaluar el desempeño de los (4) nano-fluidos con respecto al fluido base-convencional, en la sección 2.4 se realizará una comparación mediante cuadros o graficas de los resultados obtenidos de la sección 2.3 para posteriormente indicar en el capítulo de conclusiones cual fluido tuvo un mejor desempeño.

1. MARCO TEÓRICO

En este primer capítulo se encuentran los aspectos teóricos en los que esta investigación fue basada para su desarrollo, es decir, en los fluidos de perforación poliméricos base agua, los cuales pueden ser clasificados de acuerdo a su función y estructura química, de estos tipos se realizó una descripción más detallada de los lodos poliméricos. Adicionalmente se puntualizan las propiedades físicas y químicas de interés del proyecto y por último la nanotecnología aplicada en la industria petrolera referente al uso de las nanopartículas a base de sílice y grafito, especialmente en los fluidos de perforación.

1.1 Fluidos de perforación

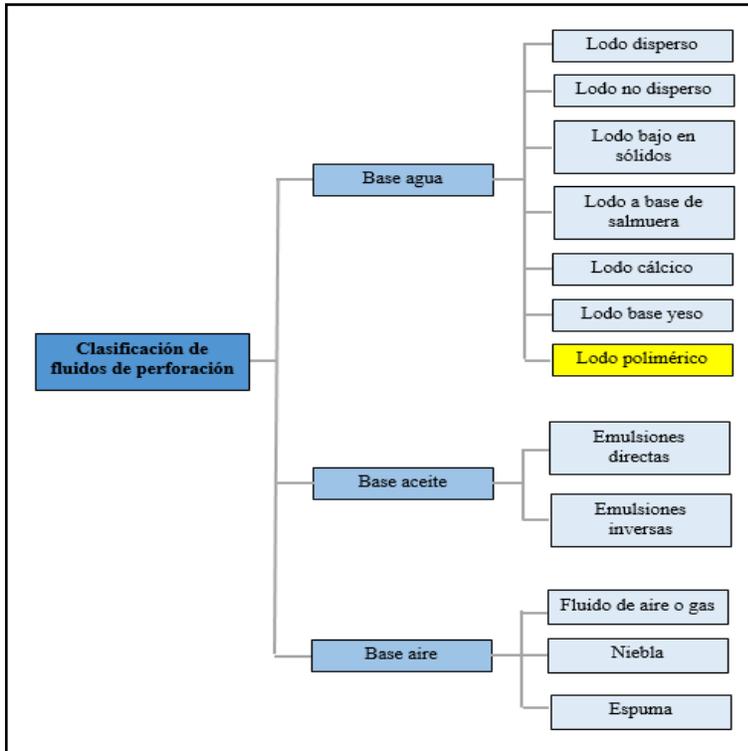
El inicio de la industria petrolera se ve enmarcado por la perforación de pozos que comunican la superficie y la roca reservorio, desde este momento los fluidos de perforación han jugado un papel muy importante, a causa de que para que el programa de dicha operación sea exitoso el desempeño del fluido de perforación debe ser el adecuado [4], es decir, debe realizar diferentes funciones, en las que se destaca el control de flujos del yacimiento al pozo mediante la presión hidrostática, en otras palabras, ser la primera barrera para el control de pozos. Adicionalmente, el lodo es el encargado de remover todos los recortes generados por la broca permitiendo que se mantengan en suspensión cuando se detenga la circulación por un lapso de tiempo, pero a su vez aceptando que se integren al sistema cuando esté siendo circulado, esto con el fin de evitar pega de la sarta de perforación y generación de pescados [5]. De este mismo modo debe cumplir con unas características importantes como lo son: proveer protección a las formaciones perforadas para tener un buen manejo de filtrado y reducir al mínimo el daño de formación, ser estable con las formaciones reactivas, una excelente lubricidad y un buen control de temperatura, entre otros.

Es importante mencionar que el fluido de perforación cuenta con diferentes componentes que se dividen en fase continua (agua, aceite o gas), parte coloidal (arcilla, polímeros, otros), parte inerte (materiales densificantes, viscosificantes, entre otros), y finalmente una fase dispersa (sólidos) que brinda al lodo diferentes propiedades que permiten que las funciones anteriormente descritas se puedan realizar [6].

Estos fluidos pueden ser de distintas clases de acuerdo a la fase continua contemplada en su formulación, esta clasificación se puede evidenciar en la Figura 1.

Figura 1.

Clasificación de los fluidos de perforación.



Nota: La figura evidencia la clasificación de los fluidos de perforación según Halliburton Latin America S.A. [7], se encuentra resaltado en color amarillo el tipo de fluido trabajado en esta investigación.

1.1.1 Fluidos de perforación base agua

Este tipo de lodo es llamado de esta manera porque su fase continua es agua, la cual puede ser salada o dulce. Es la clase más utilizada a razón de que este es el material más abundante en el planeta, su pH es neutro lo que lo hace ideal para trabajar en todo tipo de lugar, es el solvente natural por excelencia que asegura una mezcla de casi todos los compuestos, no contamina y los sólidos recuperados junto al agua tienen un proceso de tratamiento más sencillo que en el caso de un lodo base aceite. Su mayor problema es en formaciones muy permeables y/o con fracturas causado porque la fase continua del lodo empieza filtrarse a la roca, disminuyendo el volumen de fluido que debe circular al pozo y causando a su vez daño de formación, pérdida de presión hidrostática, entre otras [8]. Es importante mencionar que el daño de formación también se puede

deber a invasión de sólidos generando taponamiento de las gargantas de poros. Sin embargo, se han hecho avances en la tecnología para manejar estos problemas creando aditivos como controladores de filtrado (CMC, almidón, entre otros) que cumplen con la función de evitar que una gran cantidad de agua se filtre teniendo en cuenta la formación de una retorta impermeable y delgada.

Como se evidenció en la Figura 1, los fluidos de perforación base agua pueden ser de distintos tipos de acuerdo a las condiciones y secciones que se estén perforando, algunos de ellos son [8]:

a. Fluidos de perforación dispersos. Este fluido en general contiene bentonita, dispersantes (lignosulfonatos y lignitos) junto con el activador del mismo y agua. Se utiliza en perforaciones de secciones muy profundas donde es vital controlar la hidratación de las arcillas y proporcionar estabilidad al agujero, generando el menor daño de formación posible. Adicional a esto cuenta con una buena estabilidad térmica, aunque se debe tener presente el tiempo estimado de exposición a alta temperatura, así como una excelente tolerancia a la contaminación.

b. Fluidos de perforación no dispersos. No contiene agentes adelgazantes, y al contrario al anterior tipo de lodo, estos se utilizan en pozos someros, o en la perforación de la primera sección, y es formulado con el fin de proveer funciones básicas como lubricar la broca y la capacidad de llevar los sólidos a superficie para obtener altas velocidades de perforación. Estos no cuentan con alta resistencia a los contaminantes, ni a las altas temperaturas, a causa de que en su composición no hay muchos agentes químicos.

c. Fluidos de perforación con bajo contenido de sólidos. Este tipo de lodos no puede presentar porcentaje de sólidos totales mayores a 10%, para esto junto con la bentonita se utiliza un extendedor para que el fluido logre limpiar el agujero encapsulando los sólidos, pero manteniendo una buena tasa de penetración, por lo que es necesario mantener un constante monitoreo de la cantidad de sólidos. Generalmente se utilizan en formaciones que cuenten con arcilla compacta en sus matrices.

d. Fluidos de perforación a base de salmuera. Son llamados de esta forma porque su diseño contiene una alta cantidad de sal, en general se utiliza cloruro de sodio, llegando a tener cantidades mayores a 189000 ppm. Se utilizan en zonas donde estén presentes domos salinos o en formaciones que pueden reaccionar con el agua dulce, evitando así alterar las características de las formaciones. Tiene una estabilidad térmica limitada y en presencia de alto contenido de sólidos de baja gravedad específica suelen cambiar las propiedades del mismo.

e. Fluidos de perforación cálcicos. Son otro tipo de fluidos base agua inhibidores, los cuales utilizan cal apagada para impedir que las arcillas de algunas formaciones se hinchen y a su vez ensanchen el agujero desestabilizándolo, además se hace uso de ellos en formaciones productoras para evitar el daño de formación. Empiezan a perder su estabilidad al llegar a temperaturas mayores de 250 °F, pero son muy resistentes a los contaminantes con sal.

f. Fluidos de perforación poliméricos. Esta investigación se basó en el tipo polimérico, el cuál es el lodo más utilizado en la perforación de pozos en Colombia, en especial la Formación Mugrosa de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena. Esto se debe a que cuenta con polímeros de alto peso molecular, cadenas largas, solubles en agua dulce y salada, al igual que en aceite, además pueden soportar temperaturas de hasta 300°F, por lo que puede cumplir con diferentes funciones [9] como:

- ✓ Conservar una adecuada limpieza del pozo encapsulando los recortes.
- ✓ Cubrir a las formaciones con lutitas para evitar que se incorporen al sistema de fluido, y tampoco se hidraten.
- ✓ Controlar o reducir la pérdida de filtrado.
- ✓ Floculación o defloculación de los coloides presentes en el fluido.

Cabe resaltar que esta clase de fluido también cuenta con limitantes para que realice un buen desempeño, debe poseer un pH más alto que los usuales, es decir, entre 9.5 y 9.9, se deben adicionar bactericidas a razón de que los polímeros pueden sufrir cambios al entrar en contacto con bacterias, sales, ácidos, bases, incluso oxígeno [10].

Algunos de los polímeros más utilizados en los lodos de perforación son la goma xantha, PAC L, PAC R, goma guar, poliacrimida parcialmente hidrolizada (PHPA), almidón, copolímero de vinil amida, entre otros. [8]

1.1.2 Propiedades fisicoquímicas de los fluidos de perforación

Durante la perforación de pozos los aspectos de mayor importancia son las propiedades fisicoquímicas, esto se debe a que estas permiten que el fluido cumpla con cada una de sus funciones, y adicionalmente, al ser estudiadas se puede obtener información sobre las condiciones del pozo durante la operación señalada.

Figura 2.

Propiedades fisicoquímicas de un fluido de perforación base agua.

| Propiedad | Unidad | Descripción |
|---------------------|--------------------|---|
| Densidad | ppg | Relacionada con el peso del lodo, encargada de mantener la presión hidrostática que ejerce la columna de fluido alrededor de 100 psi más que la presión de la formación, esto con el fin de dar estabilidad al pozo y evitar arremetidas. Cabe destacar que este valor no debe ser muy elevado, pues se pueden producir fracturas en las formaciones. |
| Reología | | Estudia la deformación de los fluidos y los sólidos suspendidos en estos, al igual que el flujo de los mismos de acuerdo a los cambios de temperatura y presión. Evalúa la capacidad del lodo para extraer los recortes del fondo de pozo. |
| Viscosidad plástica | cP | Medida de la resistencia del fluido a fluir, esto se debe a la fricción mecánica entre los sólidos presentes en un fluido, y depende de la cantidad, forma y tamaño de los mismos. Es importante resaltar que al mantener esta característica baja junto con un alto punto cedente habrá una limpieza adecuada del agujero y a su vez altas tasas de penetración. |
| Punto cedente | lb/ft ² | Es el cálculo de la fuerza de atracción entre las partículas mientras se encuentran en condiciones de flujo. Y se relaciona con la limpieza que desarrolla el fluido cuando se encuentra en condiciones dinámicas. |
| Resistencia gel | lb/ft ² | Medición de la atracción entre las partículas que tiende a gelificar el lodo en estado estático, para así evitar este proceso. Se relaciona con la capacidad de mantener el peso y los recortes suspendidos cada vez que la circulación se detenga, adicionalmente permite que las bombas tengan un buen rendimiento y que los sólidos se asienten en los tanques de superficie al pasar por el controlador de arena. |
| Filtrado | | Indica el volumen que ingresa a la formación permeable de la fase líquida del lodo, una vez la presión hidrostática supera la presión de la formación, formando así el revoque en la cara de dicha formación. Esta propiedad se puede ver afectada por la presión, la temperatura, el tiempo y la dispersión de los sólidos en el fluido. |

Figura 2. Continuación.

| Propiedad | | Unidad | Descripción |
|--------------------|------|-------------|--|
| Filtrado | | | Cabe destacar que existen dos tipos de filtrados, como: Filtrado estático: Volumen que ingresa cuando la circulación del lodo se detiene. Filtrado dinámico: Volumen que se filtra cuando el lodo esta en circulación. |
| | API | (ml/30 min) | El filtrado estático se obtiene al someter el fluido de perforación a una filtroprensa que maneja 100 psi de presión y la temperatura ambiente para reconocer el comportamiento de la retorta, junto con el volumen de filtrado en la misma. |
| | HPHT | (ml/30 min) | Si el pozo es de gran profundidad el filtrado estático es conocido al realizar una prueba del lodo de perforación en una filtroprensa que maneja altas presiones y altas temperaturas que simulan el ambiente del mismo. |
| pH | | Adim. | Representa la cantidad de iones de hidrógeno presente en un fluido, para así poder definir si es de tipo básico o ácido. Los fluidos de base agua generalmente tiene un rango de pH entre 7.5 a 11.5. |
| Alcalinidad | | (cc/cc) | Esta propiedad se refiere a la cantidad de iones solubles en el agua que llegan a neutralizar ácidos. |
| Cloruros | | (mg/L) | Evidencia la cantidad de sal que aportan las formaciones salinas, es decir, la concentración de iones de cloro presentes en el filtrado del lodo. Se debe llevar un control de esta propiedad porque puede generar cambios en la reología del fluido. |

Nota: En la figura se describen las propiedades de interés de los fluidos de perforación base agua.

La información fue extraída del libro Fluidos de perforación de PDVA [11]

De acuerdo al tipo de lodo diseñado las propiedades mostradas en la Figura 2 pueden presentar distintos rangos, pero tienen en común su definición y que deben mantenerse con el paso de tiempo, así que al sufrir algún cambio durante la operación de perforación se debe realizar correcciones para garantizar que el proyecto finalice de manera óptima y rentable.

1.1.3 Restricciones de los fluidos de perforación.

Los lodos utilizados actualmente se desempeñan de forma adecuada, sin embargo, aún existen algunas características que no han sido superadas en su totalidad, por lo cual se conserva una

búsqueda constante de aditivos o procedimientos que mejoren estos aspectos. Algunas de las limitaciones de un fluido de perforación son [8]:

- ♦ Pérdidas de circulación: Disminución gradual de volumen de fluido tanto dentro del pozo, como en tanques de superficie, cabe resaltar que es en este último dónde se puede evidenciar la pérdida del lodo. Esta situación suele presentarse cuando la formación de la retorta no es la apropiada, porque la formación puede ser muy permeable o pudo sufrir fracturas por sobrepresiones generadas en las diferentes operaciones de la sarta de perforación. Esto puede causar inestabilidad en el agujero por lo que podría ser suspendida la operación de perforación hasta lograr hallar el motivo de las pérdidas de fluido y posterior solución.
- ♦ Daño de formación: Es la disminución de la capacidad productiva natural de la formación de interés que limita el desplazamiento de los fluidos contenidos en el yacimiento hacia el pozo, esto se debe a que el medio poroso se encuentra restringido, es decir, los espacios porosos interconectados se encuentran taponados por sólidos, fluidos de perforación, entre otros. Esto se puede dar desde el primer instante en que la sarta de perforación entra en contacto con la zona de interés hasta su completamiento. En caso de que el pozo sea inyector afecta la capacidad de que la formación reciba los fluidos a alta presión, y en caso de que sea un pozo productor gran cantidad de los hidrocarburos que se esperan producir pueden quedar atrapados en la formación al no poder migrar hacia el agujero donde se encuentra la tubería de producción.

1.2 Nanotecnología aplicada a la industria petrolera

El termino de nanotecnología fue mencionado por primera vez en 1959 en el trabajo “En el fondo hay espacio de sobra” (There's a Pretty Room at the Bottom) del profesor Richard Feynman, posteriormente, en 1974 el termino fue nuevamente nombrado por Torino Tanuguchi [12]. A partir de allí se formó una nueva ideología en el mundo en términos de ciencia, donde la National Nanotechnology Initiative junto a la IUPAC establecen que los elementos nanos tienen dimensiones entre 1 – 100 nanómetros, lo que permite aprovechar su escala para cambiar diferentes aspectos a nivel comercial en diferentes industrias.

En la industria petrolera, en específico en la operación de perforación se han realizado estudios que aprovechan el tamaño de las nanopartículas, así como otras características de estas para obtener mejoras en las condiciones reológicas del lodo, sin embargo la mayoría de los trabajos a

nivel de campo se tratan sobre el tratamiento de los fluidos de perforación que contienen diferentes aditivos y causan efectos secundarios tanto en las propiedades físico-químicas del lodo como en los pozos cuando hay una degradación térmica [13], causando acciones hacia la formación no esperadas. Ante estos estudios las nano-partículas más utilizadas a nivel laboratorio son: el óxido de grafeno, nano tubos de carbono, alúmina y nano sílice, de acuerdo a los estudios realizados por Halliburton Baroid en Oman [4], junto con mediciones de laboratorio por M-I SWACO (a Schlumberger Company) en Francia. [14]

1.2.1 Caracterización de las nanopartículas

Los nanomateriales generalmente son estudiados por medio de ciertas pruebas que identifican las características más importantes como lo son el tamaño de partícula, el área superficial, el volumen de poro, entre otras. Algunas de estas son:

a. Prueba de dispersión dinámica de luz: Esta práctica permite determinar el tamaño de la nanopartícula al estudiar el movimiento térmico aleatorio de estas al estar diluidas en agua, es decir, estudia el movimiento Browniano en una muestra de partículas. Es importante saber que para poder tomar una buena medición del tamaño de la nanopartícula se requiere controlar la temperatura, debido a que la velocidad de los movimientos depende de esta, así como del tamaño, pues al ser más pequeñas la dispersión se dará más rápido que al tener un mayor tamaño. Esencialmente, esta técnica se basa en el efecto Doppler, donde se menciona que la dispersión de la luz cambia al atravesar un medio con partículas en movimiento. [15]

b. Prueba de adsorción de nitrógeno a 77 °K: Esta técnica de adsorción física es usualmente utilizada para conocer el área superficial, volumen y tamaño de poro en materiales mesoporales, y trata sobre la medición de la cantidad de adsorbato (que en este caso es nitrógeno) presente en la superficie del sólido a diferentes presiones relativas. [16]

Para poder interpretar los resultados obtenidos de esta prueba existen diferentes métodos, como lo son [17]:

- ♦ Método de Langmuir: El método considera que la superficie del sólido cuenta con una cadena de centros bidimensionales que tienen la capacidad de adsorber una sola molécula de nitrógeno, formándose así una monocapa de moléculas adsorbidas que no interactúan entre sí. Básicamente, cuando la molécula tiene contacto con la superficie se genera una condensación que permanece durante un tiempo y posteriormente se reevapora, cabe destacar que esto pasa

en varias capas, pero Langmuir se limitó a realizar el estudio en la primera capa, con el fin de conocer el área superficial.

