

Evaluación del comportamiento reológico de un fluido de perforación base agua reforzado con nanopartículas de óxido de titanio (TiO₂) y óxido de zinc (ZnO)

Joel Sebastián Medina Vega y Andrés Omar Poveda Caballero

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero de Petróleos

Director

Zuly Himelda Calderón Carrillo

PhD. en Ingeniería Química

Codirector

Enrique Mejía Ospino

PhD. en Ciencias Químicas

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

Este trabajo es dedicado principalmente a Dios quien me ha guiado a lo largo de mi vida brindándome sabiduría, salud y fortaleza para cumplir esta etapa satisfactoriamente.

A mis padres quién son el motor de mi vida y mi motivación para continuar con mis proyectos. Gracias por el apoyo incondicional y por confiar en mí en el transcurso de mi carrera. Finalizar esta etapa es muy especial porque gracias a ellos soy la persona que soy hoy en día.

A mi hermana mi compañera de vida, una mujer visionaria, trabajadora y mi motivación para seguir construyendo mis proyectos.

A mis compañeros de la universidad los cuales compartí muchas experiencias académicas espectaculares que me ayudaron a crecer ética, moral y académicamente.

Joel Sebastián Medina Vega

Dedicatoria

Este trabajo es dedicado principalmente a mis padres Bernardo y Cecilia quienes son el motor de mi vida y mi motivación para lograr todos mis sueños, gracias a sus consejos, confianza, cariño, respeto, amor y sabiduría me forme como el profesional que seré próximamente, su pichón de ingeniero.

A Dios padre todo poderoso, por la vida, sabiduría, fortaleza y guía en este camino. A mi familia por todo su apoyo incondicional, a quienes debo gran parte de mi formación personal y profesional.

A mis amigos Lucho, Jeffrey, Saul, Herin, Tapias, Paola, David, Sebas, Jhonathan, Sergio, Nelson con quienes compartí gratos momentos en la universidad y me brindaron su apoyo siempre.

A mi mejor amigo Silvio, quien siempre me brindo su apoyo incondicional para continuar con todos mis proyectos.

A todas esas personas que aportaron en mi crecimiento personal y profesional durante mi etapa universitaria.

Andrés Omar Poveda Caballero

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a las siguientes personas:

PhD. Zuly Himelda Calderón, director del proyecto, por su tiempo y colaboración durante el desarrollo del proyecto.

PhD. Enrique Mejía Ospino, codirector del proyecto, por su amabilidad y explicaciones en el área de la química.

Y a todos los compañeros del laboratorio LEAM, por su constante colaboración durante la caracterización de las nanopartículas ZnO y TiO₂.

Al grupo de investigación estabilidad de pozo (GIEP) por su apoyo y colaboración.

Al ingeniero Mario Torres, por su gran disposición a ayudarnos y su asistencia en el laboratorio.

Joel Sebastián Medina Vega

Andrés Omar Poveda Caballero

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	16
1. Objetivos	18
1.1 Objetivo General	18
1.2 Objetivos Específicos.....	18
2. Marco Teórico.....	19
2.1 Generalidades de los fluidos de perforación.....	19
2.1.1 Definición de un fluido de perforación	19
2.1.2 Fases de los fluidos de perforación	19
2.1.2.1 Fase continua.	19
2.1.2.2 Fase dispersa.	19
2.1.3 Clasificación de los fluidos de perforación.....	19
2.1.3.1 Fluidos base agua.....	20
2.1.3.2 Fluidos de perforación base aceite.....	20
2.1.3.3 Fluidos neumáticos.	20
2.1.4 Funciones de los fluidos de perforación	20
2.1.4.1 Enfriamiento y lubricación a la broca y sarta de perforación.	20
2.1.4.2 Suspensión de recortes.....	21
2.1.4.3 Control de presiones de la formación.	21
2.1.4.4 Control de filtrado.....	21

2.1.4.5 Soportar el peso de la sarta de perforación y del casing	21
2.1.4.6 Sostén a las paredes del pozo.....	22
2.1.4.7 Transmisión de potencia hidráulica sobre la formación por debajo de la broca.....	22
2.1.4.8 Asegurar una toma adecuada de registros de pozo.	22
2.1.5 Propiedades de los fluidos de perforación	22
2.1.5.1 Propiedades físicas.....	22
2.1.5.1.1 Viscosidad.....	22
2.1.5.1.2 Densidad.	23
2.1.5.1.3 Viscosidad plástica.....	24
2.1.5.1.4 Viscosidad aparente.	24
2.1.5.1.5 Viscosidad API.	24
2.1.5.1.6 Resistencia de gel.....	25
2.1.5.1.7 Punto cedente (Yield Point).....	25
2.1.5.1.8 pH.....	26
2.1.5.1.9 Propiedades de filtrado	26
2.1.5.2 Propiedades Químicas.....	27
2.1.5.2.1 Alcalinidad.....	27
2.1.5.2.2 Dureza.	28
2.1.5.2.3 Cloruros.....	28
2.1.6 Tipos de fluidos de perforación	28
2.1.6.1 Fluidos newtonianos.	28
2.1.6.2 Fluidos no Newtonianos.	28

2.1.7 Aditivos comerciales usados en fluidos de perforación.....	29
2.1.7.1 Viscosificantes.....	31
2.1.7.1.1 Bentonita.....	31
2.1.7.1.2 Asbesto.....	32
2.1.7.1.3 Atapulguita.....	32
2.1.7.1.4 Polímeros.....	33
2.1.7.2 Controladores de filtrado.....	33
2.1.7.2.1 Celulosa polianiónica (PAC-LTM).....	34
2.1.7.2.2 Almidones.....	34
2.1.8 Modelos reológicos.....	34
2.1.8.1 Modelo plástico de Bingham.....	34
2.1.8.2 Ley de la potencia.....	35
2.2 Generalidades de las nanopartículas de TiO ₂ y ZnO.....	36
2.2.1 Nanotecnología.....	36
2.2.2 Nanopartículas.....	37
2.2.3 Nanofluidos.....	37
2.2.4 Nanotecnología aplicada en la ingeniería de perforación.....	38
2.2.5 Nanopartículas de Óxido Titanio (TiO ₂) estado del arte.....	39
2.2.6 Nanopartículas de Óxido de Zinc (ZnO) estado del arte.....	42
2.2.6.1 Dispersión dinámica de luz (DLS).....	45
2.2.6.2 Absorción de radiación UV.....	45
2.2.6.3 Absorción infrarroja.....	46