- ♦ Método de BET: Este fue desarrollado por Brunauer, Emmett y Teller, conocido por sus siglas BET. La ecuación considera que las fuerzas de atracción de Van der Waals son las responsables del proceso de adsorción física, es decir, este proceso se debe a la cinética entre las moléculas neutras, donde cada capa adsorbida cuenta con equilibrio dinámico entre las moléculas adsorbidas y las que se encuentran en fase gaseosa, ampliando el estudio de la condensación- evaporación a las otras capas formadas, obteniendo información del área superficial, el volumen y tamaño de poro del material mesoporal.
- ♦ Método t-Plot: Boer y Lippens desarrollaron esta práctica que se basa en la relación lineal que hay entre la cantidad de nitrógeno adsorbido por el sólido a bajas presiones relativas y el espesor de la capa que se genera al realizar este proceso, en otras palabras, conjetura que este espesor resultante está en función de las presiones relativas. Adicionalmente, supone que las capas adsorbidas cuentan con la misma densidad del nitrógeno que ha pasado a estado líquido al entrar en el proceso de condensación- evaporación para así poder calcular los valores del espesor estadístico de la capa adsorbida (t).

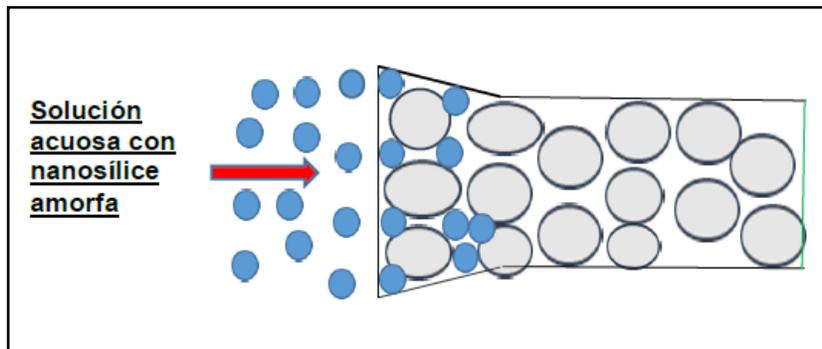
1.2.2 Nanopartículas de Sílice

Las nanosílice han sido objeto de investigación desde la década de los 90's en diferentes industrias, desde la construcción hasta la industria de petróleo y gas. Este tipo de investigaciones siempre buscan obtener la mejor opción un producto que modifique la reología del fluido y a su vez controle el volumen de filtrado y forme una retorta o revoque resistente en la cara de la formación.

Estas nanopartículas son utilizadas en los fluidos de perforación como un aditivo que logra disminuir la filtración del agua a los poros de las formaciones, al taponar las gargantas de estos, tomando como ventaja el tamaño con el que cuentan [8], como se puede observar en la Figura 3.

Figura 3.

Demostración de las nanosílice en los poros de la formación.



Nota: Descripción visual de la forma en la que las gargantas de los poros de la cara de a formación son taponamos por las nanopartículas. Imagen tomada del trabajo de grado de Prieto. [8]

Tener en cuenta un nanoaditivo de sílice en el diseño y formulación del lodo puede acarrear diferentes ventajas como lo son:

- ◆ Disminuye la permeabilidad al formar la retorta de forma eficiente y disminuyendo a su vez la pérdida de filtrado.
- ◆ Construye un revoque adecuado, es decir, el espesor de este suele ser menor o igual a 2/32 in, generando impermeabilidad en las paredes del agujero.
- ◆ Las propiedades reológicas del fluido de perforación son buenas y perduran con el tiempo.
- ◆ No son tóxicas, son biodegradables y pueden ser retiradas de la formación fácilmente.
- ◆ Aportan al fluido de perforación estabilidad térmica y lubricidad, reduciendo la abrasión.
- ◆ En formaciones perforadas con lodos base agua con presencia de lutitas evitan el hinchamiento de los minerales, proporcionando estabilidad al pozo.

1.2.3 Nanopartícula de Grafito

Esta nanopartícula ha sido poco estudiada hasta el momento, generalmente es adicionada a fluidos base agua para disminuir el filtrado a la formación, aunque también puede ser agregada a fluidos base aceite, teniendo en cuenta que el fluido también contiene alguna otra nanopartícula.

Adicionar nanopartícula de grafito a un fluido de perforación genera buenas respuestas para controlar el filtrado, disminuyéndolo cerca de un 78% [18], igualmente mejora las propiedades reológicas, generando una limpieza del hoyo más eficiente.

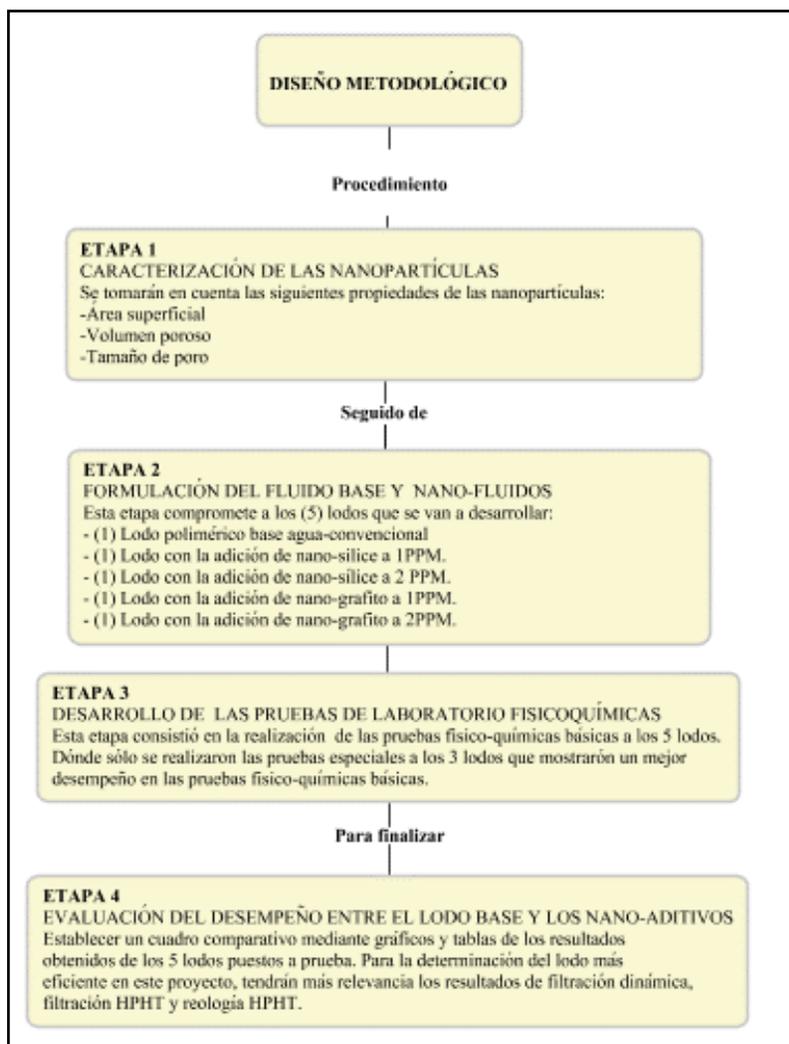
A pesar de que no se cuenta con mucha información sobre los beneficios del uso de nanograpito, si existe evidencia de que el grafito como aditivo al ser combinado con nanopartículas de óxido de grafeno y de sílice logra estabilizar las arcillas, evitando que estas reaccionen con el lodo y a su vez disminuye el filtrado que ingresa a la formación, es importante mencionar que este aditivo presenta mejores resultados cuando se agregan cantidades menores a 2 wt% [19]. Adicionalmente en el estudio realizado por Amarandiz & Imqam se pudo demostrar que la adición de solo grafito logra disminuir el 10% de filtrado LTLP y HPHT frente al obtenido en el fluido base, pero se genera una mejor respuesta de estos filtrados al mezclar el grafito con las nanopartículas mencionadas, puesto que hay una optimización de los filtrados LTLP y HPHT de 20.93% y 27.21% respectivamente.

2. METODOLOGÍA Y DATOS

En esta sección se realizó una descripción detallada de las etapas que constituyen la investigación, donde en la primera etapa se caracterizó las nanopartículas utilizadas (nano-sílice y nano-grafito), en la segunda etapa se detalló la formulación de cada uno de los lodos, en la tercera etapa se describió las pruebas tanto físicas como químicas realizadas a los fluidos. Así mismo, se mencionaron los equipos, ecuaciones usadas y las condiciones a las cuales se llevaron a cabo las pruebas. Por último, en la cuarta etapa se recolectaron los datos de las pruebas para su posterior análisis.

Figura 4.

Metodología diseño experimental.



Nota: La figura representa una descripción general de las etapas de desarrollo del proyecto.

2.1 Etapa 1. Caracterización de las nanopartículas

Las nanopartículas de sílice y grafito utilizadas en el desarrollo de esta investigación fueron proveídas por Petroraza S.A., con la finalidad de establecer el comportamiento de éstas en un lodo polimérico base agua utilizado en la perforación de pozos a grandes profundidades en el VMM en específico en la Formación Mugrosa.

Para caracterizar dichas nanopartículas la Petroraza S.A. realizó distintas pruebas que por cuestiones de confidencialidad no es posible evidenciar en este documento el proceso realizado para cada una de estas, aun así, en seguida se encuentra una breve descripción de manera general en la que se realizan estas prácticas, según la literatura consultada e información provista por la misma empresa.

2.1.1 Tamaño de nanopartícula

La determinación del tamaño de las nanopartículas se realizó a partir de dos técnicas basadas en la determinación del diámetro hidrodinámico mediante la dispersión dinámica de luz (DLS, por sus siglas en inglés) y en microscopía de transmisión.

El diámetro hidrodinámico de partícula fue determinado a través de la técnica de DLS, este análisis se realizó mediante la espectroscopia de correlación de fotones y las técnicas de dispersión de luz de electroforesis, utilizando el equipo NanoPlus3, el cual puede medir el tamaño de partícula de las muestras suspendidas en líquidos en el intervalo de 0.1 nm a 12.30 micras con concentraciones de suspensión de la muestra entre 5% a 40%. Para la medición del tamaño de las nanopartículas, se disponen de soluciones con baja concentración (menor a 100 ppm) de estas y se someten a un proceso de sonicación durante 4 horas, para garantizar una homogeneidad en la solución. El tamaño de partícula para cada concentración se midió hasta que el cambio fue despreciable [20].

Con la finalidad de observar la morfología de las nanopartículas y determinar el tamaño de partícula, se utilizó un microscopio electrónico de transmisión (TEM, por sus siglas en inglés), el cual usa un haz de electrones para visualizar un objeto. El TEM funciona con un haz de electrones generados por un cañón electrónico, acelerados por un alto voltaje y focalizados por medio de "lentes magnéticas", todo este proceso se realiza a alto vacío, debido a que en otro caso los electrones podrían ser desviados por el aire, las imágenes se tomaron con un microscopio Tecnai

G2 F20, después de haber preparado la muestra mediante ultrasonido para generar una mayor dispersión y obtener una imagen de buena calidad [20].

2.1.2 Área superficial, volumen y tamaño de poro

Para conocer estas características se realizó la prueba de adsorción de nitrógeno a una temperatura de 77 °K, donde se hizo uso de un equipo Quadrasorb, el cuál inyector nitrógeno a una muestra de las nanopartículas a diferentes presiones relativas para así poder realizar las gráficas de isotermas donde se evaluaba el volumen de nitrógeno adsorbido por presión relativa generada en el equipo. Cabe destacar, que estos esquemas resultantes dependieron del tipo de método de análisis utilizado, que para esta investigación fueron los de Langmuir, BET y t-Plot.

Finalmente, para conocer la superficie específica se tiene en cuenta la cantidad de adsorbato por gramo de adsorbente (V_m), el área ocupada por la molécula adsorbida en la superficie del sólido (A_m) y el número de Avogadro, los cuales están presentes en la siguiente ecuación [17]:

$$S = \frac{V_m}{22414} * N * A_m * 10^{-20}$$

Seguida a esta etapa inicial se evaluó la formulación del lodo base y las modificaciones que se realizaron en este para evaluar el rendimiento de las nanopartículas de sílice y grafito en la perforación de la Formación Mugrosa, como se describe en seguida.

2.2 Etapa 2. Formulación del fluido base y nano-fluidos

En esta etapa se detallan los aspectos tenidos en cuenta para la formulación de cada uno de los siguientes lodos:

- Lodo polimérico base agua-convenicional.
- Lodo con la adición de nano-sílice a 1PPM.
- Lodo con la adición de nano-sílice a 2 PPM.
- Lodo con la adición de nano-grafito a 1PPM.
- Lodo con la adición de nano-grafito a 2PPM.

Es preciso mencionar que a partir de los resultados, análisis de resultados y recomendaciones del trabajo de grado de Noriega & Nuñez [21] se concluyó que el rango óptimo para un buen

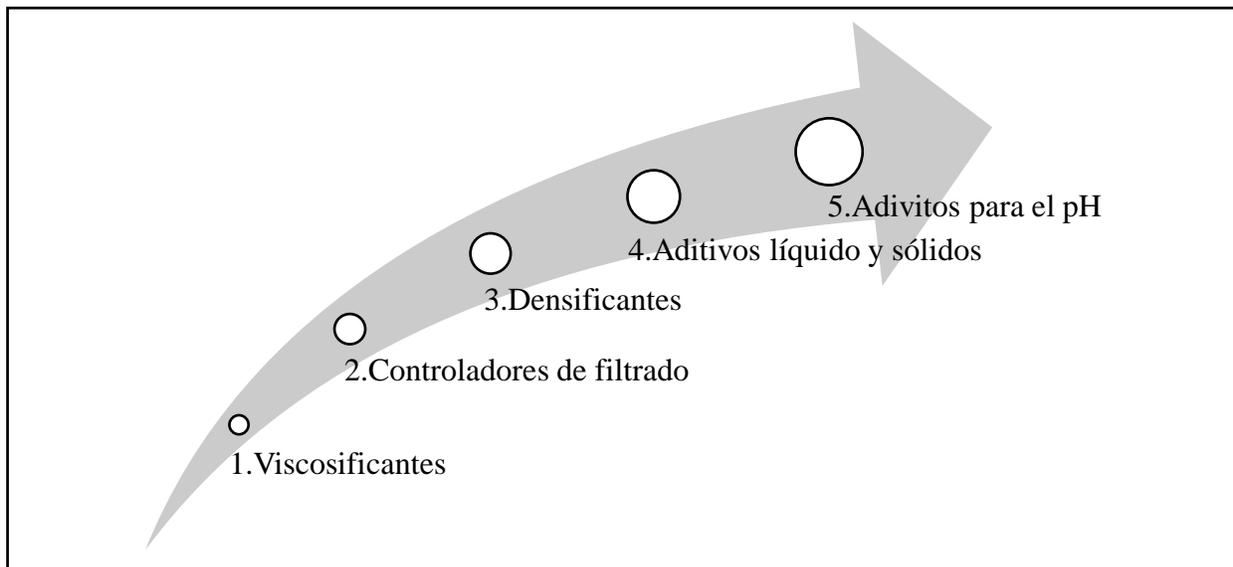
desempeño de la nanopartícula se encuentra entre 1 PPM y 2 PPM, es por eso que para una mayor diferencia en los resultados se eligieron los dos extremos del rango.

Debido a que la investigación se desarrolló a nivel de laboratorio se tuvieron en cuenta aspectos como:

- 1 bbl de lodo en laboratorio equivale a 350 cc.
- 1 lb/bbl es equivalente a 1 g/bbl.
- En cada uno de los lodos preparados se debió seguir un orden en específico en la adición de los productos en la mezcla, el cual se puede evidenciar en la Figura 5.

Figura 5.

Orden de adición de los aditivos para la preparación de los lodos.



Nota: La figura evidencia el orden en el que se agregaran los aditivos en la mezcla para la preparación de los diferentes lodos preparados en la investigación. Información extraída de Weatherford.

2.2.1 Lodo polimérico base agua-convencional

La formulación del lodo polimérico base agua convencional que es actualmente usado durante la perforación de la Formación Mugrosa en el VMM es de gran importancia debido a que esta unidad litológica es productora, lo que logra generar un amplio campo de estudio que tiene como fin mejorar este lodo, haciéndolo más eficiente. Las concentraciones empleadas para la formulación del lodo base en esta investigación se encuentran en la Tabla 1.

Tabla 1.

Formulación del lodo base.

| Función | Concentración (lb/bbl) |
|---------------------------|-------------------------------|
| Viscosificante | 1.5 |
| Inhibidor de arcilla | 6 |
| Encapsulador | 0.5 |
| Controlador de filtrado 1 | 2 |
| Controlador de filtrado 2 | 5 |
| Agente alcalino | 1 |
| Bactericida | 0.5 |
| Adelgazante | 0.5 |
| Agente de puenteo 1 | 5 |
| Agente de puenteo 2 | 20 |
| Agente de puenteo 3 | 20 |
| Agente de puenteo 4 | 50 |

Nota: La tabla expone las concentraciones a nivel de campo de cada uno de los componentes para la realización del lodo base. Información extraída del trabajo de grado de Noriega & Nuñez. [21]

Es importante resaltar que existe una alta presencia de carbonatos, los cuales asumen el papel de agentes de puenteo, cuyo objetivo principal es formar un sello en la cara de la formación de interés ayudando a proteger la zona productora de la invasión de la fase líquida y sólida presentes en el lodo de perforación [22]. Las propiedades que tendrán mayor relevancia al momento de realizar la comparación son la filtración tanto estática como dinámica, así mismo para una evaluación más completa se tendrá en cuenta la reología.

2.2.2 Lodo con nano-PetroSil500

En la formulación de este fluido de perforación se eliminaron los controladores de filtrado (1 y 2) presentes en el lodo polimérico base agua convencional y se sustituyeron por el nano-aditivo de sílice (PetroSil500), el cual es una nanopartícula sintética de base sílice con baja densidad y peso molecular, los cuales permiten mitigar problemas como pérdida de circulación y pega de tubería,

reduciendo el espesor de la retorta y a su vez la viscosidad plástica y el punto de cedencia. Se precisa que para esta formulación se obtuvieron dos lodos, uno con el nano-aditivo de sílice a 1 PPM y el otro con el nano-aditivo de sílice a 2 PPM. Estas concentraciones fueron elegidas debido a que en diferentes bibliografías consultadas muestran un mejor desempeño en la reducción del filtrado. [3]

Tabla 2.

Formulación del lodo con nano-PetroSil500.

| Función | Concentración (lb/bbl) | Concentración (PPM) |
|----------------------|-------------------------------|----------------------------|
| Viscosificante | 1.5 | - |
| Inhibidor de arcilla | 6 | - |
| Encapsulador | 0.5 | - |
| Nano-sílice | - | 1 |
| | - | 2 |
| Agente alcalino | 1 | - |
| Bactericida | 0.5 | - |
| Adelgazante | 0.5 | - |
| Agente de puenteo 1 | 5 | - |
| Agente de puenteo 2 | 20 | - |
| Agente de puenteo 3 | 20 | - |
| Agente de puenteo 4 | 50 | - |

Nota: La tabla menciona las concentraciones empleadas para la formulación del fluido con nano-PetroSil500.

2.2.3 Lodo con nano-Grafito

Para la formulación de este lodo los controladores de filtrado (1 y 2) presentes en el lodo fueron eliminados y sustituidos por el nano-grafito, el cual tiene un tamaño de 40 nm y una densidad aproximada de 2.26 g/cm^3 y logra a conservar las propiedades reológicas.

En el diseño este fluido de perforación con nano-grafito se evaluaron las mismas concentraciones que para la nano-sílice con el fin de poder establecer una comparación entre estas. Es decir, se obtuvieron dos lodos, uno con el nano-aditivo de grafito a 1PPM y el otro con el nano-aditivo de grafito a 2 PPM.

Tabla 3.*Formulación del lodo con nano-Grafito.*

| Función | Concentración (lb/bbl) | Concentración (PPM) |
|----------------------|-------------------------------|----------------------------|
| Viscosificante | 1.5 | - |
| Inhibidor de arcilla | 6 | - |
| Encapsulador | 0.5 | - |
| Nano-grafito | - | 1 |
| | - | 2 |
| Agente alcalino | 1 | - |
| Bactericida | 0.5 | - |
| Adelgazante | 0.5 | - |
| Agente de puenteo 1 | 5 | - |
| Agente de puenteo 2 | 20 | - |
| Agente de puenteo 3 | 20 | - |
| Agente de puenteo 4 | 50 | - |

Nota: La tabla menciona las concentraciones empleadas para la formulación del fluido con nano-grafito.

2.3 Etapa 3. Desarrollo de las pruebas de laboratorio fisicoquímicas

Esta etapa consistió en la elaboración de las pruebas físicas y químicas a nivel de laboratorio a los 5 fluidos anteriormente mencionados, de acuerdo con los parámetros establecidos por las normas API 13B-1, API SEPC 13A y ISO 10414. Donde la norma API 13 B-1 establece las prácticas recomendadas para las pruebas de fluidos de perforación a base de agua. [23], la norma API SEPC 13A cubre las propiedades físicas y los procedimientos de prueba de los materiales fabricados para su uso en fluidos de perforación de pozos de petróleo [24]. Y la norma ISO 10414 proporciona procedimientos estándar para determinar las características básicas de los fluidos de perforación a base de agua. [25]

A cada fluido de perforación se le realizaron 5 pruebas físicas básicas (densidad, contenido de sólidos, reología API, filtrado API y lubricidad), 3 químicas (pH, alcalinidad y cloruros) y a los 3 lodos que presentaron un mejor desempeño en las pruebas fisicoquímicas se le realizarán 4 pruebas especiales (filtración PPT, filtración dinámica, filtración HPHT y reología dinámica), las cuales

fueron las pruebas determinantes para seleccionar el fluido que presente un mejor desempeño tanto para el daño de formación como el control de filtrado.

Adicionalmente, cada lodo pasó por un proceso de rolado para simular el comportamiento de las propiedades de estos con el paso del tiempo al ser afectado por la temperatura. Para esto una vez formulados se eligió una muestra de cada uno para calentarlos a una temperatura de 230 °F por mínimo 16 horas y posteriormente se desarrollaron las pruebas. En la Figura 6 se detalla la clasificación de las pruebas de laboratorio realizadas.

Figura 6.

Clasificación de las pruebas fisicoquímicas.

| Pruebas de laboratorio | |
|-------------------------------|--------------------------------|
| Físicas básicas | Densidad |
| | Contenido de sólidos (retorta) |
| | Reología API |
| | Filtrado API |
| | Lubricidad |
| Físicas especiales | Filtración dinámica |
| | Filtración HPHT |
| | Filtrado PPT |
| | Reología HPHT |
| Químicas | pH |
| | Alcalinidad |
| | Cloruros |

Nota: La figura detalla las pruebas fisicoquímicas que fueron realizadas a los cinco lodos.

A continuación, se hace una descripción de cada prueba realizada junto con las fórmulas y las condiciones de operación empleadas. La realización detallada de cada prueba tanto física como química estará explicada en el Anexo 2.

- ◆ Pruebas físicas básicas. Estas pruebas fueron realizadas a los fluidos formulados en esta investigación y se encuentran descritas en la Figura 7, junto con las ecuaciones necesarias para alguna de ellas.

Figura 7.

Pruebas físicas básicas.

| Tipo | Prueba | Descripción |
|----------------------|--------------|--|
| Física básica | Densidad | Es la propiedad del fluido que permite ejercer un control sobre el pozo, a través del manejo de las presiones con el fin de asegurar la calidad de las operaciones durante la perforación. [21] |
| | Retorta | Es una prueba que se hace con el fin de establecer cuales es el contenido de sólidos y líquidos presentes en el lodo. Para conocer la Relación Sólidos-Agua es necesario hacer uso de la siguiente ecuación. [21] $RSA = \frac{\% \text{ sólido en la probeta}}{\% \text{ agua en la probeta}}$ |
| | Reología API | Esta prueba se relaciona directamente con los esfuerzos cortantes que genera el fluido de perforación a medida que se cumple la perforación. De igual forma la reología viene dada por la generación de fuerzas estáticas de gel para suspender los sólidos cuando se detiene la circulación y por el comportamiento del lodo para mantener los recortes en suspensión y llevarlos hasta superficie. [26] Consiste en estudiar la deformación y el flujo de la materia, las propiedades que se miden a través de las siguientes ecuaciones como viscosidad plástica (VP, plastic point) y punto cedente (YP, yield point). Además de medir resistencia gel (gel strenght). $VP (cP) = \theta 600 - \theta 300$ $YP \left(\frac{lb}{100 ft^2} \right) = \theta 300 - VP (cP)$ |
| | Filtrado API | El objetivo de esta prueba fue registrar la cantidad de invasión de fluido que se presenta en formaciones permeables a condiciones estándar de presión y temperatura, y se mide en centímetros cúbicos por 30 minutos (cc/30min). [3] |
| | Lubricidad | Evidencia la capacidad lubricante de los fluidos de perforación. Se utiliza una pieza metálica rozando otro metal y se determina el coeficiente de lubricidad que presenta el lodo. [21] |

Nota: La figura contiene una breve descripción de las pruebas físicas básicas, junto con las ecuaciones necesarias.

- ♦ Pruebas físicas especiales: este tipo de pruebas se realizaron tanto al lodo base como a los dos nanofluidos seleccionados de acuerdo a los resultados de las pruebas físicas básicas, teniendo en cuenta su buen rendimiento en el control de filtrado y daño de formación, la descripción de estas se encuentra en la Figura 8.

Figura 8.

Pruebas físicas especiales.

| Tipo | Prueba | Descripción |
|------------------------|---------------------|--|
| Física especial | Filtración dinámica | <p>El equipo Fann 90 con el que se realizó la prueba provee presión y temperatura para simular las condiciones del fondo de pozo. Así mismo, simuló la acumulación de revoque en la formación de la pared del pozo. La filtración ocurre radialmente desde el interior del núcleo del filtro hacia el exterior. [27] La prueba se realizó en un core de 5 micrones (750mD) a condiciones de 300°F y una presión diferencial de 500 psi.</p> $\text{Índice Fil. Dinámica} \left(\frac{mL}{min} \right) = \frac{(Vol. @ 60 min - Vol. @ 20 min)}{40 min}$ $CDI \left(\frac{mL}{hr^2} \right) = \frac{(Rata @ 60 min - Rata @ 20 min)}{40 min} * 3600 \frac{min^2}{hr^2}$ |
| | Filtrado HPHT | <p>Esta prueba evaluó las características del filtrado al estar cometido a condiciones de presión y temperatura, donde se manejó 500 psia y 150 °F respectivamente. El valor indicado del filtrado HPHT es igual a dos veces los centímetros cúbicos del filtrado captados dado que la celda del filtrado HPHT e igual a la mitad del área de filtración, como se puede evidenciar en la siguiente ecuación. [21]</p> $\text{Filtrado HPHT} = 2 * ml \text{ de filtrado}$ |
| | Filtrado PPT | <p>Esta prueba simuló el comportamiento del fluido en presencia de un medio con una permeabilidad considerable. Así que para el desarrollo de la prueba se empleó un disco de aloxita de 3-5 micrones para lograr simular la permeabilidad deseada.</p> |

Figura 8. Continuación.

| Tipo | Prueba | Descripción | | | | | | | | | |
|------------------|---------------|--|------------------|-------|-----|-----|-----|---------------|------|------|-------|
| Física especial | Filtrado PPT | <p>Uno de los resultados de esta prueba es el spurt loss, que es el volumen de fluido que logra pasar al medio antes de que el revoque sea formado, por lo que para conocer el filtrado total es necesario hacer uso de la siguiente ecuación. [27]</p> $\text{Filtrado PPT (mL)} = [2 * \text{Filt. 30 min(ml)}] + \text{Spurt loss (mL)}$ | | | | | | | | | |
| | Reología HPHT | <p>El equipo Fann 77 utilizado determinó la reología de los fluidos sometidos a altas presiones y temperaturas [27], registradas en la tabla a continuación.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Temperatura (°F)</th> <td>180</td> <td>230</td> <td>270</td> <td>300</td> </tr> <tr> <th>Presión (psi)</th> <td>5000</td> <td>7500</td> <td>10000</td> <td>14000</td> </tr> </thead> </table> | Temperatura (°F) | 180 | 230 | 270 | 300 | Presión (psi) | 5000 | 7500 | 10000 |
| Temperatura (°F) | 180 | 230 | 270 | 300 | | | | | | | |
| Presión (psi) | 5000 | 7500 | 10000 | 14000 | | | | | | | |

Nota: La figura contiene una breve descripción de las pruebas físicas especiales realizadas al lodo base y a los dos nano-fluidos seleccionados, junto con las ecuaciones necesarias.

- ♦ Pruebas químicas: estas pruebas fueron realizadas a todos los fluidos formulados antes de pasar por el proceso de envejecimiento dinámico, la descripción y ecuaciones se encuentran en la figura en seguida.

Figura 9.

Pruebas químicas.

| Tipo | Prueba | Descripción |
|---------|-------------|--|
| Química | pH | Esta prueba se hizo con el fin de mantener la alcalinidad del lodo y reducir posible corrosión en la tubería, a través de un electrodo. |
| | Alcalinidad | <p>Esta prueba se realizó para determinar la cantidad de iones HCO₃ y CO₃ presentes en el fluido de perforación.</p> $P_f = M_f = P_m = \frac{\text{cm}^3 \text{ de Ácido Sulfurico}}{\text{cm}^3 \text{ de muestra}}$ |

Figura 9. *Continuación.*

| Tipo | Prueba | Descripción |
|---------|----------|---|
| Química | Cloruros | <p>Esta prueba se realizó para determinar los iones cloruros presentes en el filtrado del lodo, donde se empleó nitrato de plata (AgNO₃) para titular.</p> $Cl^{-} = 1000 \frac{cm^3 \text{ de } AgNO \text{ gastados}}{cm^3 \text{ muestra de filtrado}}$ |

Nota: La figura contiene una breve descripción de las pruebas químicas a todos los lodos formulados en esta investigación, junto con las ecuaciones necesarias.

Como se mencionó anteriormente los lodos fueron sometidos a un proceso de rolado en donde se evaluaron las pruebas físicas y químicas para cada uno de ellos, a continuación, se muestra las pruebas efectuadas durante este proceso de rolado para los dos nano-fluidos y el lodo base.

2.3.1 Pruebas realizadas al lodo base

Las pruebas que se realizaron al lodo base están descritas en la Tabla 4, es necesario resaltar que se detalla la etapa en la que se encontraba el fluido, es decir, las pruebas realizadas antes y después del proceso de rolado.

Tabla 4.

Pruebas realizadas al lodo base.

| | | Antes de rolar | Después de rolar |
|----------------------------------|----------------------|----------------|------------------|
| PRUEBAS PARA EL LODO BASE | Densidad | X | X |
| | Retorta | X | X |
| | Reología API y geles | X | X |
| | Reología HPHT | | X |
| | Filtrado API | X | X |
| | Filtrado HPHT | X | X |

Tabla 4. *Continuación.*

| | | Antes de rolar | Después de rolar |
|----------------------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|
| PRUEBAS PARA EL LODO BASE | Filtrado PPT | | X |
| | Filtración dinámica | | X |
| | Lubricidad | X | X |
| | pH | X | |
| | Alcalinidad | X | |
| | Cloruros | X | |

Nota: La tabla especifica las pruebas que se realizaron al lodo base de acuerdo al período en el que transitaba.

2.3.2 Pruebas realizadas al lodo con adición de nano-sílice

Las concentraciones a utilizar de nano-sílice son de 1 PPM y 2 PPM con el fin de comparar y determinar cuál concentración de estas tiene un adecuado desempeño para mejorar el filtrado y el daño de formación en la zona productora. Las pruebas que se realizaron a los lodos modificados con la adición de la nanopartícula de sílice se encuentran descritas a continuación.

Tabla 5.

Pruebas realizadas a los nanofluidos de las dos concentraciones de nano-sílice.

| | | Antes de rolar |
|---|----------------------|-----------------------|
| PRUEBAS PARA EL LODO CON EL NANO ADITIVO DE SÍLICE | Densidad | X |
| | Retorta | X |
| | Reología API y geles | X |
| | Filtrado API | X |
| | Lubricidad | X |
| | pH | X |
| | Alcalinidad | X |
| | Cloruros | X |

Nota: La tabla indica las pruebas realizadas al lodo con nanopartícula de sílice a 1 PPM y 2 PPM antes de rolar, realizadas con el fin de determinar cuál concentración presentaba mejor rendimiento.

Una vez realizadas estas pruebas a los dos lodos, se seleccionó el fluido de mayor desempeño para realizar las pruebas mostradas en la Tabla 6.

Tabla 6.

Pruebas realizadas al lodo base modificado con la concentración de nanopartícula de sílice seleccionada.

| | | Antes de rolar | Después de rolar |
|--|----------------------|-----------------------|-------------------------|
| PRUEBAS PARA EL LODO CON EL NANO ADITIVO DE SÍLICE SELECCIONADO | Densidad | X | X |
| | Retorta | X | X |
| | Reología API y geles | X | X |
| | Reología HPHT | | X |
| | Filtrado API | X | X |
| | Filtrado HPHT | X | X |
| | Filtrado PPT | | X |
| | Filtración dinámica | | X |
| | Lubricidad | X | X |
| | pH | X | |
| | Alcalinidad | X | |
| | Cloruros | X | |

Nota: La tabla puntualiza las pruebas realizadas según la etapa en la que se encontrará el lodo con nano-sílice de la concentración con mayor desempeño.

En cuanto al lodo que no presento un mejor rendimiento entre las dos concentraciones las pruebas realizadas se encuentran en la Tabla 7.

Tabla 7.

Pruebas realizadas al lodo base modificado con la concentración de nanopartícula de sílice no seleccionada.

| | | Antes de rolar | Después de rolar |
|---|----------------------|-----------------------|-------------------------|
| PRUEBAS PARA EL LODO CON EL NANO ADITIVO DE SÍLICE NO SELECCIONADO | Densidad | X | X |
| | Retorta | X | X |
| | Reología API y geles | X | X |
| | Filtrado API | X | X |

Tabla 8. *Continuación.*

| | | Antes de rolar | Después de rolar |
|---|-------------|-----------------------|-------------------------|
| PRUEBAS PARA EL LODO CON EL NANO ADITIVO DE SÍLICE NO SELECCIONADO | Lubricidad | X | X |
| | pH | X | |
| | Alcalinidad | X | |
| | Cloruros | X | |

Nota: La tabla indica las pruebas realizadas al lodo con la concentración de nanopartícula de sílice no seleccionada.

2.3.3 Pruebas realizadas al lodo con la adición de nano-grafito

Las pruebas de laboratorio se realizaron tanto al lodo con concentración de 1 PPM de nano-grafito como al que contaba con 2 PPM de dicha nanopartícula, con el fin de comparar y determinar cuál concentración tiene un adecuado desempeño para mejorar el filtrado y el daño de formación en la zona productora. Las pruebas realizadas al lodo con la adición de la nanopartícula de grafito están descritas en la Tabla 8.

Tabla 8.

Pruebas realizadas a los nanofluidos de las dos concentraciones de nano-grafito.

| | | Antes de rolar |
|--|----------------------|-----------------------|
| PRUEBAS PARA EL LODO CON EL NANO ADITIVO DE GRAFITO | Densidad | X |
| | Retorta | X |
| | Reología API y geles | X |
| | Filtrado API | X |
| | Lubricidad | X |
| | pH | X |
| | Alcalinidad | X |
| | Cloruros | X |

Nota: La tabla demuestra las pruebas realizadas a los lodos modificados con nano-grafito a 1 PPM y 2 PPM, antes y después de rolar.

Al finalizar las pruebas presentadas anteriormente se procedió a seleccionar el fluido con la concentración con mayor desempeño en los resultados de las mismas, para así proceder a realizar las pruebas presentadas en la Tabla 9.

Tabla 9.

Pruebas realizadas al lodo base modificado con la concentración de nanopartícula de grafito seleccionada.

| | | Antes de rolar | Después de rolar |
|---|----------------------|-----------------------|-------------------------|
| PRUEBAS PARA EL LODO CON EL NANO ADITIVO DE GRAFITO SELECCIONADO | Densidad | X | X |
| | Retorta | X | X |
| | Reología API y geles | X | X |
| | Reología HPHT | | X |
| | Filtrado API | X | X |
| | Filtrado HPHT | X | X |
| | Filtrado PPT | | X |
| | Filtración dinámica | | X |
| | Lubricidad | X | X |
| | pH | X | |
| | Alcalinidad | X | |
| | Cloruros | X | |

Nota: La tabla demuestra las pruebas realizadas al lodo modificado con la concentración nano-grafito seleccionada, antes y después de rolar.

Concerniente al fluido con la concentración de nanopartícula de grafito que presento menor rendimiento se realizaron las pruebas representadas en la Tabla 10.

Tabla 10.

Pruebas realizadas al lodo base modificado con la concentración de nanopartícula de grafito no seleccionada.

| | | Antes de rolar | Después de rolar |
|--|----------------------|-----------------------|-------------------------|
| PRUEBAS PARA EL LODO CON EL NANO ADITIVO DE GRAFITO NO SELECCIONADO | Densidad | X | X |
| | Retorta | X | X |
| | Reología API y geles | X | X |

Tabla 10. *Continuación.*

| | | Antes de rolar | Después de rolar |
|--|--------------|---------------------------|-----------------------------|
| PRUEBAS PARA EL LODO CON EL NANO ADITIVO DE GRAFITO NO SELECCIONADO | Filtrado API | X | X |
| | Lubricidad | X | X |
| | pH | X | |
| | Alcalinidad | X | |
| | Cloruros | X | |

Nota: La tabla enumera las pruebas realizadas al fluido no seleccionado por su bajo rendimiento frente al de la otra concentración, antes y después de rolar.

2.4 Etapa 4. Evaluación del desempeño entre el lodo base y los nano-aditivos

En esta etapa se describieron los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a los 5 lodos, con el propósito de establecer el lodo con la nanopartícula y la concentración que tiene un mejor desempeño para controlar el filtrado y el daño de formación, confrontando los resultados pertenecientes a las pruebas del lodo base con los de los fluidos con presencia de nano-aditivos (sílice y/o grafito). Cabe destacar que para evaluar el control de filtrado tuvo mayor relevancia las pruebas de filtración estática (API, HPHT) y filtración dinámica. Mientras que, para el daño de formación la prueba de mayor importancia fue la de filtrado PPT.