3. Métodos y Resultados	48
3.1 Caracterización de nanopartículas comerciales de ZnO y TiO ₂	48
3.1.1 Dispersión dinámica de luz (DLS) nanopartículas ZnO Y TiO ₂	48
3.1.1.1 Óxido de Zinc comercial (ZnO).....	48
3.1.1.2 Óxido de Titanio comercial (TiO ₂).	51
3.1.2 Absorción Infrarroja nanopartículas comerciales de ZnO Y TiO ₂	53
3.1.2.1 Óxido de Zinc comercial (ZnO).....	53
3.2 Formulación y formatos de pruebas preliminares.....	55
3.2.1 Nanofluidos de ZnO Y TiO ₂	56
3.2.1.1 Reología y densidad nanofluidos de NPs ZnO y TiO ₂	56
3.2.1.2 Medición de pH nanofluidos de NPs ZnO y TiO ₂	57
3.2.1.3 Pruebas de filtrado API nanofluidos de NPs ZnO y TiO ₂	58
3.2.2 Comparación nanofluidos de ZnO y TiO ₂ y fluido de PAC-L	58
3.2.2.1 Reología y pH nanofluidos ZnO y TiO ₂ y fluido PAC-L.	59
3.2.2.3 Pruebas de comparación filtrado API nanofluidos ZnO y TiO ₂ y fluido PAC-L.	60
3.3 Desarrollo de las pruebas de laboratorio.....	60
3.3.1 Pruebas nanofluidos de ZnO Y TiO ₂	63
3.3.1.1 Prueba de reología y densidad nanofluidos de NPs ZnO y TiO ₂	63
3.3.1.1.1 Densidad nanofluidos ZnO y TiO ₂	64
3.3.1.1.2 Viscosidad dinámica nanofluidos ZnO y TiO ₂	64
3.3.1.1.3 Viscosidad plástica (Vp) y punto cedente (Yp) de los nanofluidos de ZnO y TiO ₂	66
3.3.1.1.4 Esfuerzos de gel nanofluidos ZnO y TiO ₂	67

3.3.1.1.5 Medición de pH nanofluidos de NPs ZnO y TiO ₂	68
3.3.1.1.6 Análisis de filtrado API nanofluidos de NPs ZnO y TiO ₂	69
3.3.1.1.7 Retortas Nanofluidos ZnO y TiO ₂	72
3.3.2 Comportamiento de las propiedades del lodo con las nanopartículas comerciales de Óxido de Zinc (ZnO) y óxido de Titanio (TiO ₂) y el PAC-L comercial.	73
3.3.2.1 Comparación pruebas de reología, densidad y pH de los nanofluidos de ZnO y TiO ₂ con el fluido de PAC-L.....	74
3.3.2.2 Comparación pruebas de filtrado de los nanofluidos de ZnO y TiO ₂ con el fluido de PAC-L.....	75
3.3.2.3 Retortas PAC-L.....	77
3.3.3 Pruebas de compatibilidad de las NPs de ZnO y TiO ₂	78
3.4 Análisis económico nanofluidos de ZnO y TiO ₂	88
3.5 Aditivo recomendado.....	92
4. Conclusiones.....	93
5. Recomendaciones	95
Referencias Bibliográficas	96

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Densificantes usados en la industria de los hidrocarburos</i>	23
Tabla 2 <i>Clasificación de los aditivos comerciales de fluidos de perforación</i>	30
Tabla 3 <i>Principales características respecto a las técnicas UV/Vis e IR</i>	47
Tabla 4 <i>Formulación de fluidos para pruebas preliminares</i>	55
Tabla 5 <i>Formulación de fluidos para pruebas preliminares de ZnO y TiO₂</i>	56
Tabla 6 <i>Formato registro de reología y densidad nanofluidos de ZnO y TiO₂</i>	57
Tabla 7 <i>Formato para registro del pH en los nanofluidos</i>	57
Tabla 8 <i>Formato para registrar el filtrado y análisis de retorta nanofluidos de ZnO y TiO₂</i>	58
Tabla 9 <i>Formato de formulación para la comparación de nanofluidos con el PAC-L</i>	59
Tabla 10 <i>Formato registro de comparación reología y pH nanofluidos ZnO y TiO₂ y fluido PAC-L</i>	59
Tabla 11 <i>Formato comparación para registrar el filtrado y análisis de retorta nanofluidos de ZnO y TiO₂ fluido PAC-L</i>	60
Tabla 12 <i>Formulación de fluidos pruebas nanofluidos de ZnO y TiO₂</i>	63
Tabla 13 <i>Resultados de reología y densidad nanofluidos de ZnO y TiO₂</i>	64
Tabla 14 <i>Medición pH en los nanofluidos de ZnO y TiO₂</i>	69
Tabla 15 <i>Resultados de filtrado y análisis de retorta nanofluidos de ZnO y TiO₂</i>	69
Tabla 16 <i>Formulación de fluidos ya establecidos y el nuevo fluido con el aditivo PAC-L</i>	73

Tabla 17 <i>Resultados pruebas de reología, densidad y pH para los nanofluidos ya planteados y el nuevo fluido con PAC-L</i>	74
Tabla 18 <i>Resultados obtenidos prueba de filtrado a 30 min y análisis de la retorta comparación de nanofluidos de ZnO y TiO₂ con fluido de PAC-L</i>	76
Tabla 19 <i>Formulación de los aditivos para pruebas de compatibilidad</i>	79
Tabla 20 <i>Observaciones pruebas de compatibilidad para ZnO + Agua</i>	80
Tabla 21 <i>Observaciones pruebas de compatibilidad para TiO₂ + Agua</i>	81
Tabla 22 <i>Observaciones pruebas de compatibilidad para NPs ZnO + Bentonita</i>	82
Tabla 23 <i>Observaciones pruebas de compatibilidad para NPs TiO₂ + Bentonita</i>	83
Tabla 24 <i>Observaciones pruebas de compatibilidad para NPs ZnO + PAC-L</i>	84
Tabla 25 <i>Observaciones pruebas de compatibilidad para NPs TiO₂ + PAC-L</i>	85
Tabla 26 <i>Observaciones pruebas de compatibilidad para NPs ZnO + Soda Cáustica (NaOH)</i> 86	
Tabla 27 <i>Observaciones pruebas de compatibilidad para NPs TiO₂ + Soda Cáustica (NaOH)</i> 87	
Tabla 28 <i>Formulación de lodos para análisis económico</i>	88
Tabla 29 <i>Precio de los aditivos y costo en USD/bbl</i>	89
Tabla 30 <i>Precio de los aditivos y costo del fluido en COP/bbl equivalente</i>	90
Tabla 31 <i>Comparación nanofluidos de NPs ZnO y TiO₂ con el lodo base y el fluido de PAC-L</i> 91	