Es relevante mencionar, que se tomaron los rangos de los resultados de las pruebas del lodo base esperados para la perforación de la Formación Mugrosa del trabajo de grado de Noriega & Nuñez [21], debido a que estos fueron realizados en colaboración con la empresa Halliburton, es decir, los valores de referencia del lodo base propuestos serán los utilizados como rango admitido para el análisis de resultados del presente trabajo de grado.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se encuentran los resultados obtenidos de las pruebas físicas, tanto básicas como especiales, y las pruebas químicas, antes y después del rolado de cada uno de los fluidos tratados en la investigación, junto con el análisis de las propiedades, que inicialmente se realizó para la selección de la concentración de nano-sílice y de nano-grafito que había presentado un mejor desempeño entre las dos concentraciones, para así proceder a realizar el análisis de las pruebas especiales realizadas después del rolado con el fin de establecer cuál es la nanopartícula que mejor desempeño tiene para el control de filtrado y el daño de formación.

3.1 Caracterización de las nanopartículas

La información mostrada a continuación fue suministrada por Petroraza S.A., referente a las características de la nano-sílice adquiridas por la prueba DLS y de adsorción de nitrógeno a 77 °k, realizada por dicha empresa se puede evidenciar en la Tabla 11.

Tabla 11.

Características de la nanopartícula de sílice.

| Tamaño de la nanopartícula | |
|--|-----------------------------|
| Tamaño de nanopartícula | 32 nm |
| Área superficial | |
| Área superficial de un solo punto en P/Po= 0.251226349 | 176.1519 m ² /g |
| Área superficial BET | 181.8086 m ² /g |
| Área superficial Langmuir | 266.2574 m ² /g |
| Área microporal t-Plot | 17.5711 m ² /g |
| Área superficial externa t-Plot | 164.2375 m ² /g |
| Volumen de poro | |
| Volumen total de poros de adsorción de un solo punto de poros menor que 2.4663 nm diámetro a P/Po= 0.251226349 | 0.083592 cm ³ /g |
| Volumen microporal t-Plot | 0.006640 cm ³ /g |
| Tamaño de poro | |
| Ancho promedio de los poros de adsorción (4V/A by BET) | 1.83911 nm |

Nota: La tabla evidencia las propiedades como el tamaño de nanopartícula, área superficial, el volumen de poro y el tamaño de poro con el que cuenta la nanopartícula de sílice.

En cuanto a la información obtenida sobre la nano-grafito se puede visualizar en la Tabla 12.

Tabla 12.

Características de la nanopartícula de grafito.

| Tamaño de la nanopartícula | |
|--|-----------------------------|
| Tamaño de nanopartícula | 40 nm |
| Área superficial | |
| Área superficial de un solo punto en P/Po= 0.251207711 | 2.0712 m ² /g |
| Área superficial BET | 2.3394 m ² /g |
| Área superficial Langmuir | 3.5865 m ² /g |
| Área microporal t-Plot | 0.1274 m ² /g |
| Área superficial externa t-Plot | 2.2120 m ² /g |
| Volumen de poro | |
| Volumen total de poros de adsorción de un solo punto de poros menor que 2.4663 nm diámetro a P/Po= 0.251207711 | 0.000983 cm ³ /g |
| Volumen microporal t-Plot | 0.000009 cm ³ /g |
| Tamaño de poro | |
| Ancho promedio de los poros de adsorción (4V/A by BET) | 1.68054 nm |

Nota: La tabla detalla algunas características de la nanopartícula de grafito, como el área superficial, el volumen de poro y el tamaño de poro.

Los resultados evidenciados en las tablas anteriores demuestran que los aditivos estudiados en esta investigación pueden ser clasificados como nanomateriales, debido a que presentan un tamaño entre 1 y 100 nm, parámetro estipulado por los entes encargados para elementos nanos [12], a su vez las otras características presentan valores aceptables para ser tomados de dicha forma.

A continuación, se presentan el análisis de los valores obtenidos de acuerdo al tipo de pruebas realizadas a los fluidos de perforación tanto el lodo base como los lodos modificados con nanopartículas.

3.2 Resultados de las pruebas básicas

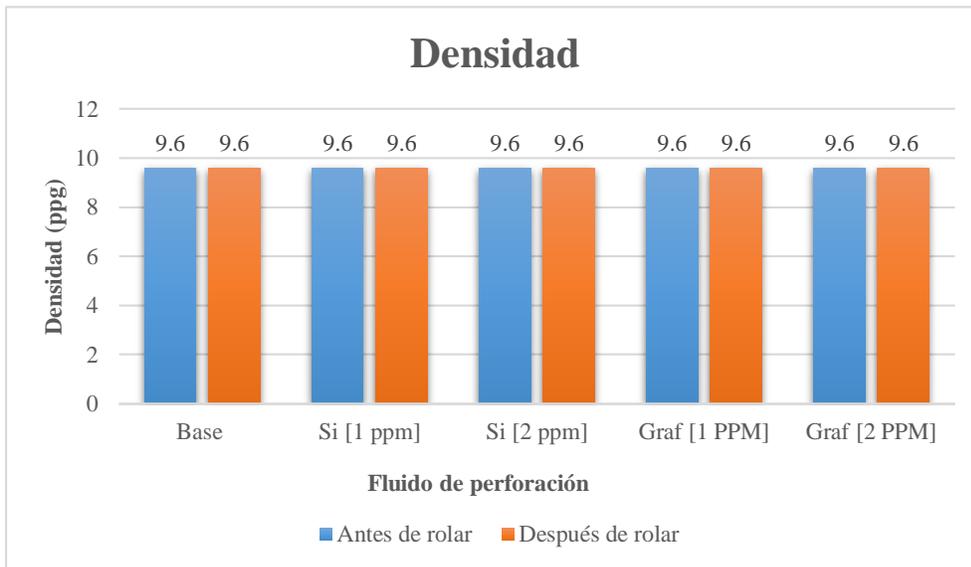
Los resultados obtenidos de las pruebas de: densidad, contenido de sólidos, reología API, filtrado API junto con su respectivo análisis se encuentra en seguida.

3.2.1 Densidad

En la Figura 10 se puede evidenciar que los valores resultantes de las pruebas de densidad realizadas a los 5 fluidos tanto antes de rolar como después de rolar no evidencian algún cambio de densidad por el nano-aditivo. Es decir, la adición de nanopartículas no afecta el peso del fluido.

Figura 10.

Densidad.



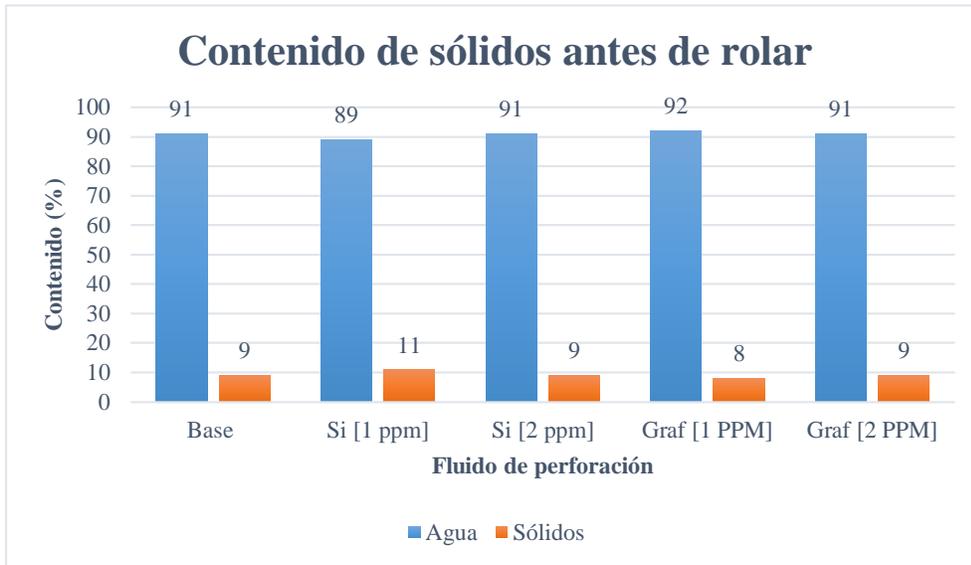
Nota: La figura ilustra los valores adquiridos al realizar la prueba de densidad al lodo base y los nano-fluidos estudiados en esta investigación.

2.1.2 Contenido de sólidos

En la prueba de retorta se pueden obtener el contenido de líquidos (agua y aceite) y sólidos presentes en el lodo. Los resultados obtenidos en esta prueba demuestran que al no contar en la formulación de los lodos con un aditivo que actué como lubricante, no hay presencia de aceite en los resultados, adicionalmente en la Figura 11 se puede observar que antes de rolar todos los lodos presentaron respuestas similares, lo que quiere decir que los sólidos se atribuyen a los agentes de puenteo, más no a las nanopartículas adicionadas. Además, la relación sólidos-agua (RSA) no sobrepasa el valor máximo permitido en las normas API [23], es decir, no sobrepasa el 3%, cabe destacar que la máxima relación es de 1.24% del lodo de perforación con nano-sílice a una concentración de 1 ppm.

Figura 11.

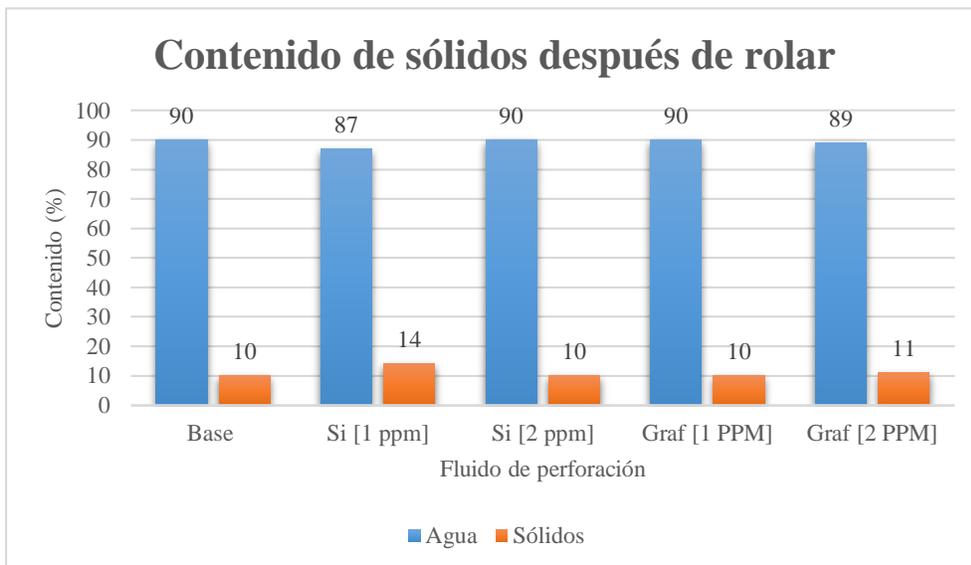
Contenido de sólidos antes de rolar.



Nota: La tabla enumera los resultados obtenido al realizar la prueba de retorta en cada uno de los lodos, antes de rolar.

Figura 12.

Contenido de sólidos después de rolar.



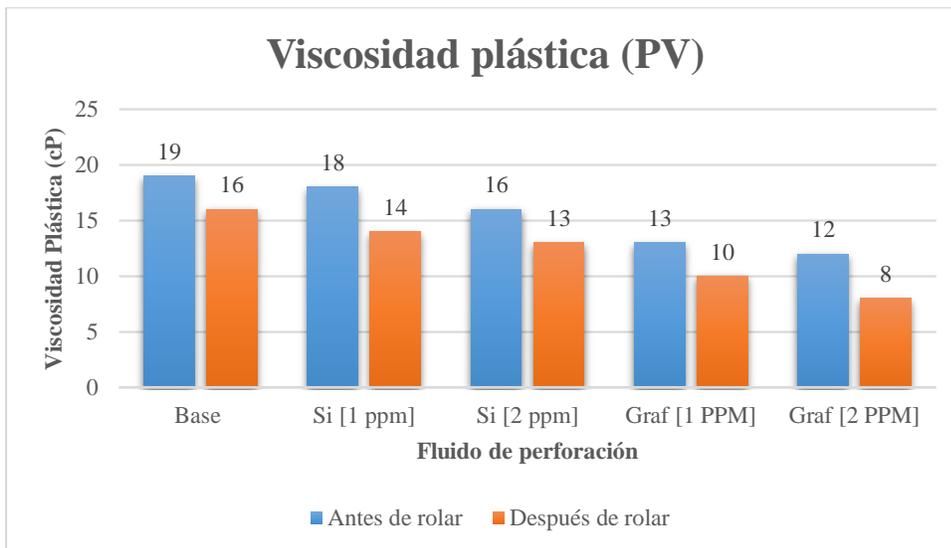
Nota: La figura ilustra la cantidad de líquidos y sólidos obtenidos en la prueba de retorta realizada después de rolar los lodos.

En cuanto a los resultados obtenidos después de rolar, se puede evidenciar en la Figura 12 que la presencia de agua en los fluidos disminuye un poco frente a los valores obtenidos antes del proceso de envejecimiento dinámico, es posible que esto se deba a que los fluidos fueron expuestos a una temperatura de 230 °F, lo que pudo causar precipitación de algunos sólidos, aumentando el contenido de estos en los fluidos, aun así los resultados mostrados son similares entre los fluidos y nuevamente las RSA de cada fluido cumplen con la norma API, donde nuevamente la máxima es del nanofluido de sílice a 1 PPM con 1.63%.

2.1.3 Viscosidad plástica

Figura 13.

Reología API - Viscosidad plástica.



Nota: La figura ilustra la viscosidad plástica obtenida en la prueba de reología API a los lodos antes y después de pasar por el proceso de envejecimiento.

En las operaciones de perforación es necesario que la viscosidad plástica tenga el valor más bajo del rango para así poder aumentar la tasa de penetración (ROP), ahorrar energía requerida para circular el lodo y reducir la pérdida de circulación debido al exceso de densidad. [28]

En la Figura 13 se puede evidenciar que antes de rolar hay una disminución continua en la viscosidad plástica tanto para en los fluidos con nanopartícula de sílice como la de grafito, además

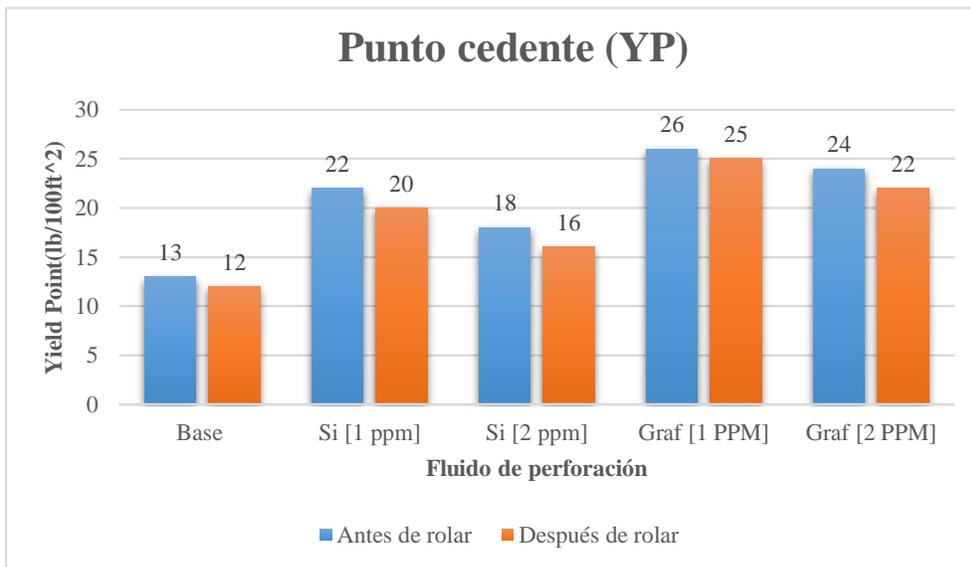
a medida que se aumenta la concentración de nanopartícula la VP disminuye. Antes de rolar esta propiedad disminuye en comparación con el resultado obtenido en el fluido base, cerca de un 6% en el fluido con nano-sílice a 1 PPM y 16% en el lodo con 2 PPM de nano-sílice, en cuanto a los lodos con nano-grafito a una concentración de 1 PPM y 2 PPM disminuye 32% y 37%, respectivamente.

Por otro lado, después de someter al lodo por un proceso de envejecimiento (rolado) resulta en un valor de VP generalmente más bajo en comparación con los obtenidos antes de rolar, es decir, en los fluidos con nano-sílice a 1 PPM y 2 PPM disminuye correspondientemente un 12,5% y 19%, y un 38% en el lodo con nano-grafito a 1 PPM y 50% en el que tiene 2 PPM de nano-grafito en relación al fluido base. Este se debe a que, a mayor temperatura, la energía cinética de las partículas es mayor; por lo tanto, tienden a moverse más rápido, lo que conduce a un gran aumento en la distancia entre las partículas y una VP más baja.

2.1.4 Punto cedente (Yield Point)

Figura 14.

Reología API - Punto cedente



Nota: La figura ilustra el punto cedente obtenida en la prueba de reología API antes y después de rolar los lodos

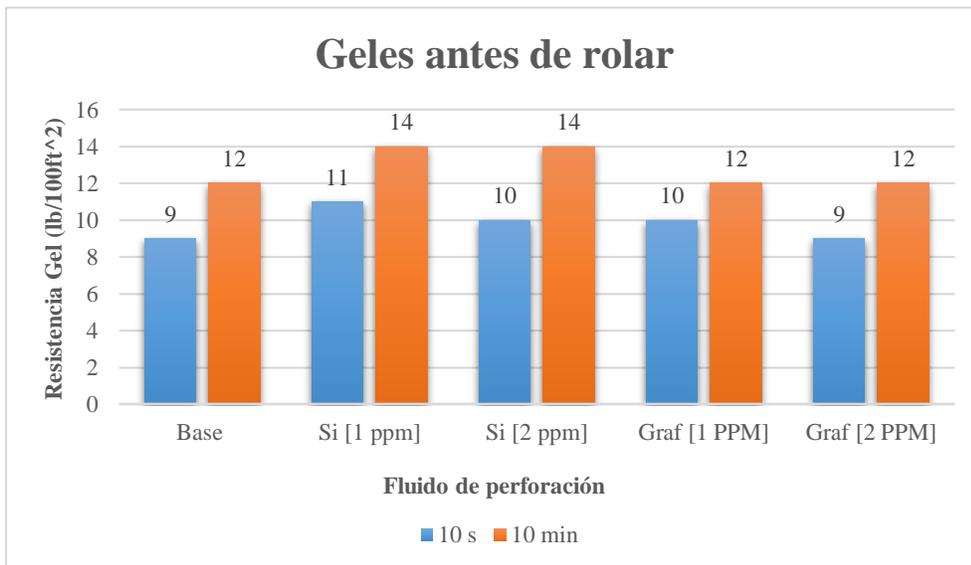
El punto cedente se utiliza para evaluar la capacidad de un lodo de levantar los recortes del espacio anular, es decir, la eficiencia de limpieza con la que cuenta el fluido [29], por lo que se requiere este se encuentre en el mayor valor del rango para así garantizar la limpieza del pozo. En la Figura 11 se evidencia que antes de rolar hay un incremento en el punto cedente con la adición de las nanopartículas tanto de sílice como de grafito con respecto al lodo base, lo cual es óptimo para la adecuada limpieza del pozo. Así mismo, se observa que al aumentar la concentración de las nanopartículas disminuye un poco la resistencia al flujo. Los puntos cedentes obtenidos antes de rolar en los nanofluidos con sílice aumentan 69% y 38% a concentraciones de 1 PPM y 2 PPM, respectivamente. Referente a los nanofluidos con grafito el punto cedente aumenta 100% para la concentración de 1 PPM de la nanopartícula y en el lodo con 2 PPM cerca del 85%, en comparación con el fluido base.

También se evidencia que después de rolar los cinco fluidos estudiados experimentan una disminución del punto cedente, pero estas degradaciones no son mayores del 10%.

2.1.5 Resistencia Gel

Figura 15.

Reología API – Geles antes de rolar.

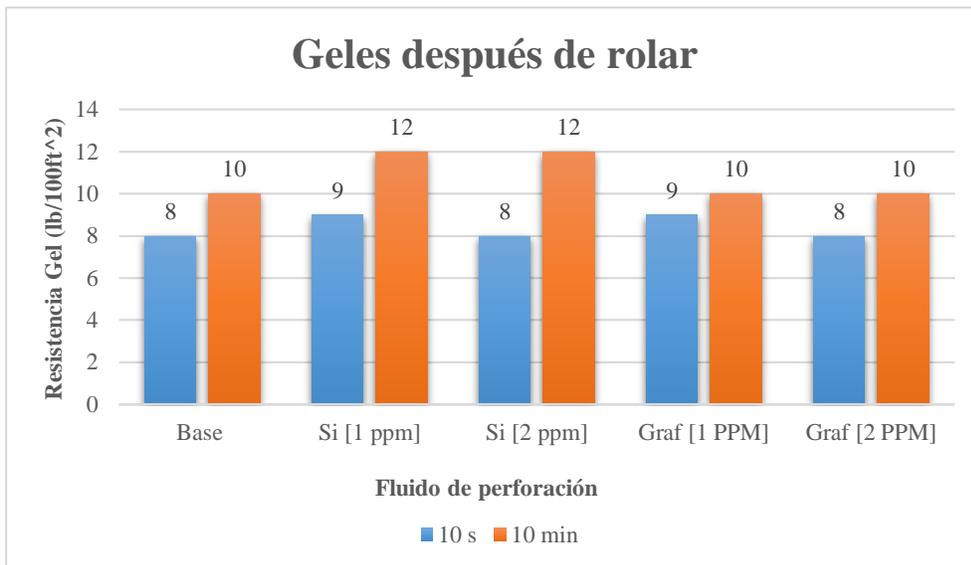


Nota: La figura ilustra la resistencia de geles obtenida en la prueba de reología API antes de rolar los lodos.

En la Figura 15 se puede apreciar que en general los geles se mantienen planos y progresivos, por lo que las presiones en las bombas no serán excesivas para romper la circulación. También se observa que la gelificación del lodo no es tan rápida con el tiempo, característica deseable en el lodo, pues se cuenta con una buena capacidad tixotrópica. Así mismo, no se evidencia un cambio significativo en los geles con la adición de nanopartículas.

Figura 16.

Reología API – Geles después de rolar.



Nota: La figura ilustra la resistencia de geles obtenida en la prueba de reología API después de rolar los lodos

Por otro lado, después de rolar los fluidos, se evidencia que hay una disminución en los geles, teniendo como resultado en los fluidos nano-sílice a 1 PPM y 2 PPM una disminución respectivamente de un 16% y 17%, mientras que los lodos con nano-grafito a 1 PPM y 2 PPM un 14% y 13%. Lo cual demuestra que a medida que pasa el tiempo y el lodo se somete a altas temperaturas este se degrada perdiendo sus propiedades reológicas.

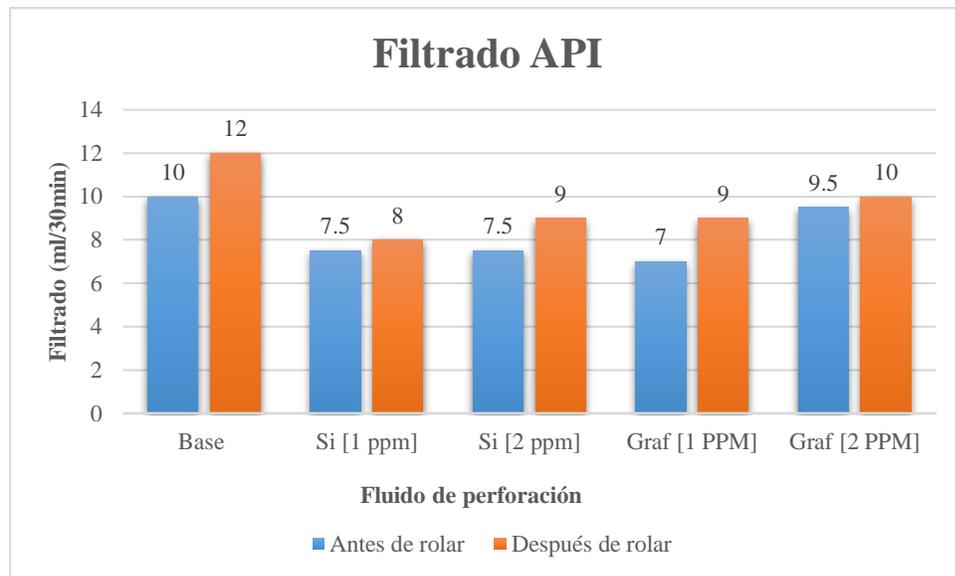
2.1.6 Filtrado API

El filtrado obtenido provee una indicación de la cantidad de fluido que invade la formación cuando este es sometido a una presión diferencial. Los resultados de la prueba de filtración API

antes de rolar los fluidos (fluido base y nano-fluidos) muestran que la adición de nanopartículas pueden ser utilizadas como agentes controladores de filtrado en fluidos WBM, como se puede evidenciar en la Figura 17 donde se registra una disminución del filtrado en un 21% con la adición de nanopartículas.

Figura 17.

Filtrado API antes y después de rolar.



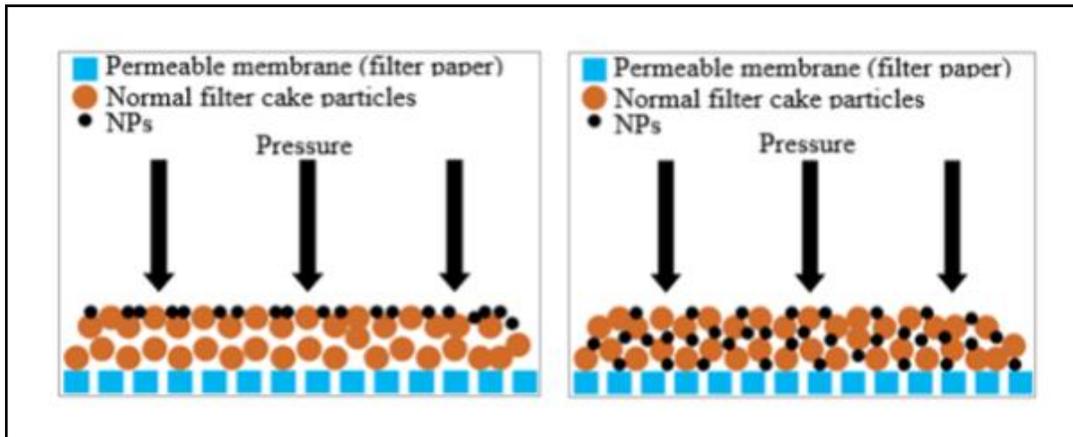
Nota: La figura representa los resultados generados referentes al filtrado y el revoque al realizar la prueba de filtrado API a los lodos investigados.

Adicionalmente, en la figura anterior se puede apreciar que el filtrado antes de rolar en los nano-fluidos con nanopartículas de sílice tanto a 1 PPM como con 2 PPM disminuye en un 25%. Mientras que, con nano-grafito a 1 PPM disminuye un 30% y con 2 PPM solo un 5%. A su vez, después de rolar para nano-sílice a 1 PPM y 2 PPM disminuyeron un 33% y 25% respectivamente, en cuanto a nano-grafito disminuyeron un 25% y 17% para las concentraciones de 1 PPM y 2 PPM.

La figura 18, ilustra la teoría detrás de la adición de nanopartículas en los fluidos de perforación para reducir el filtrado. La presión hidrostática, fuerza a las nanopartículas a acomodarse en los poros pequeños y taponarlos eficazmente, por lo que el espacio poroso se reduce junto con la permeabilidad de la torta de filtración, lo que a su vez reducirá el volumen de filtrado [1].

Figura 18.

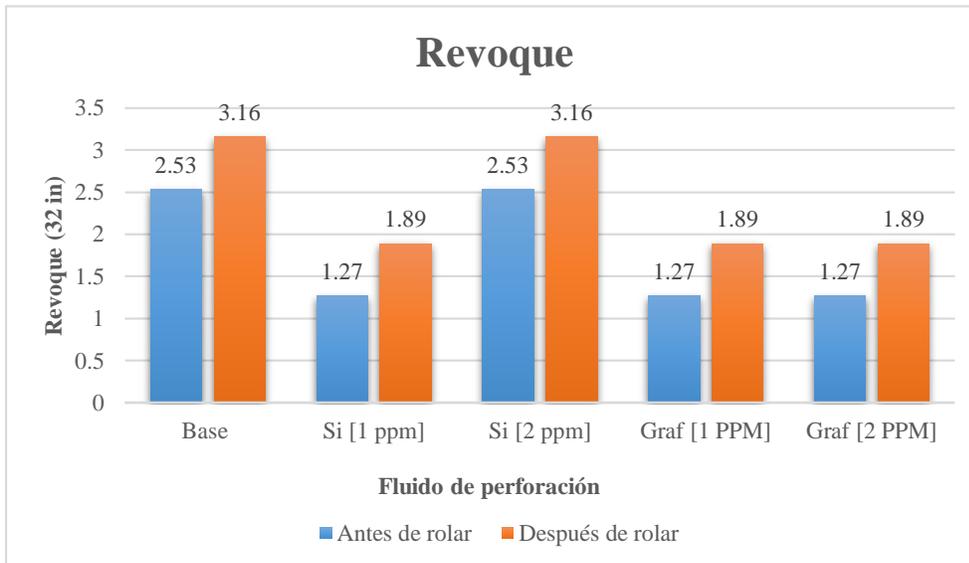
Función de las nanopartículas para el control de filtrado.



Nota: La figura representa el proceso que realizan las nanopartículas para controlar el filtrado.

Figura 19.

Revoque.



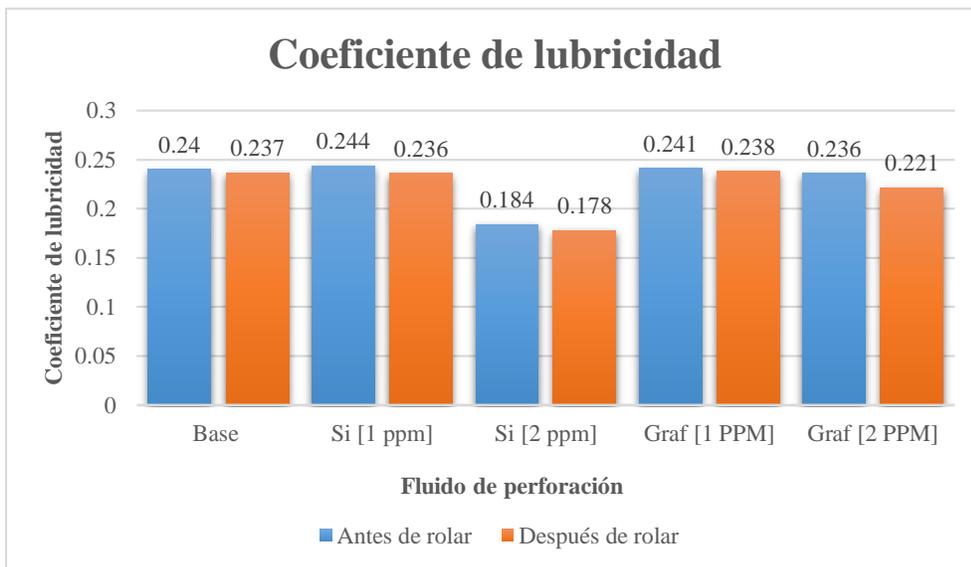
Nota: La figura ilustra los resultados obtenidos al medir el revoque resultante de la prueba de filtrado realizada a los cinco lodos estudiados, antes y después de rolar.

Por otro lado, el revoque se forma por la acumulación de sólidos mediante el proceso de filtrado API, el cual según Aritza et al, es bueno si tiene un espesor entre 1/32in (0,079cm) y 2/32in (0,015cm), además de ser plástico y consistente [3]. En la Figura 19 se observa que antes de rolar el revoque de los fluidos con adición de nanopartículas tiende a reducirse en un 50% a excepción de la nano-sílice a 2PPM que permanece igual que fluido base. Además, se evidencia que no hay cambios en el revoque antes y después de rolar.

2.1.7. Prueba de lubricidad

Figura 20.

Lubricidad.



Nota: La figura representa los resultados generados por los (5) fluidos antes y después de rolar.

Un buen coeficiente de lubricidad en un lodo incrementa la vida útil de la broca y la tubería de perforación. Como se puede observar en la Figura 20, antes de rolar con las nanopartículas de grafito no se evidencia un cambio considerable en el coeficiente de lubricidad, al igual que con la de nano-sílice a 1 PPM. Mientras que al fluido con nano-sílice a 2 PPM presenta una disminución del coeficiente en 0.06 con respecto al lodo base. Cabe destacar, que hay una tendencia de aumento, es decir, a mayor concentración de nano-sílice mayor es la reducción en el coeficiente de fricción.

Este resultado se produce debido a la dispersión de la nano-sílice le permite actuar como cojinete de bolas en la lubricación de la superficie del equipo, lo que resulta en la reducción del coeficiente de fricción. [28]

3.3 Resultados de las pruebas químicas

Este tipo de pruebas se realizaron antes de que los lodos pasaran por un proceso de envejecimiento dinámico, con el fin de establecer si el lodo podía presentar corrosión en las herramientas utilizadas para perforar y la estabilidad química una vez formulados.

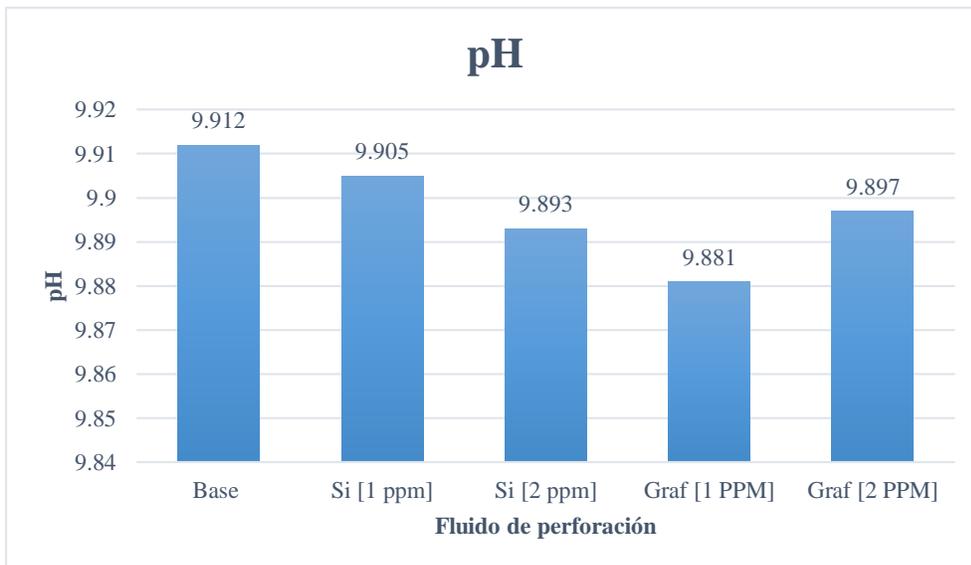
Las pruebas químicas estudiadas en este proyecto son: pH del lodo, alcalinidad tanto del lodo como del filtrado, y cloruros.

3.3.1 pH

En la Figura 21 se puede apreciar que los valores leídos en el electrodo para cada fluido son poco variables, esto quiere decir que ni las nanopartículas de sílice, ni las de grafito generan alteraciones en la alcalinidad del lodo, es decir, tanto el lodo base como los nanofluidos no generaran corrosión en los equipos de perforación, además de que presentan valores permitidos para la perforación de la Formación Mugrosa. [21]

Figura 21.

pH.



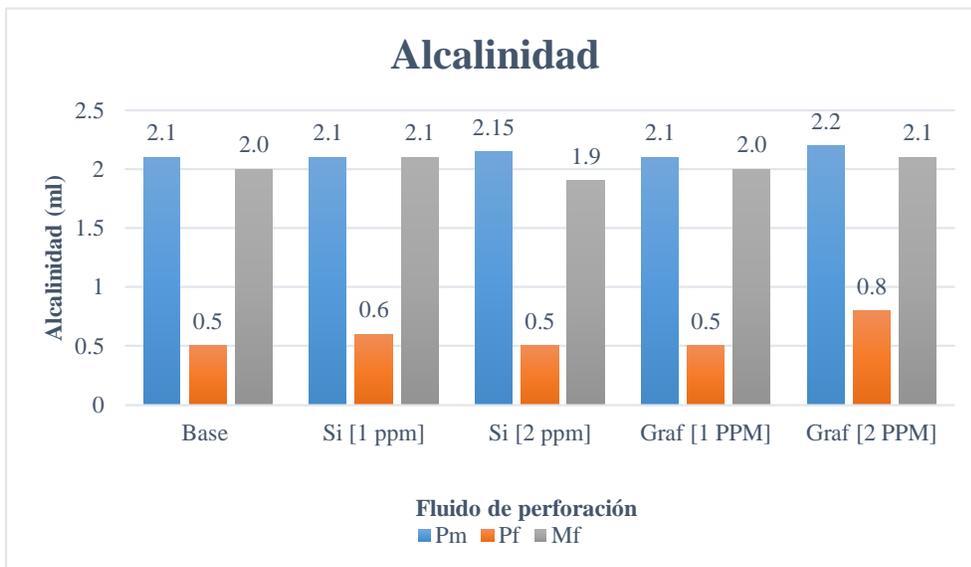
Nota: La figura evidencia los valores obtenidos en los cinco lodos de pH antes de rolar.

3.3.2 Alcalinidad

Esta propiedad indica la capacidad que tiene el fluido de neutralizar los ácidos que pueden estar presentes en la operación de perforación. En la Figura 22 se puede evidenciar que las nanopartículas no aportan alcalinidad a los lodos, puesto que los valores no presentan cambios significativos frente al del lodo base, por lo que esta característica se atribuye a los agentes de puenteo utilizados. Es importante mencionar que los valores se encuentran dentro de los rangos permitidos según las normas API. [30]

Figura 22.

Alcalinidad.