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Gráfica del esfuerzo cortante (T) vs Velocidad de corte(V)</i>	26
Figura 2 <i>Gráfica del esfuerzo cortante (T) vs Velocidad de corte(V) Fluidos No Newtonianos</i> . 29	29
Figura 3 <i>Estructura de la bentonita</i>	31
Figura 4 <i>Estructura de un polímero</i>	33
Figura 5 <i>Análisis XRD de las NPs de TiO₂</i>	40
Figura 6 <i>Imágenes TEM de NPs TiO₂</i>	41
Figura 7 <i>Imágenes SEM de las NPs de ZnO sintetizadas</i>	42
Figura 8 <i>Imágenes TEM de NPs ZnO</i>	43
Figura 9 <i>Gráfica UV-Vis</i>	46
Figura 10 <i>Dispersión dinámica de luz (DLS) nanopartículas de ZnO sin aplicación de procesos de separación</i>	49
Figura 11 <i>Dispersión dinámica de luz (DLS) nanopartículas de ZnO con aplicación de ultrasonido</i>	50
Figura 12 <i>Dispersión dinámica de luz (DLS) nanopartículas de TiO₂ sin aplicación de procesos de separación</i>	51
Figura 13 <i>Dispersión dinámica de luz (DLS) nanopartículas de TiO₂ con aplicación de ultrasonido</i>	52
Figura 14 <i>Absorción Infrarroja de NPs comerciales de ZnO</i>	53
Figura 15 <i>Absorción Infrarroja de NPs comerciales de TiO₂</i>	54

Figura 16 <i>Balanza de medición de densidad para lodos</i>	61
Figura 17 <i>Imagen del reómetro de FANN 35 A</i>	61
Figura 18 <i>Imagen de la cinta indicadora de pH</i>	62
Figura 19 <i>Imagen de la filtroprensa</i>	62
Figura 20 <i>Representación de la viscosidad vs RPM (Θ300 y Θ600)</i>	65
Figura 21 <i>Gráfica de Viscosidad plástica y Punto cedente para los nanofluidos</i>	66
Figura 22 <i>Esfuerzos de gel vs concentración de Nanopartículas de ZnO y TiO₂</i>	68
Figura 23 <i>Volumen de filtrado obtenido en los nanofluidos de ZnO y TiO₂</i>	70
Figura 24 <i>Retortas formadas por el lodo base y los nanofluidos de ZnO y TiO₂</i>	72
Figura 25 <i>Comparación de las pérdidas de filtrado de los nanofluidos de ZnO y TiO₂ con el fluido de PAC-L</i>	77
Figura 26 <i>Retortas formadas por el lodo con el aditivo PAC-L</i>	78

Resumen

Título: Evaluación del comportamiento reológico de un fluido de perforación base agua reforzado con nanopartículas de óxido de titanio (TiO₂) y óxido de zinc (ZnO) *

Autor: Joel Sebastián Medina Vega (1), Andrés Omar Poveda Caballero (2)**

Palabras Clave: Nanopartículas, Oxido de Zinc (ZnO), Oxido de titanio (TiO₂), Fluido de perforación, Viscosidad, Propiedades reológicas, Caracterización, Control de filtrado y pH.

Descripción:

El ZnO y TiO₂ materiales comercialmente nanoparticulados presentan propiedades similares y de gran utilidad debido a su geometría y tamaño, su uso en diferentes áreas de la ciencia incluyendo la industria petrolera ha llamado la atención durante los últimos años.

En este trabajo se utilizaron nanopartículas comerciales de ZnO y TiO₂ en fase anatasa, se caracterizaron en el laboratorio de Espectrometría Atómica y Molecular (LEAM) de la sede UIS Guatiguará. Se llevaron a cabo diferentes pruebas en las que se observó que el óxido de zinc y óxido de titanio tienen un efecto positivo sobre las propiedades reológicas del fluido de perforación al agregar cantidades tan pequeñas entre 0,15 -0,35 libras por barril (lb/bbl). De igual manera se observó que los óxidos de zinc y titanio actúan como agentes controladores de filtrado, disminuyendo el volumen perdido de la fase acuosa y mejorando las propiedades del revoque o retorta del fluido. Según un análisis comparativo entre ZnO y TiO₂ como nanopartículas se pudo identificar que el ZnO a (0,1% en peso) se desempeñó favorablemente en el fluido de perforación base agua-bentonita.

En esta investigación, también se pudo comparar la efectividad del óxido de zinc y titanio como controlador de filtrado con el aditivo comercial PAC-L obteniendo resultados favorables y finalmente se analizó económicamente el uso de las nanopartículas en campo.

* Trabajo de Grado

** Universidad Industrial de Santander (UIS). Ingeniería de Petróleos. Director: Zuly Himelda Calderón Carrillo. Ph.D. en Ingeniería Química. Codirector: Enrique Mejía Ospino. Ph.D. en Ciencias Químicas.

Abstract

Title: Evaluation of the rheological behavior of a water-based drilling fluid reinforced with titanium oxide (TiO₂) and zinc oxide (ZnO) nanoparticles*

Author(s): Joel Sebastián Medina Vega (1), Andrés Omar Poveda Caballero (2) **

Key Words: Nanoparticles, Zinc Oxide (ZnO), Titanium Oxide (TiO₂), Drilling Fluid, Viscosity, Rheological Properties, Characterization, Filtering Control and pH.

Description:

ZnO and TiO₂ commercially nanoparticulate materials exhibit similar and very useful properties due to their geometry and size, their use in different areas of science including the oil industry has attracted attention in recent years.

In this work commercial nanoparticles of ZnO and TiO₂ in anatase phase were used, they were characterized in the Laboratory of Atomic and Molecular Spectrometry (LEAM) of the UIS Guatiguará, Different tests were carried out in which it was observed that zinc oxide and titanium oxide have a positive effect on the rheological properties of the drilling fluid by adding such small amounts between 0.15 -0.35 pounds per barrel (lb/bbl). Similarly, it was observed that zinc and titanium oxide acts as a filtering controlling agent, decreasing the lost volume of the aqueous phase, and improving the properties of the plaster or retort of the fluid. According to a comparative analysis between ZnO and TiO₂ as nanoparticles we can identify that ZnO at (0.1 wt%) performed favorably in the water-bentonite-based drilling fluid.

The effectiveness of zinc oxide and titanium as a filtering controller was compared with the commercial additive PAC-L obtaining favorable results and finally the use of nanoparticles in the field was economically analyzed.

* Degree Work

** Industrial University of Santander (UIS). Petroleum Engineering. Director: Zuly Himelda Calderón Carrillo. Ph.D. in Chemical Engineering. Co-director: Enrique Mejía Ospino. Ph.D. in Chemical Sciences.

Introducción

Los fluidos de perforación deben realizar de manera simultánea múltiples funciones, como enfriar la broca, controlar las presiones, lubricar la tubería de perforación, asegurar que la retorta se forme y evitar daños a la formación. Hoelscher et al, (2012) indican que sí el fluido falla en alguna de sus funciones se podrían presentar graves problemas como: pérdida de circulación, daños a la formación, pega de tubería, erosión de la formación y altos valores de torque y arrastre que reducen significativamente la eficiencia de la perforación. La aparición de estos problemas es más probable en condiciones de alta presión y alta temperatura, debido a que los fluidos de perforación experimentan la degradación de las propiedades fisicoquímicas del fluido, propiciando daños a la formación. Para evitar estos problemas se ha venido trabajando a través de los años en el uso de nanopartículas para controlar las diferentes propiedades reológicas en los fluidos de perforación.