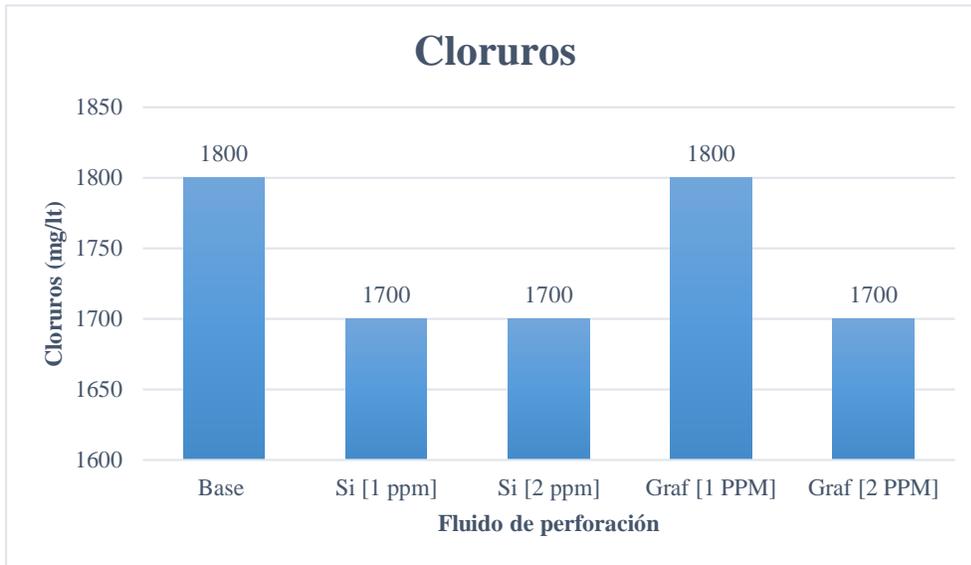
Nota: La figura ilustra los valores obtenidos de la prueba de alcalinidad realizada tanto al lodo como al filtrado obtenido de la prueba de filtración API.

3.3.3 Cloruros

Esta propiedad representa la cantidad de iones de cloruro presentes en un fluido de perforación. Los resultados obtenidos no presentan cambios muy relevantes entre los 5 fluidos, lo que significa que las nanopartículas no generan efectos alarmantes en la cantidad de sales. Adicionalmente, los valores se encuentran dentro del rango autorizado por las normas API [30],

Figura 23.

Cloruros.



Nota: La figura ilustra los resultados obtenidos en la prueba de cloruros realizada al filtrado resultante de la prueba de filtrado API.

3.4 Resultados de las pruebas especiales

Una vez realizadas las pruebas básicas a todos los fluidos de perforación formulados en esta investigación se evaluó el desempeño de estos frente al control de filtrado y el daño de formación, para así poder escoger la concentración de cada nanopartícula que presento una mayor eficiencia controlando estos aspectos frente al fluido base, por lo que para seleccionar los fluidos inicialmente se analizó la prueba de reología API donde se evidenció que para los fluidos con nano-sílice hay un mayor rendimiento del fluido con 1 PPM de nanopartícula, debido a que el punto cedente es más alto frente a la otra concentración y la viscosidad plástica es menor frente a la del lodo base, pero es más alta en comparación con la del fluido con 2 PPM de nano-sílice. Igualmente, en los fluidos con nano-grafito se presenta mejor rendimiento en el punto cedente del fluido con 1 PPM, elevada la viscosidad plástica frente al de la otra concentración de nanopartículas de grafito, pero menor que la del fluido base.

Seguido a esto se evaluaron los valores obtenidos en la prueba de filtración API en los nano-fluidos con sílice donde se obtuvieron resultados iguales de filtrado para las dos concentraciones estudiadas ($7.5 \text{ cc}/_{30 \text{ min}}$), por lo que fue necesario tener en cuenta el espesor del revoque resultante,

en la Figura 17 se puede apreciar que el fluido con adición de nano-sílice que presenta un mejor espesor de cake fue el de 1 PPM. Frente a la selección del fluido modificado con nano-grafito se tuvo en cuenta los ml obtenidos, por lo que se escogió el fluido con una concentración de 1 PPM.

Cabe destacar, que para esta selección no se tuvieron en cuenta los resultados obtenidos en las pruebas químicas, ni en la prueba de contenido de sólidos, debido a que no se presentan cambios relevantes entre los nanofluidos y el lodo base.

Finalmente, se decidió realizar las pruebas filtración HPHT, filtrado PPT, filtración dinámica y reología HPHT a los siguientes fluidos:

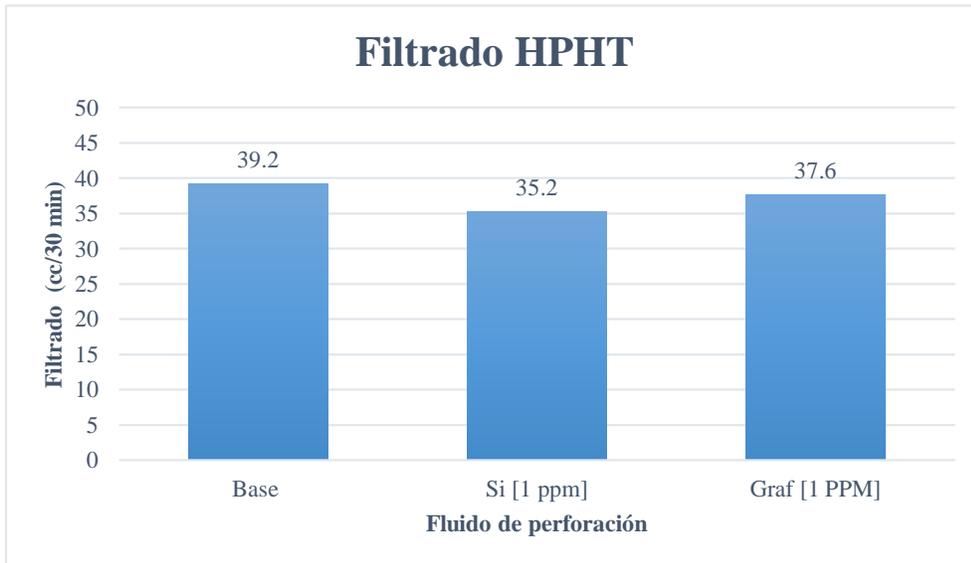
- ✓ Lodo base.
- ✓ Lodo modificado con nanopartículas de sílice a una concentración de 1 PPM.
- ✓ Lodo modificado con nanopartículas de grafito a una concentración de 1 PPM.

Es importante resaltar que estas pruebas se realizaron después de que los fluidos pasarán por un proceso de envejecimiento dinámico.

3.4.1 Filtrado HPHT

Figura 24.

Filtrado HPHT.



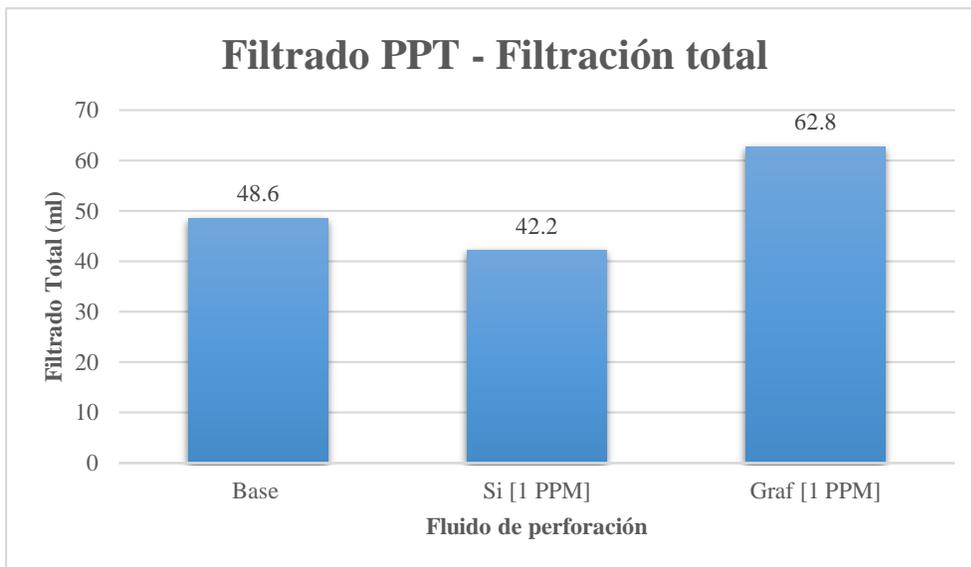
Nota: La figura representa los valores obtenidos en la prueba de filtrado HPHT, después de rolar los fluidos seleccionados.

Al igual que la prueba de Filtrado API, esta permite conocer la cantidad de fluido que entra a la formación al someter al lodo de perforación a una presión y temperatura, las cuales en este caso son mayores a 100 psi y 60°F, respectivamente. De la Figura 24 se pueden observar valores elevados de filtrado HPHT, sin embargo, el valor arrojado por el fluido con nanopartícula de sílice disminuye cerca del 10% frente al obtenido por el fluido base, mientras que el fluido con nanografito solo disminuye 4%, en otras palabras, la nano-sílice presenta un mejor desempeño en el control de filtrado a altas temperaturas y altas presiones.

3.4.2 Filtrado PPT

Figura 25.

Filtrado PPT – Filtración total.



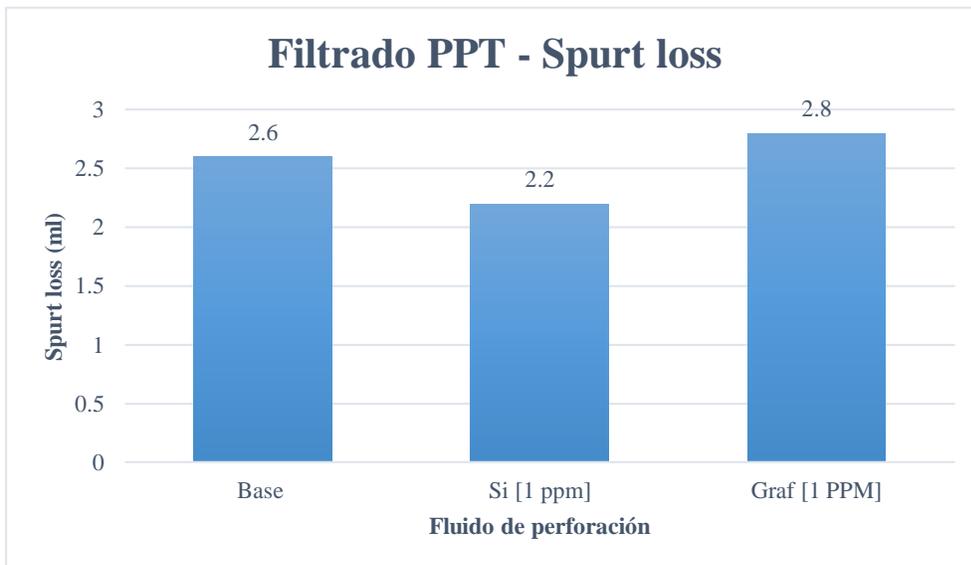
Nota: La figura representa los filtrados totales de la prueba PPT empleando disco de 5 micrones.

El material de puenteo es el encargado de formar la pared protectora y el tamaño de este agente depende de la permeabilidad que tiene la formación. Cuando se calcula el PPT se tiene en cuenta la pérdida de fluido instantánea inicial (spurt loss) y la pérdida al cabo de 30 minutos. El equipo utilizado para esta prueba es una filtroprensa estática de alta presión y alta temperatura, con un disco de aloxita de 5 micrones como medio filtrante. De acuerdo con los resultados obtenidos en

la Figura 25 se evidencia que con la adición de nano-sílice a 1 PPM disminuye 6.4 ml el filtrado con respecto al fluido base. Mientras que, con la adición de nano-grafico a 1 PPM incrementa 16,2 ml respecto al fluido base. Lo cual quiere decir que con la nano-sílice mejoró el sello reduciendo a su vez el filtrado, es decir, la zona de lavado disminuyó, presentando menor daño de formación por filtrado del lodo, y menos zona virgen invadida, conjuntamente el spurt loss está por debajo de los 3 ml lo cual es aceptable. Sin embargo, ambos filtrados siguen siendo elevados debido a que se encuentran por encima de los 20 ml. De la misma manera se podría decir que los agentes de puenteo no están actuando bien sobre el fluido, lo que puede ser causado por la concentración de estos o el tamaño de mallas que se utilizaron. Adicionalmente, en la Figura 26 se puede evidenciar los valores obtenidos de Spurt loss, donde se pueden demostrar que los valores obtenidos no sobrepasan el valor aceptable que es de 3 ml, igualmente el fluido con 1 PPM de nano-sílice logra disminuir 15% el spurt loss, y por el contrario el fluido con 2 PPM de nano-grafito aumenta 8%.

Figura 26.

Filtrado PPT – Spurt loss.



Nota: La figura representa los spurt loss obtenidos en la prueba PPT donde se empleó un disco de aloxita de 5 micrones.

3.4.3 Filtración dinámica

Tabla 13.

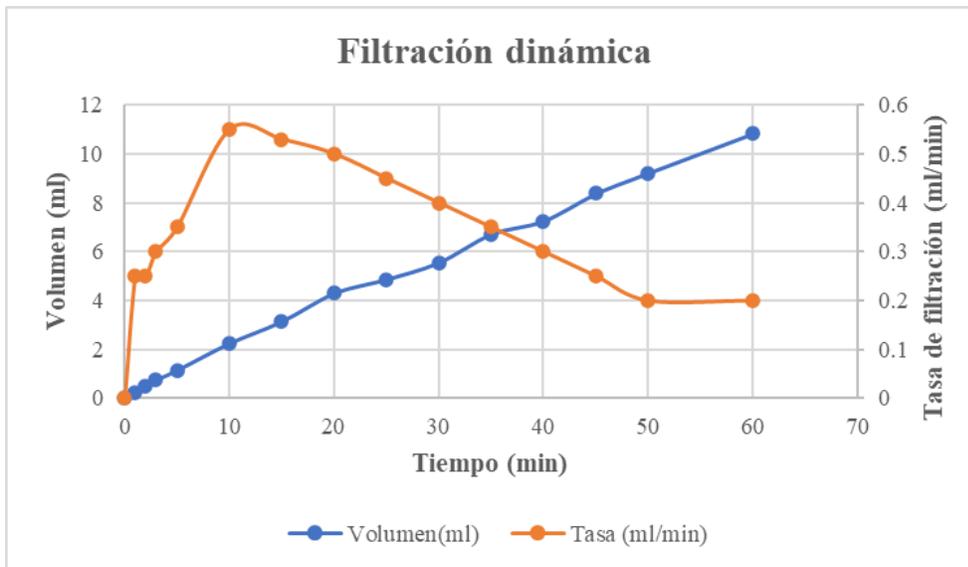
Valores máximos recomendados FANN 90.

| Densidad del lodo (lb/gal) | Índice (ml/min) | CDI |
|----------------------------|-----------------|-----|
| 9-12 | 0,22 | 25 |
| 12-15 | 0,18 | 20 |
| 15 o más | 0,14 | 16 |

Nota: La tabla enumera los valores máximos recomendados de acuerdo a la densidad del fluido.

Figura 27.

Filtración dinámica en el fluido base.



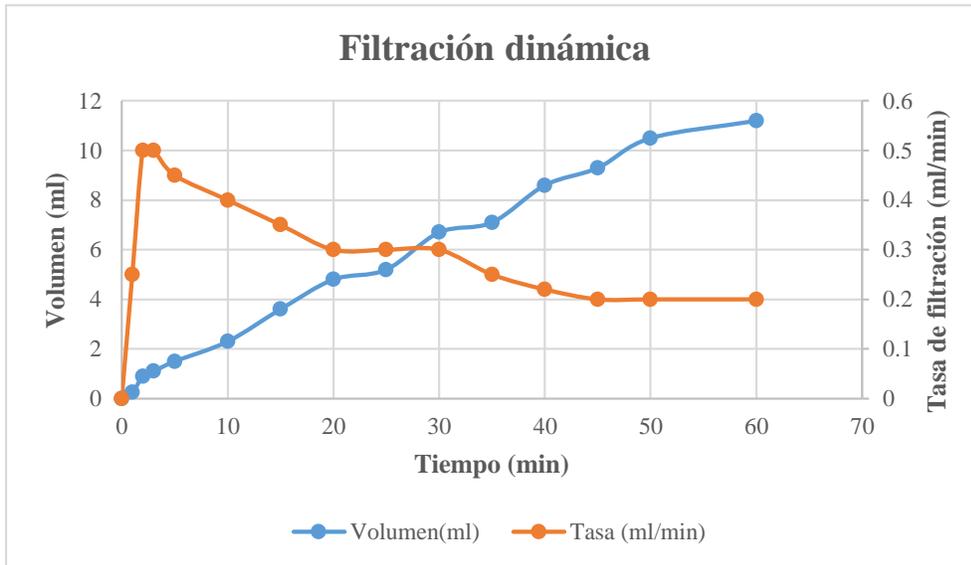
Nota: La figura representa los resultados de la prueba de filtración dinámica en el equipo Fann 90 para el fluido base.

Los resultados obtenidos para el fluido base evidenciados en la Figura 27 son 0.1635 ml/min para el índice de filtración y un CDI de 27, al tener en cuenta lo estipulado en la Tabla 13 para una densidad de 9,6 ppg, se obtiene un valor de CDI por encima del máximo recomendado, pero el índice de filtración está por debajo de valor recomendado, lo cual quiere decir que el volumen filtrado hacia la formación es bajo. En lo que respecta al CDI puede que la circulación del lodo

cause erosionabilidad del revoque generando inestabilidad en el pozo y mayor intrusión de filtrado a la formación permeable.

Figura 28.

Filtración dinámica en el fluido con 1 PPM de nano-sílice.



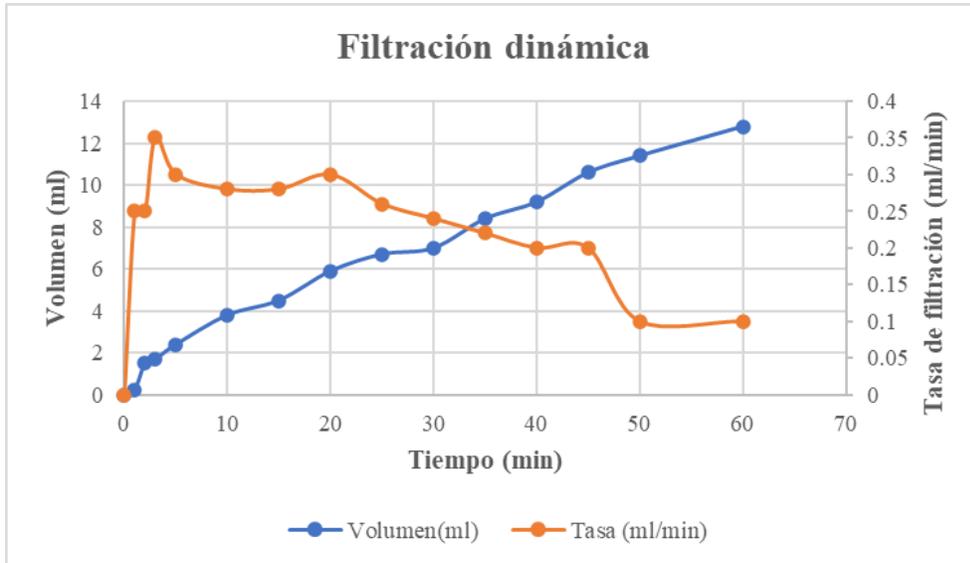
Nota: La figura representa los resultados de la prueba de filtración dinámica en el equipo Fann 90 para el fluido con nano-sílice a 1 PPM.

Como se puede observar en la Figura 28, el nano-fluido con sílice obtuvo un índice de filtración de 0.16 ml/min y un CDI de 9, los cuales al tener en cuenta de nuevo la Tabla 13 se evidencia que estos dos parámetros se encuentran por debajo del valor máximo recomendado, lo que quiere decir que la adición de 1 PPM de nano-sílice reduce significativamente el CDI en un 67% con respecto al fluido base, mientras que el índice solo disminuye un 2%.

Finalmente, el nano-fluido con 1 PPM de grafito cuenta con un índice de filtración de 0.1725 ml/min y un CDI de 18, los dos valores se encuentran por debajo de los valores máximos, pero en referencia al índice se puede evidenciar que este se aumenta 6% frente al valor del lodo base, aun así, se puede demostrar hay una reducción del CDI en un 33% con respecto a la erosionabilidad del revoque obtenida del fluido base, como se puede evidenciar en la Figura 29.

Figura 29.

Filtración dinámica en el fluido con 1 PPM de nano-grafito.



Nota: La figura representa los resultados de la prueba de filtración dinámica en el equipo Fann 90 para el fluido con 1 PPM de nano-grafito.

3.4.4 Reología HPHT

Esta prueba solo fue realizada al fluido base y al lodo que contiene 1 PPM de nano-sílice, debido a que el equipo FANN77 cuenta con la restricción de que no puede ser utilizado en lodos que cuenten con materiales magnéticos [31], como lo es el grafito, así que el análisis solo se realizó a los fluidos mencionados anteriormente.

Tabla 14.

Condiciones de la prueba de reología HPHT.

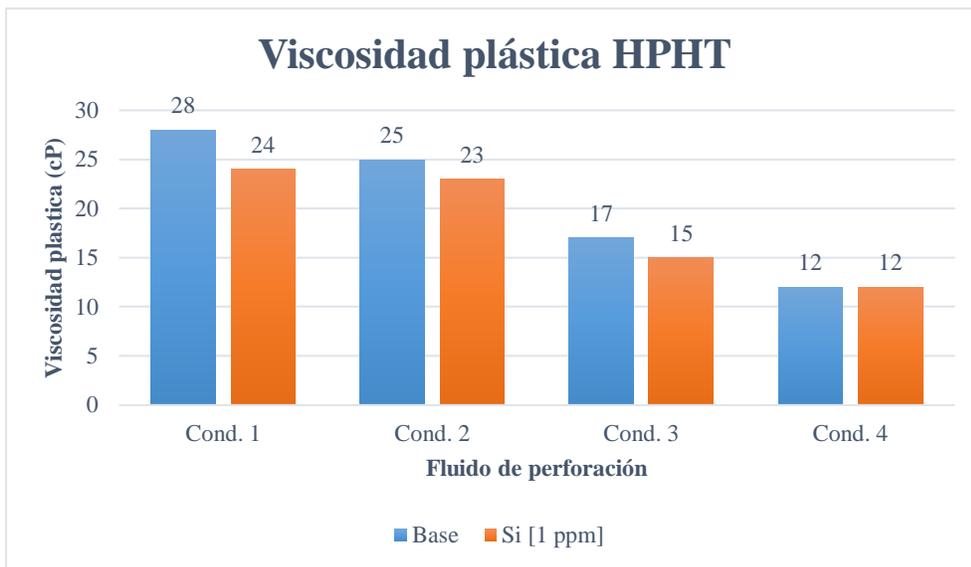
| | Cond. 1 | Cond. 2 | Cond. 3 | Cond. 4 |
|-------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Temperatura (°F) | 180 | 230 | 270 | 300 |
| Presión (psi) | 5000 | 7500 | 10000 | 14000 |

Nota: La tabla enumera los valores de presión y temperatura utilizados en la realización de la prueba de reología HPHT.

a. Viscosidad plástica. Los valores obtenidos de manera general presentan una relación normal, es decir, a medida que la temperatura aumenta la viscosidad plástica disminuye en los dos fluidos estudiados, pero el fluido que tiene en formulación 1 PPM de nanopartículas de sílice presenta valores más pequeños, generando una buena respuesta debido a que siempre se requiere un valor de VP baja, la máxima reducción de esta es del 14% a las condiciones de presión y temperatura más bajas (Tabla 14), adicionalmente al llegar a una temperatura de 300 °F las respuesta son iguales para los dos fluidos, lo que quiere decir que las nanopartículas ya han perdido sus propiedades y ya no influyen en las propiedades reológicas del fluido.

Figura 30.

Reología HPHT – Viscosidad plástica.



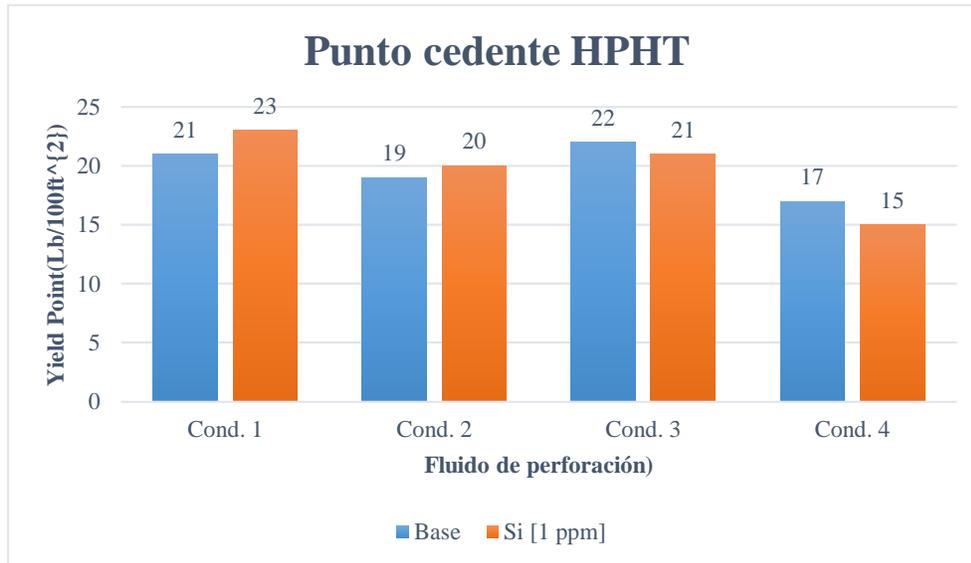
Nota: La figura demuestra los resultados obtenidos referentes a la viscosidad plástica al realizar la prueba de reología HPHT.

b. Punto cedente. En la figura enseguida se pueden apreciar los valores obtenidos de punto cedente, donde se puede destacar que en la condición 1 en la que se realizó la prueba de reología en los dos fluidos, el que fue modificado con nano-sílice a 1 PPM presenta un mejor punto cedente que el lodo base con un aumento de aproximadamente 9.5%. A pesar de que en la condición 2 también hay un valor mayor por parte del nanofluido, este es insignificante, por lo que se puede evidenciar que las nanopartículas deja de aportar sus características para mejorar la reología del

fluido, y esto se puede confirmar con los valores obtenidos en las condiciones restantes, puesto que el lodo base presenta un mayor valor que el del lodo con nano-sílice.

Figura 31.

Reología HPHT – Punto cedente.



Nota: La figura ilustra los valores de punto cedente de la reología HPHT.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de las pruebas físicas y químicas reflejan la viabilidad del uso de nanopartículas de sílice y grafito para el control de filtrado y el daño de formación causado por este mismo. Sin embargo, los resultados presentados no son óptimos para la perforación de la Formación Mugrosa en un pozo HPHT (High Pressure-High Temperature).

Se obtuvo una disminución del 21% y 25% en el filtrado API antes de rolar y después de rolar respectivamente, con respecto al fluido base, demostrando la eficiencia de las nanopartículas en el control de filtrado a condiciones estándar.

Se logró evidenciar que la adición de nanopartículas mejora las condiciones reológicas del fluido, teniendo en cuenta que la viscosidad plástica disminuye en promedio 23% antes de rolar y 29% después de rolar y el punto cedente de forma general aumenta 73 % antes de rolar, después de rolar se presenta una degradación de los valores no mayor al 10%.

Para la elección de los fluidos a los que se le harían las pruebas físicas especiales se tuvo en cuenta la prueba de reología API y filtrado API, donde los fluidos que presentaron un mejor desempeño en estos ensayos fueron el de 1 PPM de nano-sílice y 1 PPM de nano-grafito. Cabe destacar, que no se tuvieron en cuenta los resultados de las pruebas químicas, ni la de contenido de sólidos y prueba de lubricación, debido a que estos no presentan cambios con la adición nanopartículas a los fluidos, no obstante, en los coeficientes de lubricidad se puede observar una tendencia de reducción en el valor a medida que se aumenta la concentración de nanopartículas.

Los resultados obtenidos en la prueba PPT logran evidenciar que 1 PPM de la nano-sílice es más eficiente que la misma concentración de nano-grafito, debido a que presenta una disminución del filtrado 13%, lo que a su vez disminuirá el daño de formación presentado por intrusión de fluidos. Mientras que, con nano-grafito aumenta un 30%. Así mismo, en la prueba de filtrado HPHT hay una reducción promedio del filtrado de un 7% con el uso de las nanopartículas (sílice y grafito).

En cuanto a la filtración dinámica la nanopartícula que presenta mejor desempeño es nano-sílice a 1 PPM puesto que el CDI presenta un descenso del 67% con respecto al del fluido base, a pesar de que el índice de filtración desciende tan solo un 2%. Lo cual demuestra que, si bien la adición de nanopartículas mejora la cantidad de filtrado y el daño de formación, no presenta cambios relevantes para mejorar el rendimiento de un fluido base agua en pozos HPHT.

En la prueba de reología HPHT se visualiza que tanto para el fluido base como para el nano-fluido con 1 PPM de sílice se presentan mejores resultados a temperaturas inferiores a 230 °F, debido a que después de esta condición tanto el fluido base con el nano-fluido se degradan, perdiendo propiedades reológicas importantes para mantener la estabilidad y limpieza del hueco.

Se concluyó que la nanopartícula de sílice a 1 PPM tiene un mejor desempeño controlando el filtrado y a su vez el daño de formación a temperaturas inferiores a 230°F en comparación al nano-grafito con la misma concentración.

REFERENCIAS

- [1] S. R. Smith, R. Rafati, A. Haddad, A. Cooper y H. Hamidi, "Application of Aluminium Oxide Nanoparticles to Enhance Rheological and Filtration Properties of Water Based Muds at HPHT Conditions", *Colloids and Surfaces A*, vol. 537, pp. 361-371, ene, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.10.050>Get. [Acceso May. 5, 2020]
- [2] A. W. Flores Bolaños, *Mejoramiento del Lodo de Perforación Base Agua con la Adición de Nanopartículas para Optimizar las Propiedades de la Retorta y Minimizar el Daño de Formación*, tesis pre., Facultad de Minas, Universidad Nacional Sede Medellín, Medellín, Colombia, 2017. [En línea]. Disponible: <http://bdigital.unal.edu.co/63829/>
- [3] F. Cortes, G. Alzate y S. Betancur, "Mejoramiento de los fluidos de perforación usando nano-partículas funcionalizadas: reducción de las pérdidas de filtrado y del espesor de la retorta", *Ciencias de la tierra*, n° 35, pp. 5-14, ene., 2014. doi: <https://doi.org/10.15446/rbct.n35.43179>. [Acceso Abril 22, 2020]
- [4] Baker Hughes, *Drilling Fluids References Manual.*, 2a ed., Houston: Baker Hughes, 2017.
- [5] IADC, *Drilling Manual*, 11a ed., Dallas: Energy API, 2000.
- [6] A. D. P. Patiño Gómez, *Diseño del fluido de perforación mitigando el daño de formación en la zona de interés del pozo O224 en el Campo Orito*, tesis pre., Facultad de ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá D.C, Colombia, 2017. [En línea]. Disponible: <https://hdl.handle.net/20.500.11839/6407>
- [7] Halliburton Latin America S.A. Baroid, *Manual de fluidos de perforación*, Houston: Halliburton Latin America S.A. Baroid, 2012.
- [8] K. M. Prieto Rey, *Evaluación de la viabilidad técnico-financiera de las nano-partículas de sílice como aditivo para el control del filtrado en el fluido de perforación base agua a nivel laboratorio*, tesis pre., Facultad de ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá D.C., Colombia, 2017. [En línea]. Disponible: <https://hdl.handle.net/20.500.11839/948>

- [9] A. M. Maldonado Bautista, *Formulación y evaluación de fluidos de perforación de base agua de alto rendimiento aplicados al Campo Balcón como sustitutos de lodo base aceite*, tesis pre., Facultad de ingenierías físico-químicas, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2006. [En línea] Disponible: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2006/121946.pdf>
- [10] Baker Hughes INTEQ, *Drilling Engineering Workbook*, Houston: Baker Hughes INTEQ, 1995.
- [11] Centro Internacional de Educación y Desarrollo, *Fluidos de perforación*, Caracas: PDVSA, 2002.
- [12] C. Franco, Curso introductorio a la Nanotecnología, Neiva, Virtual, 2020.
- [13] D. Nascimento, B. Oliveira, V. Saide, S. Malglaes, C. Scheid y L. Calçada, "Effects of particle-size distribution and solid additives in the apparent viscosity of drilling fluids", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 182, no. 106275, nov, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106275>. [Acceso May. 5, 2020].
- [14] K. Price, S. Young, J. Friedheim y G. De Stefano, «Nanotechnology application in drilling fluids,» de *Offshore Mediterranean Conference*, Ravenna, Italia, 2013.
- [15] L. E. Sánchez Russo y M. Á. Viveros Ramos, *Evaluación técnica a escala de laboratorio de un fluido de perforación base agua utilizando nano-partículas de LM-200 para la inhibición de lutitas en el Campo Castilla de Ecopetrol S.A*, tesis pre., Facultad de ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá D.C., Colombia, 2018. [En línea]. Disponible: <https://hdl.handle.net/20.500.11839/6749>
- [16] L. M. Torres Pérez , *Obtención del carbón activado a partir de semillas de ciruela y su empleo en la adsorción simple y competitiva de Cadmio y Zinc*, tesis pre., Facultad de ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá D.C., Colombia, 2008. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/1992/23568>
- [17] J. M. Martín Matínez, *Adsorción física de gases y vapores por carbones*, España: Universidad de Alicante, 1990.
- [18] J. Nasser, A. Jesil, T. Mohiuddind, M. Al Ruqeshi, G. Devi y S. Mohataram, "Experimental Investigation of Drilling Fluid Performance as Nanoparticles", *World*

Journal of Nano Science and Engineering, vol. 3, n° 3, pp. 57-61, sep, 2013. doi: 10.4236/wjnse.2013.33008. [Acceso May. 15, 2020]

- [19] J. Aramendiz y A. Imqam, "Silica and Graphene Oxide Naniparticle Formulation yo Improve Termal Stability and Inibition Capabilities of Water-Bases Drilling Fluid Applied to Woodfor Shale", *SPE Drilling & Completion*, vol. 35, jun, 2020. doi: <https://doi.org/10.2118/193567-PA> [Acceso Agos. 22, 2020]
- [20] L. M. Valencia Quicedo, *Efecto de la distribución del tamaño de partículas a escala nanométrica en los fluidos de perforación base agua: Reducción del filtrado y espesor del revoque*, tesis pre., Facultad de Minas, Universidad Nacioal Sede Medellín, Medellín, Colombia, 2019. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76524>
- [21] M. Noriega y C. Nuñez, *Evaluación de un fluido de perforación base agua mediante pruebas de laboratorio utilizando nanopartículas para la inhibición de arcillas y lubricidad en la formación Colorado en el Valle Medio del Magdalena*, tesis pre., Facultad de ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá D.C., Colombia, 2020.
- [22] G. Pozo Vela, *Diseño de un fluido de perforacion drill-in compuesto por carbonato de calcio para minimizar el daño de formación en el Campo Auca*, tesis pre., Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Tecnológica Equinoccial, Quito, Ecuador, 2015. [En línea]. Disponible: <http://repositorio.ute.edu.ec/handle/123456789/16747>
- [23] American Petroleum Institute, *Práctica recomendada API 13B-1 (PR 13B-1)*, Houston: API, 1997.
- [24] American Petroleum Institute, *Drilling Fluids Materials API Spec 13A*, Houston: API, 2019.
- [25] Instituto Nacional de Normalización, *Industrias del petróleo y del gas natural. Ensayos en campo de fluidos de perforación. Parte 1: Fluidos base agua. ISO 10414-1.*, 2008.
- [26] C. E. Candela y S. A. Salgado, *Evaluacion técnico-financiera del uso de aditivos a base de nanotecnología para la mejora del rendimiento en un fluido de perforación base agua a nivel de laboratorio*, tesis pre., Facultad de ingenierías, Fundación Universidad de

América, Bogotá D.C., Colombia, 2019. [En línea]. Disponible: <https://hdl.handle.net/20.500.11839/7344>

- [27] S. Ortega y J. Ortiz, *Evaluación a nivel de laboratorio de un fluido de perforación 100% base aceite mineral de baja toxicidad para actividades de perforación, en la sección intermedia 12 1/4" del campo Chichimene en la cuenca de los llanos orientales*, tesis pre., Facultad de ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá D.C., Colombia, 2016.
- [28] A. Salih y H. Bilgesu, "Investigation of rheological and filtration properties of Water-Based Drilling Fluids using various anionic nanoparticles", *SPE*, pp. 23-27, abril, 2017, doi: <https://doi.org/10.2118/185638-MS>
- [29] Schlumberger, «Oilfield Glossary,» SLB, 01 01 20. [En línea]. Available: https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/b/barrel_equivalent.aspx. [Último acceso: 13 10 20].
- [30] American Petroleum Institute, *Manual de perforación API*, Houston: API, 2014.
- [31] Fann Instrument Company, *iX77 TM Rheometer Instruction Manual*, Houston: fann, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.fann.com/content/dam/fann/Manuals/ix77%20Rheometer.pdf>

ANEXO 1

Realizar la prueba de retorno de permeabilidad para evaluar de manera cuantitativa el daño de formación, pues esta puede brindar un valor más acertado de cuánto será el daño de formación que genere el fluido de perforación.

Efectuar la prueba de reología a distintas temperaturas haciendo uso del reómetro Mars, en especial del módulo de Rheonaut que hace mediciones simultáneas de la viscosidad plástica y la espectroscopia FT-IR para conocer los grupos funcionales del fluido, y del módulo adicional de software que se encarga de hacer estudios sobre los polímeros presentes en los fluidos en referencia a la degradación térmica (TTS) y la distribución de peso molecular (MWD).

Desarrollar las pruebas en fluidos que contengan concentraciones de nano-grafito menores a las usadas en la investigación, para mejorar los resultados en el control de filtrado y su vez en el daño de formación.