Algunos autores han evaluado el uso de nanopartículas para mejorar el desempeño de los fluidos de perforación. Abdo y Danish, (2010) usaron nanopartículas como un aditivo en los fluidos de perforación, y modificaron la reología del fluido mediante el cambio de la composición, tipo o tamaño del aditivo. La capacidad de las nanopartículas para adaptarse a cualquier situación en particular puede disminuir el uso de otros aditivos costosos y mejorar la funcionalidad de los fluidos.

Este trabajo de investigación tiene como finalidad evaluar el comportamiento en los cambios de las propiedades reológicas de un fluido de perforación base agua, al ser reforzado con nanopartículas de óxido de titanio (TiO₂) y óxido de zinc (ZnO), a diferentes concentraciones,

comparando estos resultados, con aquellos que se obtienen en un fluido de perforación convencional, es decir sin utilizar nanopartículas, en el que a su vez se utilizan aditivos comerciales.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar el comportamiento reológico de un fluido de perforación base agua reforzado con nanopartículas de óxido de titanio (TiO₂) y óxido de zinc (ZnO).

1.2 Objetivos Específicos

Revisar el estudio de la aplicación de óxido de titanio (TiO₂) y óxido de zinc (ZnO) y sus efectos en las propiedades reológicas de los fluidos de perforación (estado del arte).

Caracterizar el óxido de titanio (TiO₂) y óxido de zinc (ZnO), teniendo en cuenta sus propiedades, síntesis, uso, costos, y otras.

Evaluar el comportamiento y compatibilidad del óxido de titanio (TiO₂) y óxido de zinc (ZnO) con los aditivos usados normalmente en los lodos de perforación convencionales base agua.

Realizar pruebas de reología API a un fluido de perforación convencional base agua al usar nanopartículas de óxido de titanio (TiO₂) y óxido de zinc (ZnO) a diferentes concentraciones y comparar los resultados obtenidos al realizar las pruebas al mismo fluido de perforación sin nanopartículas.

Realizar una evaluación económica del costo del uso de la bentonita, utilizada tradicionalmente en los fluidos de perforación convencionales base agua, frente a los costos referidos al uso de nanopartículas en los lodos de perforación convencionales base agua.

2. Marco Teórico

2.1 Generalidades de los fluidos de perforación.

2.1.1 Definición de un fluido de perforación

Un fluido de perforación es aquel que tiene características y propiedades especiales con aditivos o productos, que cumplen funciones fisicoquímicas específicas, de acuerdo con las necesidades operativas de una formación a perforar según (*Drilling fluid / oilfield glossary*, 1979). Lo que conlleva a que una operación de perforación no se puede desarrollar sin un fluido de perforación. Una definición más amplia se presenta a continuación: un fluido de perforación, también llamado lodo de perforación es un fluido líquido base agua o aceite cuyas propiedades han sido modificadas por sólidos – comerciales y/o nativos, disueltos y/o suspendidos con el fin de modificar propiedades como la viscosidad, densidad, pH, entre otras (MI & SWACO, s. f., pp. 1–3)

2.1.2 Fases de los fluidos de perforación

2.1.2.1 Fase continua. Es el líquido en el cual todos los materiales o sólidos están suspendidos, de esta manera los fluidos base agua la fase continua es el agua y en los fluidos base aceite la fase continua corresponde al aceite.

2.1.2.2 Fase dispersa. También llamada fase discontinua. Partículas sólidas o líquidas que se encuentran dispersas en la fase continua o rodeada por esta.

2.1.3 Clasificación de los fluidos de perforación

Los fluidos de perforación se clasifican de acuerdo con su fase continua.

2.1.3.1 Fluidos base agua. Son aquellos que tienen como fase continua agua dulce, agua de mar, agua salada.

2.1.3.2 Fluidos de perforación base aceite. Son aquellos que tienen como fase continua un aceite, como el diésel o aceite mineral.

2.1.3.3 Fluidos neumáticos. Este tipo de fluido se caracteriza por que la fase continua es aire u otro gas (gas seco o mezcla de gases).

2.1.4 Funciones de los fluidos de perforación

Las funciones de un fluido de perforación son lograr un completo éxito de un programa de perforación manteniendo la eficiencia, seguridad y economía. (Benítez Hernández. et al., s. f.)

Aunque el orden de importancia de cada función es determinado por las condiciones del pozo, y el tipo de operación que se desee hacer, la remoción de recortes y el control de presiones de formación son dos de los objetivos principales (MI & SWACO, s. f., pp. 1–3).

Las funciones que se presentan con frecuencia son las siguientes:

2.1.4.1 Enfriamiento y lubricación a la broca y sarta de perforación. Durante el proceso de perforación se genera fricción en la sarta provocando calor y es allí donde a medida que el fluido de perforación pasa por ella esta se enfría, permitiendo que mediante conductividad térmica el calor que sea recogido desde el fondo del pozo sea transportado a la superficie y dispersado a la atmósfera.

El lodo también ayuda a la lubricación de la barrena mediante el uso de aditivos especiales que afectan la tensión superficial. Esta capacidad lubricante se demuestra en la disminución de la torsión de la sarta, aumento de la vida útil de la barrena, reducción de la presión de la bomba, etc. (Funciones y tipos de lodos, 2017).

2.1.4.2 Suspensión de recortes. Si en algún momento se detiene la circulación del fluido de perforación los recortes quedarán suspendidos ya que este tiene la capacidad de generar un gel o “gelatinosidad”, la cual previene que los recortes caigan al fondo y eviten problemas en la tubería al reanudar la perforación.

2.1.4.3 Control de presiones de la formación. El fluido de perforación es vital para mantener el control de un pozo. El lodo es bombeado a través de la sarta de perforación, de la barrena y de regreso por el espacio anular. En agujero descubierto, la presión hidrostática ejercida por la columna de lodo se utiliza para compensar los incrementos de la presión de formación que, de lo contrario, producirían el ingreso de los fluidos a la formación en el pozo, causando posiblemente la pérdida del control de pozo. En el estudio de (Williamson, 2013b,p. 1).

2.1.4.4 Control de filtrado. En formaciones con alta permeabilidad, el fluido puede irrumpirlas, si la presión de la columna de fluido (hidrostática) es más alta que la presión de formación, se genera una filtración que invade la formación y es en esas situaciones donde se hace necesario el uso de agentes punteantes para formar una retorta (o revoque) de baja permeabilidad, que se deposita sobre la superficie de la formación permeable con el fin de limitar la invasión del filtrado. Los agentes punteantes, también conocidos como controladores de filtrado incluyen al carbonato de calcio y una gran variedad de aditivos (MI & SWACO, s. f., pp. 1–3).

2.1.4.5 Soportar el peso de la sarta de perforación y del casing. Mediante un aumento en la densidad del fluido de perforación se logra una reducción del peso que el equipo de superficie debe soportar, ya que se está generando un efecto de flotación a través de un empuje parcial del fluido hacia arriba provocando un sostenimiento de la tubería, es decir que a medida que aumenta el peso del fluido de perforación, disminuye el peso de la tubería.

2.1.4.6 Sostén a las paredes del pozo. Para evitar que la formación se derrumbe, el fluido de perforación debe formar una retorta elástica con un espesor idóneo, para ayudar a mantener las paredes del pozo.

2.1.4.7 Transmisión de potencia hidráulica sobre la formación por debajo de la broca. El fluido de perforación es liberado a través de las boquillas de la broca, mediante la energía hidráulica se genera un impacto a la formación, ablandado y removiendo lejos los recortes aumentando así la velocidad de penetración y la vida útil de la broca.

2.1.4.8 Asegurar una toma adecuada de registros de pozo. Para tomar los registros eléctricos se requiere que el fluido de perforación sea un medio conductor eléctrico, que permita obtener las propiedades, eléctricas de los diferentes fluidos de la formación.

La evaluación apropiada de la formación se dificulta enormemente si la fase líquida del fluido de perforación se ha desplazado al interior de la formación, o bien si el fluido altera las propiedades químicas o físicas del agujero (BENITEZ HERNÁNDEZ. et al., s. f.).

2.1.5 Propiedades de los fluidos de perforación

2.1.5.1 Propiedades físicas. Las propiedades físicas de los fluidos de perforación más importantes son las siguientes.

2.1.5.1.1 Viscosidad. Definida como la resistencia interna del fluido en movimiento. Demarca la capacidad del lodo de obtener una importante limpieza en el pozo, mantener en suspensión y desalojar los residuos sólidos o ripios.

La viscosidad también puede definirse como una relación entre el esfuerzo de corte (τ) y velocidad de corte (g), es decir:

$$\mu = \frac{\text{Esfuerzo de corte } (\tau)}{\text{Velocidad de corte } (g)} \quad (\text{Ecuación 1})$$

En general, dentro de un sistema de circulación la velocidad de corte depende de la velocidad media del fluido en la geometría que está fluyendo, así que, las velocidades de corte son mayores en geometrías pequeñas (columna de perforación) y menores en geometrías grandes como el casing (tubería de revestimiento) y espacios anulares.

2.1.5.1.2 Densidad. Es una de las propiedades más importantes y críticas de cualquier fluido de perforación ya que con ella se provee el control primario del pozo (Romero, s. f.). La densidad determina la capacidad del fluido de perforación de ejercer una contrapresión en las paredes del pozo, siendo este valor no tan elevado, ya que podrían ocasionarse fracturas en la formación y por consiguiente provocar altas presiones hidrostáticas. Comúnmente se busca que la densidad sea semejante a la del agua buscando con ella altas velocidades de penetración.

$$\delta = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \text{ (Ecuación 2)}$$

Su valor es expresado en libras por galón ($\frac{lb}{gal}$), kilogramos por litro ($\frac{Kg}{L}$) y libras por pie cúbico $\frac{lb}{ft^3}$. Muchas veces se usa “peso” para hacer referencia a la densidad.

Tabla 1

Densificantes usados en la industria de los hidrocarburos

Agente Densificante	Peso Máximo (ppg)	Peso Máximo (SG)
Barita	19,5	2,34
Dolomita	11,5	1,38
Cloruro de Potasio	9,7	1,16
Cloruro de Sodio	10,0	1,20
Cloruro de Calcio	11,8	1,42
Formiato de Potasio	13,3	1,60
Bromuro de Calcio	15,4	1,85
Formiato de Cesio	19,7	2,30

Nota: La tabla muestra algunos de los densificantes más usados en la industria de los hidrocarburos. Adaptado de <https://es.slideshare.net/RicardoRomero232/propiedades-de-los-fluidos-de-perforacin>

2.1.5.1.3 Viscosidad plástica. De acuerdo con Schlumberger, s. f., la viscosidad plástica se define como la resistencia del flujo debido a fracciones mecánicas entre las partículas sólidas suspendidas en el fluido. Una PV baja indica que el lodo es capaz de perforar rápidamente debido a la baja viscosidad del lodo que sale en la broca, reduciendo uso y desgaste de los equipos. Una PV alta es causada por un fluido de base viscosa y por el exceso de sólidos coloidales. Para bajar la PV se puede lograr una reducción del contenido de sólidos mediante la dilución del lodo.

La viscosidad plástica en centipoise se calcula restando la indicación a 300 rpm de la indicación a 600 rpm en un viscosímetro de indicación directa, es decir:

$$VP = \theta_{600} - \theta_{300} \text{ (Ecuación 3)}$$

2.1.5.1.4 Viscosidad aparente. Es una medida aparente de la resistencia de los fluidos a fluir, esto debido a los efectos de adhesión y cohesión generados por la atracción entre moléculas y su comportamiento en la suspensión del fluido de perforación, se define entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación a una temperatura fija (Hawker & Robinson, 2001, pp. 1–4).

La viscosidad aparente es la mitad de la lectura del dial a 600 rpm (1022 seg⁻¹ de velocidad de corte) utilizando un viscosímetro rotacional, es decir:

$$Va = \frac{\theta_{600}}{2} \text{ (Ecuación 4)}$$

2.1.5.1.5 Viscosidad API. Se mide mediante el uso del embudo Marsh, con el fin de comparar la resistencia del fluido al flujo con la del agua, sus unidades de medida son tiempo/volumen o son s/L.

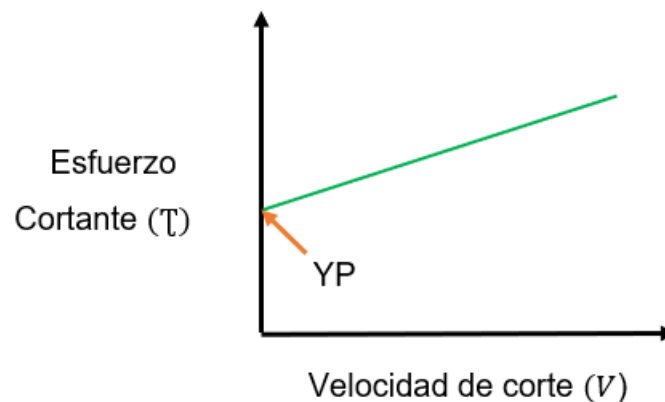
2.1.5.1.6 Resistencia de gel. Es una de las propiedades más importantes del lodo, ya que representa una medida de las propiedades tixotrópicas del fluido y mide la atracción física y electroquímica bajo condiciones estáticas (Schlumberger, s. f.-a).

La fuerza de geles indica una medida del esfuerzo o ruptura de la consistencia de un gel ya formado. Dicha consistencia depende de la cantidad y tipo de sólidos en suspensión, del tiempo, la temperatura y del tratamiento químico, en definitiva, cualquier parámetro que ayude o impida el enlace de las partículas aumentará o reducirá la resistencia de gel. Siendo así, si el gel se forma lentamente después del reposo, la tasa de gel es baja y si se forma rápidamente la tasa de gel es alta, esto permite el buen rendimiento de bombas y una velocidad apropiada de circulación que ayuda a reducir el efecto de succión cuando se extrae de la tubería, adicionalmente ayuda a la separación del gas que se encuentra en el fluido, facilitando el funcionamiento de la unidad desgasificante. Su medición se efectúa en viscosímetro rotacional de indicación directa, esta medida se toma a los 10 minutos y a los 10 segundos y las unidades el esfuerzo de gel son lb / (100 ft²) (Hernández Manrique, A.; 2018).