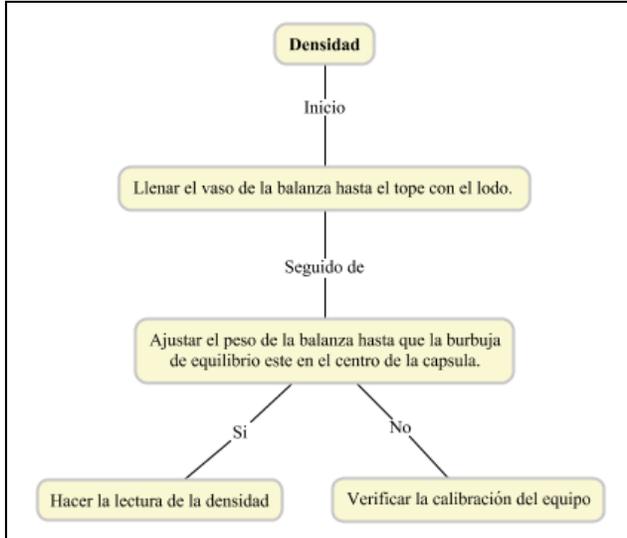
Evaluar formulaciones de fluidos donde se combinen los dos nano-aditivos investigados junto a aditivos de high performance que presenten un mejor rendimiento a condiciones HPHT.

No hacer uso de nanopartículas o aditivos de naturaleza magnética debido a que estos interfieren con el imán del equipo Fann77 en la toma de datos de la prueba de reología HPHT.

ANEXO 2

Figura 1.

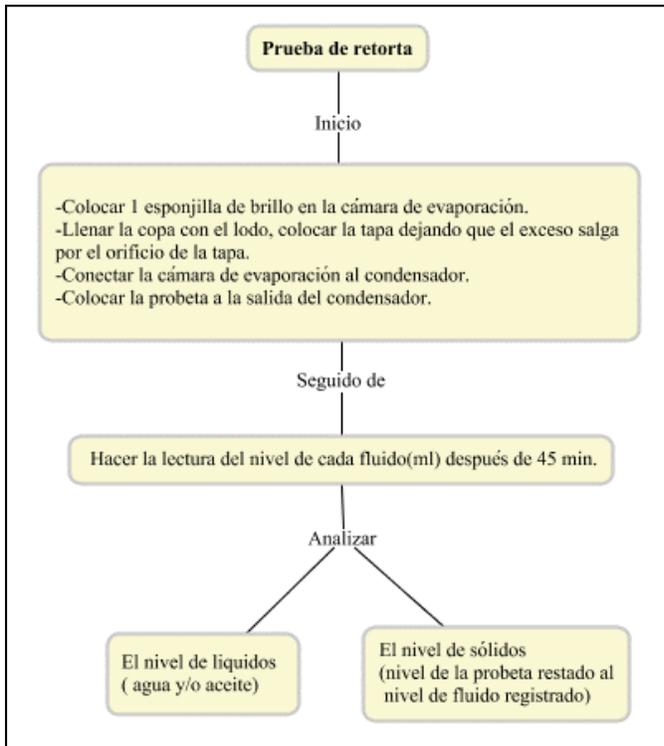
Prueba de densidad.



Nota: La figura describe el procedimiento que se realizó durante la prueba de densidad.

Figura 2.

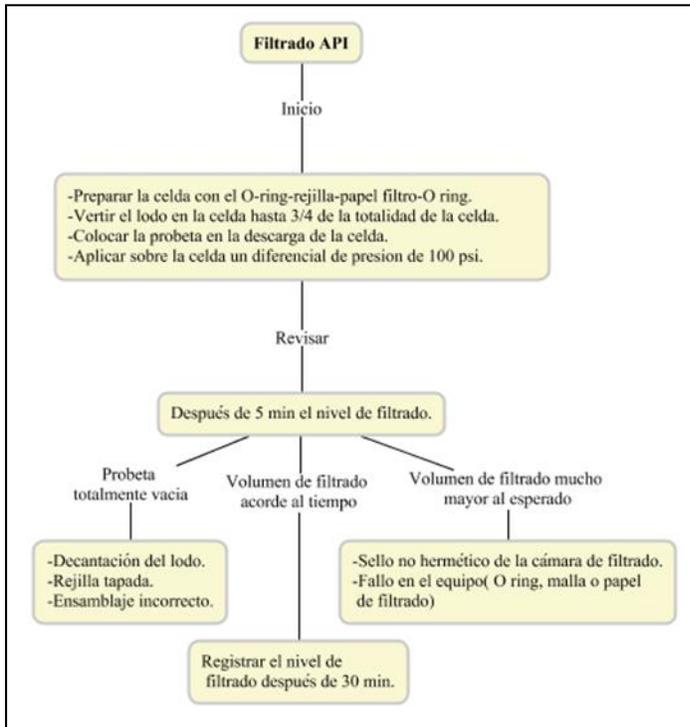
Prueba de contenidos de sólidos o retorta.



Nota: Esta figura describe el procedimiento realizado en la prueba de retorta.

Figura 3.

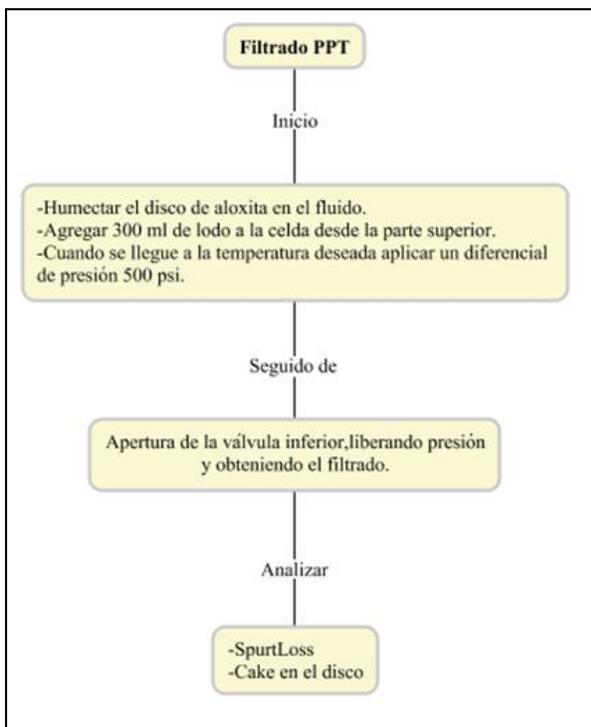
Prueba de filtrado API.



Nota: La figura describe el proceso desarrollado durante la prueba de filtrado API.

Figura 4.

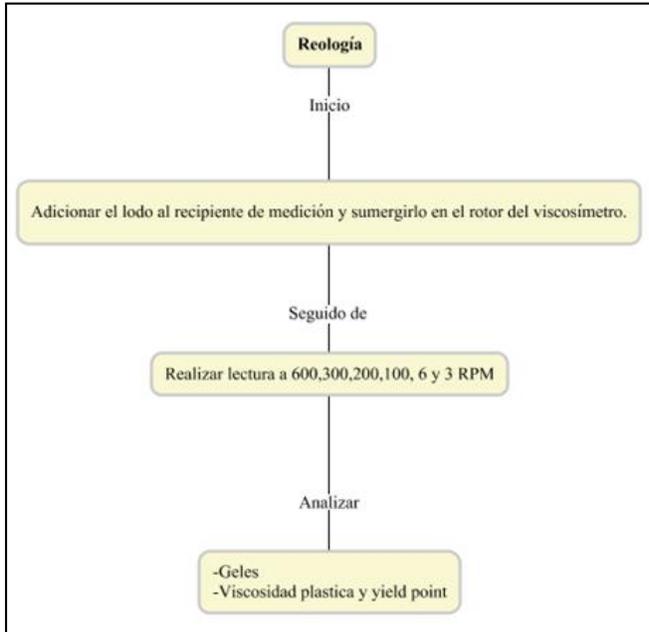
Prueba de filtro PPT.



Nota: La figura describe los pasos que se siguieron al realizar la prueba de filtrado PPT.

Figura 5.

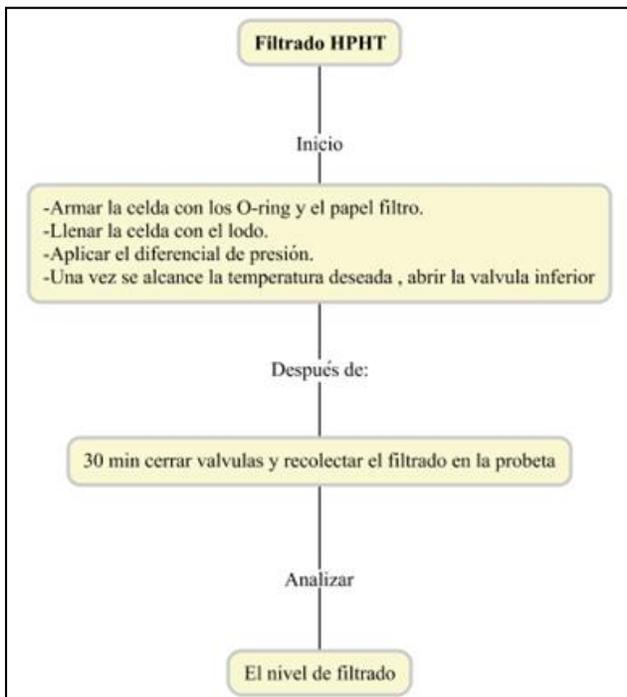
Prueba de reología a condiciones ambiente.



Nota: La figura describe el procedimiento realizado para la prueba de reología.

Figura 6.

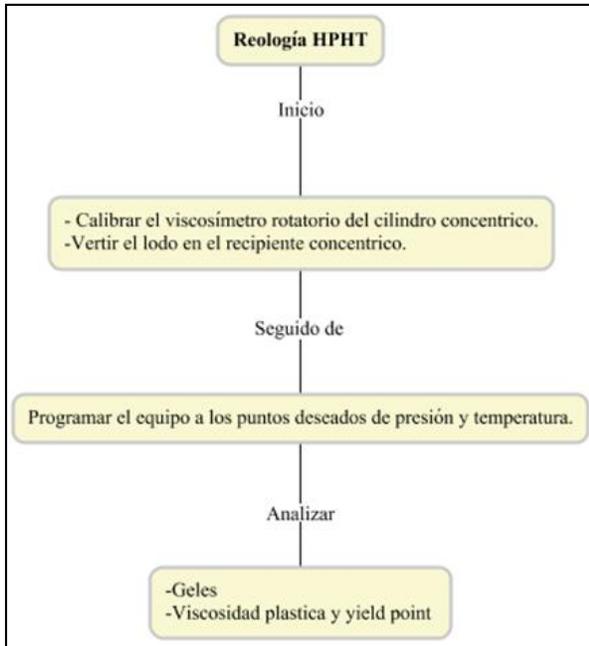
Prueba de filtrado en condiciones de alta presión y alta temperatura.



Nota: En la figura se describe el proceso realizado durante la prueba de filtrado HPHT.

Figura 7.

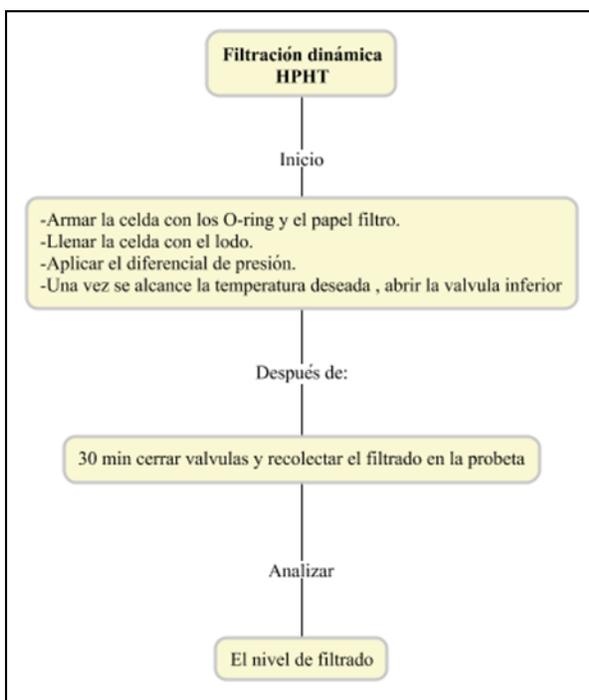
Prueba de reología en condiciones de alta presión y alta temperatura.



Nota: Esta figura describe el proceso realizado en la prueba de reología HPHT.

Figura 8.

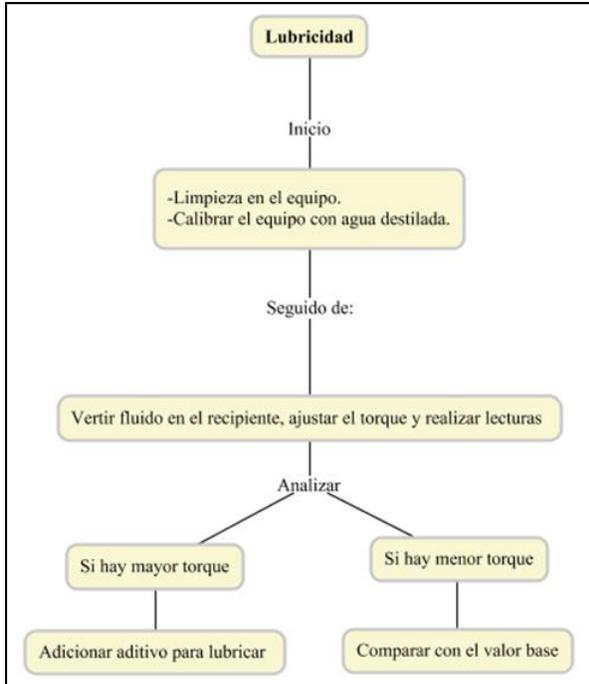
Prueba de filtración dinámica en condiciones de alta presión y alta temperatura.



Nota: La figura demuestra el proceso realizado para la prueba de filtración dinámica.

Figura 9.

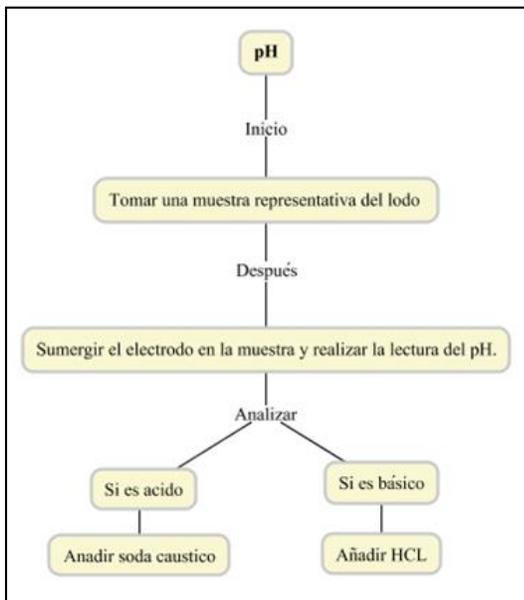
Prueba de lubricidad.



Nota: La figura describe la forma en la que se realizó la prueba de lubricidad.

Figura 10.

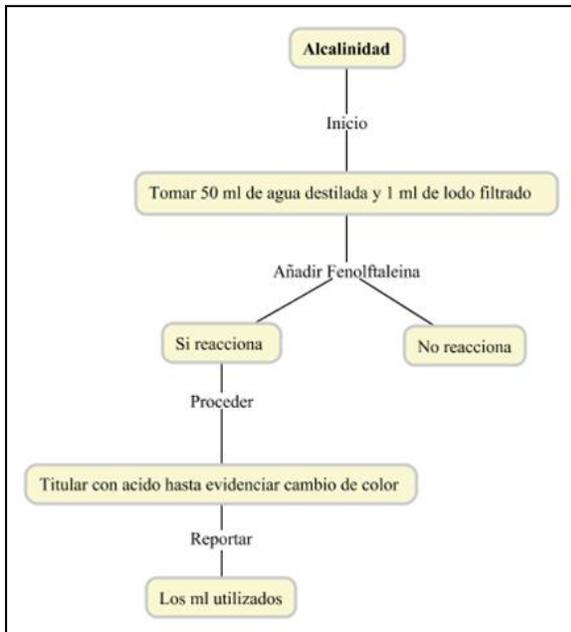
Prueba de pH.



Nota: La figura representa el proceso realizado en la prueba para conocer el pH de cada lodo.

Figura 11.

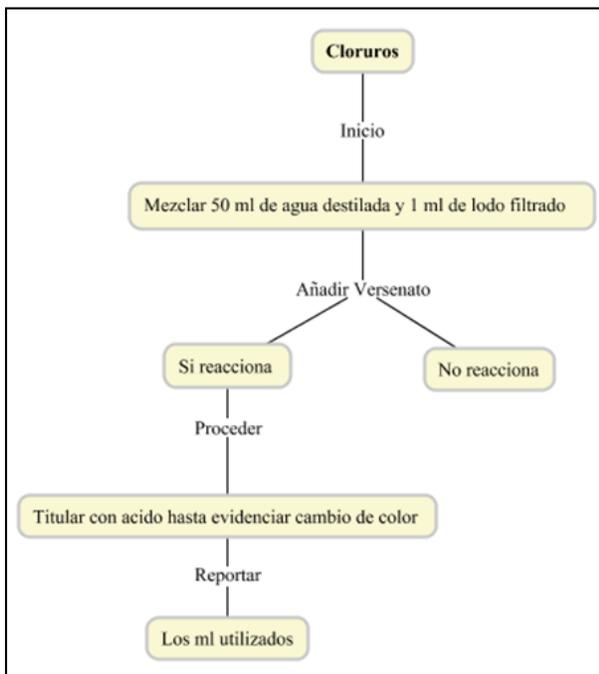
Prueba de alcalinidad.



Nota: La figura demuestra el procedimiento ejecutado para encontrar la alcalinidad de cada lodo.

Figura 12.

Prueba de cloruros.



Nota: La figura describe el proceso realizado para realizar la prueba química de cloruros.

ANEXO 3

Figura 1.

Prueba de reología API en el fluido base.



Nota: La figura evidencia el momento en el que se registraban los datos de la prueba de reología API del fluido base.

Figura 2.

Prueba de filtrado API en el fluido con 1 ppm de nano-grafito.



Nota: La figura evidencia el momento en el que se registraban los ml obtenidos de la prueba de filtrado API del fluido con 1 ppm de nano-grafito.

Figura 3.

Cake resultante de la prueba de filtrado API del fluido base.



Nota: La figura evidencia el cake y el filtrado obtenido en la prueba de filtración API del lodo base.

Figura 4.

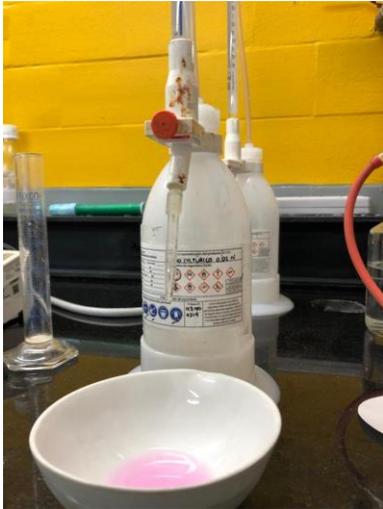
Prueba de filtrado API en el fluido con 1 ppm de nano-sílice.



Nota: La figura evidencia el momento en el que se registraban los ml obtenidos de la prueba de filtración API del fluido con 1 ppm de nano-sílice.

Figura 5.

Prueba de alcalinidad al filtrado del lodo con 1ppm de nano-grafito.



Nota: La figura evidencia el momento que se agrega el ácido sulfúrico 0.02N al filtrado del fluido con 1 ppm de nano-grafito.

Figura 6.

Prueba de retorta.



Nota: La figura evidencia el momento en el que se registraba el valor del agua presente en los fluidos, una vez realizada la prueba de retorta.