2.1.5.1.7 Punto cedente (Yield Point). El punto de cedencia se genera debido a las fuerzas de atracción que existen entre las partículas y sólidos en suspensión, siendo así, toda esta concentración y unión de partículas generan que estas permanezcan fijas y por lo tanto el fluido quede estático, una vez se alcanza el valor de cedencia el fluido empieza a moverse, en otras palabras, el punto cedente representa el esfuerzo mínimo requerido para iniciar el movimiento del fluido como se muestra en la figura 1.

Figura 1

Gráfica del esfuerzo cortante (T) vs Velocidad de corte(V)



Nota: En la gráfica se puede observar el punto de medición del YP. Adaptada de <https://issuu.com/biliovirtual/docs/hidraulica-de-fluido-de-perforacion/16>

La correlación para hallar el valor cuantitativo del punto cedente es la siguiente:

$$YP \left(\frac{lb}{100 ft^2} \right) = 2\theta_{300} - \theta_{600} \quad (\text{Ecuación 5})$$

De manera equivalente:

$$YP \left(\frac{lb}{100 ft^2} \right) = \theta_{300} - VP \quad (\text{Ecuación 6})$$

2.1.5.1.8 pH. El pH de un lodo es la medida de su acidez o alcalinidad, su escala va desde 0 a 14, siendo el lodo neutro si su pH es 7, si está por debajo de 7 es ácido y por encima alcalino. La mayor parte de las perforaciones requieren que el fluido de perforación tenga un pH básico (mayor a 9) para generar control y disminución de problemas asociados a corrosión en las tuberías por acción del contacto permanente con el fluido de perforación.

2.1.5.1.9 Propiedades de filtrado. Según Amado y Rueda, (2018) el filtrado hace referencia a la cantidad de fase continua (líquido) que pasa a través de la torta hacia las formaciones

permeables, debido a la presión diferencial a la que está sometida el fluido de perforación. Esta se genera cuando la presión ejercida por la columna de fluido de perforación es mayor que la presión de la formación. Para que haya filtrado deben cumplirse 3 condiciones fundamentales: que haya un medio poroso y permeable, que exista un diferencial de presión entre el fluido de perforación y la formación y que la formación sea permeable.

Durante esta filtración las partículas sólidas son filtradas formando un revoque. El ingeniero de lodos debe garantizar que el fluido de perforación genere un revoque (sólidos suspendidos en el medio poroso durante el filtrado) liso, delgado, y consistente, además el filtrado debe ser compatible con los fluidos de la formación para no alterarla.

El filtrado puede ocurrir a condiciones estáticas y dinámicas; la filtración estática ocurre cuando el fluido de perforación no está circulando, así que el espesor de la torta aumenta con el tiempo; la filtración dinámica ocurre a condiciones en las que el fluido está circulando, si bien el espesor de la torta es menor, el filtrado es mayor (se pierde más líquido).

Existen varios métodos para determinar las pérdidas de filtrado, en el presente trabajo escrito se abordaron dos: filtrado API a temperatura ambiente (aproximadamente 82 °F) y presión de 100 Psi y el filtrado de alta presión y alta temperatura (HPHT) para el que se usó una presión de 500 psi y una temperatura de 250 °F.

2.1.5.2 Propiedades Químicas. Algunas de las propiedades químicas de los fluidos de perforación se presentan a continuación.

2.1.5.2.1 Alcalinidad. La alcalinidad se basa en los iones que unen los protones ácidos en sus moléculas con el fin que no estén disponibles como ácido libre, y así conocer la cantidad de ácido requerida para disminuir el pH.

Para la determinación de la alcalinidad en un fluido, se realiza un procedimiento de titulación, usando como agente indicador fenolftaleína y usando Ácido sulfúrico hasta lograr un pH de 8,3 y usando como solución indicadora anaranjado de metilo hasta lograr un pH de 4,3 (Hernández Manrique, 2018).

2.1.5.2.2 Dureza. La dureza en un fluido de perforación es notoria por la cantidad de sales de magnesio y calcio que están en el filtrado del lodo, dentro de su funcionalidad permite determinar la presencia de calcio, siendo este un contaminante en los fluidos de perforación.

2.1.5.2.3 Cloruros. Indicador de la cantidad de iones de Cl⁻ que se encuentran en el filtrado del fluido de perforación se puede precisar una contaminación del fluido por un domo salino, si se encuentra una alta concentración de cloruros.

2.1.6 Tipos de fluidos de perforación

2.1.6.1 Fluidos newtonianos. Es aquel fluido por lo cual su viscosidad varía con respecto a cambios de presión y temperatura. Este se rige según la ley de viscosidad de Newton, donde la velocidad de corte es directamente proporcional con el esfuerzo de corte. Matemáticamente se expresa así:

$$\tau = \mu V \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

τ = esfuerzo de corte.

μ = constante.

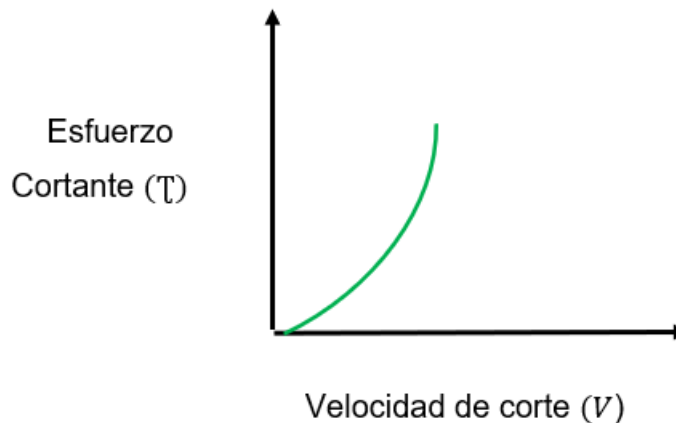
V = velocidad de corte.

2.1.6.2 Fluidos no Newtonianos. Son fluidos que no poseen una viscosidad definida, constante y depende de la temperatura y fuerza cortante. Los fluidos de perforación se clasifican dentro de este tipo de fluido. Gráficamente la relación que hay entre el esfuerzo de corte y la

velocidad de corte no va a hacer una recta como en los fluidos Newtonianos, sino que se generara una curva como se puede observar en la figura 2.

Figura 2

Gráfica del esfuerzo cortante (T) vs Velocidad de corte (V) Fluidos No Newtonianos



Nota: La gráfica muestra el comportamiento de un fluido no Newtoniano. Adaptado de <https://dokumen.tips/documents/gráfica-de-fluidos-no-newtonianos.html>.

2.1.7 Aditivos comerciales usados en fluidos de perforación

El ingeniero de lodos antes de formular el fluido de perforación se cuestiona en ciertas preguntas para tomar la mejor decisión como: ¿Qué tipo de formaciones se van a tratar al momento de realizar la perforación? ; ¿Qué aditivos son óptimos para manejar las situaciones al momento de perforar el pozo? ; ¿Cuál es la función principal del producto y su naturaleza química?; ¿Cuáles son los límites de temperatura del aditivo?; ¿Presenta el aditivo propiedades coloidales (viscosidad, propiedades de gel)?; ¿En qué tipos de fluidos se puede aplicar el aditivo?; ¿Cómo es el rendimiento del aditivo cuando está en presencia de calcio y sal?; ¿Al momento de realizar una interpretación de los registros el aditivo interfiere en ellos?; ¿Cuál es el costo unitario del producto?; ¿Hay estudios que me demuestren que estos aditivos han tenido éxito?.

Dándole solución a las preguntas, el ingeniero selecciona los aditivos adecuados basado en los requerimientos del fluido para la operación. A continuación, en la tabla 2, se muestra una clasificación de los aditivos comerciales.

Siendo así, profundizando en aditivos que orienten hacia el futuro y lograr nuevos objetivos al usar las nanopartículas de óxido de zinc y óxido de titanio como lo son los viscosificantes y controladores de filtrado.

Tabla 2

Clasificación de los aditivos comerciales de fluidos de perforación

CLASIFICACIÓN DEL ADITIVO	ADITIVO
Viscosificantes	Bentonita Asbestos Atapulguita Polímeros Fosfatos
Dispersantes	Lignosulfonatos Poliacrilato de sodio Lignitos Sales disueltas
Densificantes	Barita Óxido de hierro Galena Carbonato de Calcio
Aditivos especiales	Floculantes Controladores de pH Lubricantes Controladores de pega diferencial Dispersantes
Controladores de filtrado	CMC Almidones Celulosa polianiónica Bentonita

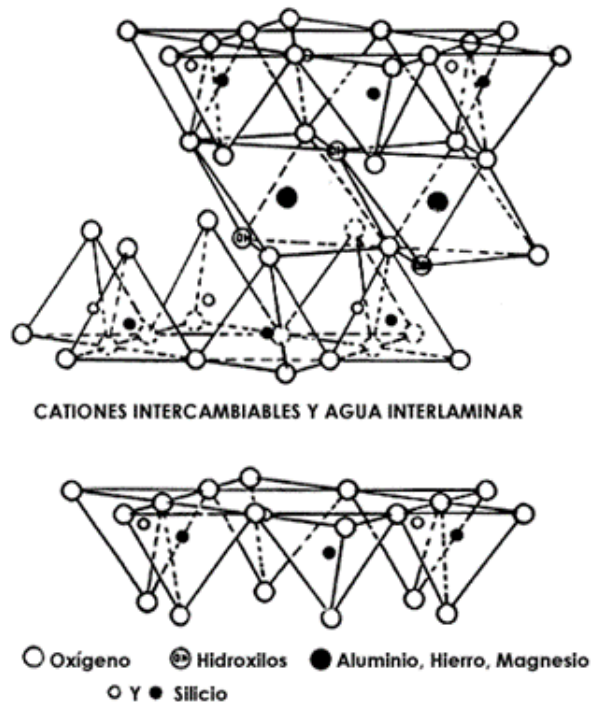
Nota: En la tabla se presenta la clasificación de algunos aditivos que se usan en los lodos de perforación.

2.1.7.1 Viscosificantes. A continuación, se denotan los principales viscosificantes.

2.1.7.1.1 Bentonita. Conocida también como montmorillonita sódica, es una arcilla hidrofílica dentro de muchas de sus funciones se encuentra el aumentar la viscosidad por medio de fuerzas de hidratación y movimientos mecánicos. La bentonita también protege las formaciones que son invadidas por el fluido de perforación ya que esta dilata considerablemente al ponerse en contacto con el agua disminuyendo las pérdidas de filtrado y manteniendo estables las paredes del pozo. Se ha referenciado como el agente más importante para añadir viscosidad en los fluidos base agua debido a su bajo costo y alta disponibilidad.

Figura 3

Estructura de la bentonita



Nota: La imagen muestra como está conformada la estructura de la bentonita. Tomada de http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/109/html/sec_6.html.

Según el API, s. f., la bentonita comercial debe cumplir con algunos requisitos: un rendimiento no menor a 90 bbl/ton en agua dulce, pérdida de filtrado menor a 13,5 ml en 30 minutos, un punto de cedencia no mayor que tres veces la viscosidad plástica y el material seco no debe exceder el 10% de humedad; además, no más del 40% de la bentonita debe quedar retenida en una malla 200 al realizarse una prueba de granulometría húmeda. El propósito de estos estándares es asegurar pureza, finura de grano y manejo adecuado del producto.

La montmorillonita tiene una estructura estratificada, en la que cada capa tiene un espesor de aproximadamente 10 angstroms. Cada capa es altamente flexible, fina y de gran área superficial. Se estima que un gramo de montmorillonita sódica tiene un área superficial de 750 m².

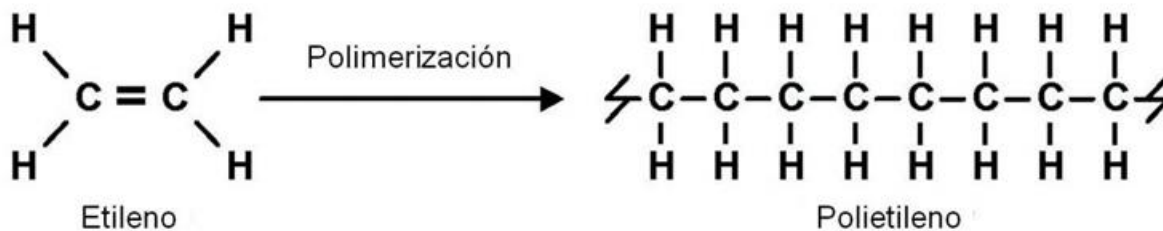
2.1.7.1.2 Asbesto. Es un viscosificante muy efectivo para fluidos de perforación de agua dulce o salada, pero en los últimos años se descubrió que su uso es reducido ya que está comprobado que es cancerígeno, por lo que se necesita cuidados especiales.

2.1.7.1.3 Atapulgita. Según Schlumberger, s. f.-a, es un mineral de arcilla acicular compuesto por silicato de magnesio-aluminio. Los principales yacimientos se encuentran naturalmente en Georgia, EUA. La atapulgita y la sepiolita tienen estructuras similares y ambas pueden utilizarse en lodos a base de agua salada para tener una viscosidad con baja velocidad de corte para la elevación de los recortes de perforación del espacio anular y para la suspensión de la barita. A la atapulgita y la sepiolita a veces se las llama "Salt Gel". La atapulgita no tiene capacidad para controlar las propiedades de filtración del lodo. Para su uso como aditivo para lodos a base de aceite, la arcilla es recubierta con una amina cuaternaria, lo que permite que se disperse en el petróleo y proporciona una estructura de gel, pero no mejora el revoque de filtración, a diferencia de la arcilla bentonita organófila.

2.1.7.1.4 Polímeros. Un polímero es una molécula que posee unidades repetitivas como se ve en la figura 4. Ciertos polímeros son de origen natural, entre ellas la goma de guar, la goma xantana y el almidón. Existen otros polímeros que dentro de la industria son naturalmente modificados como hidroxipropil almidón y el lignosulfonato. También existen polímeros sintéticos como los poliacrilatos, las poliacrilamidas y las polialfaolefinas. El tamaño (peso) molecular es un factor muy importante pues determina la forma en la cual el polímero representa su funcionalidad en un fluido de perforación. Un polímero de mayor tamaño puede ser floculante, más un polímero de menor tamaño puede ser desfloculante.

Figura 4

Estructura de un polímero



Nota: La imagen describe como se conforma la estructura y ramificación de un polímero. Tomado de <http://corinto.pucP.edu.pe/quimicageneral/contenido/82-polimeros.html>.

2.1.7.2 Controladores de filtrado. Los controladores de filtrado son agentes que reducen el volumen de líquido que pasa hacia la formación permeable, por el efecto de la presión diferencial entre el fluido de perforación y la formación. Algunos de ellos son: Celulosa polianiónica (PAC-LTM), polímeros manufacturados y almidones.

2.1.7.2.1 Celulosa polianiónica (PAC-LTM). Es un derivado de la celulosa de alta pureza, óptimo para el control de filtrado añadiendo muy poca viscosidad, funciona tanto en agua fresca como en agua salada.

2.1.7.2.2 Almidones. Es un aditivo para lodo de perforación utilizado para controlar la pérdida de fluido en lodos a base de agua que incluyen desde lodos a base de agua dulce a lodos de sal saturada y lodos de cal de alto pH. Los almidones tienen estabilidad térmica hasta alrededor de 250°F [121°C]. Están sujetos al ataque bacteriano a menos que sean protegidos por una alta salinidad o un bactericida. El almidón natural de grado perforación tiene especificaciones API/ISO de calidad. (Schlumberger, s. f.-a).

2.1.8 Modelos reológicos

En el estudio de DrillingPerfo, (2020) Hasta el momento es inexistente encontrar una correlación matemática que permita describir adecuadamente la reología en todos los fluidos de perforación, la razón es que son complicados y variados. Si se desea encontrar una correlación acertada se requiere del uso de un viscosímetro de múltiples velocidades, con el fin de construir un programa (gráfica de esfuerzo de corte vs velocidad de corte) y de esta manera analizar el comportamiento del fluido de perforación, para plasmarlo en un modelo reológico. Siendo así, se han buscado ecuaciones (modelos reológicos), que aproximan la relación entre esfuerzo de corte y velocidad de corte.

2.1.8.1 Modelo plástico de Bingham. Es el modelo más utilizado en la industria del petróleo pues permite describir las características del flujo en diversos tipos de lodos, siendo así un modelo mucho más simple para fluidos no Newtonianos. Este modelo supone un

comportamiento lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de cizallamiento, mostrado en la figura 5.

Se puede describir matemáticamente de la siguiente manera:

$$\tau = V * VP + YP \text{ (Ecuación 8)}$$

Donde:

τ = *Esfuerzo cortante.*

V = *Velocidad de corte.*

VP = *viscosidad plástica.*

YP = *punto decente (Yield Point)*

Según Schlumberger, s. f.-c, los fluidos que obedecen a este modelo se denominan fluidos plásticos de Bingham y exhiben un comportamiento lineal de esfuerzo cortante y velocidad de corte después de alcanzar un umbral inicial de esfuerzo cortante. La viscosidad plástica (PV) es la pendiente de la línea y el umbral Yield Point (YP) es el esfuerzo de umbral (ecuación 8). La PV debe ser lo más baja posible para que la perforación sea rápida y se consigue mejor mediante la reducción al mínimo de los sólidos coloidales. El YP debe ser suficientemente alto para sacar los recortes de perforación del pozo, pero no tan alto como para crear una presión excesiva de bombeo, cuando se inicia el flujo del lodo. El YP se ajusta haciendo elecciones criteriosas de los tratamientos de lodos. El reómetro rotacional de indicación directa fue diseñado específicamente para aplicar el modelo de fluidos plásticos de Bingham.

2.1.8.2 Ley de la potencia. A pesar de que el modelo plástico de Bingham con los parámetros de viscosidad plástica y yield point presenta una buena aproximación al comportamiento de los fluidos de perforación, a bajas velocidades de corte, el valor de esfuerzo de corte, dado por el modelo, es mayor que el valor obtenido experimentalmente en el fluido de perforación, esto ocurre principalmente en fluidos no dispersos con bajo contenido de sólidos. La

explicación es que, las velocidades de corte en el espacio anular están normalmente por debajo del valor de los 60 rpm del viscosímetro Fann, que es un rango donde el modelo plástico de Bingham no se aproxima a los valores de reología que arroja el fluido experimentalmente, razón por la cual se propone el modelo de la ley exponencial. (Amado Rueda, J.D ,2018).

La ecuación matemática que rige el modelo es:

$$\tau = K * V^n \text{ (Ecuación 9)}$$

Donde:

τ = *Esfuerzo de corte.*

K = *Factor de consistencia del flujo laminar.*

n = *índice de comportamiento del flujo laminar.*

K es un factor semejante a la viscosidad plástica, pues al aumentar el valor de K hay mayor concentración de sólidos o una disminución en el tamaño de las partículas.

El índice de comportamiento del flujo laminar (n) toma varios valores, para un fluido Newtoniano será 1, para los fluidos de perforación su valor <1 , para fluidos no dispersos está entre 0,4 y 0,7 y para fluidos altamente dispersos entre 0,7 y 0,9. Entre más bajo sea el valor que toma n , menos Newtoniano es el fluido de perforación.

2.2 Generalidades de las nanopartículas de TiO₂ y ZnO

2.2.1 Nanotecnología

La nanotecnología puede ser definida como el estudio, comprensión y el control de la materia a dimensiones de nanoescala en intervalos de tamaños entre 1 nm y 100 nm. Un nanómetro (nm) equivale a una milmillonésima parte de un metro ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$), de acuerdo con las definiciones del comité de normas ISO/TC-229 (Norma ISO/TS 80004-1 en materia de

nanotecnología), la Iniciativa Nacional de Nanotecnología de Estados Unidos (NNI) y la Comisión Europea (Santana & Gañán, 2019; Camacho *et al.*, 2016; Rodríguez, 2015).

En Colombia, de acuerdo con Camacho *et al.*, (2016), se han venido produciendo avances en investigación y desarrollos en nanotecnología, y fue creado el Consejo Nacional Asesor de Nanociencia y Nanotecnología (CNA) adscrito a la Red Colombiana de Nanociencia y Nanotecnología, definiendo a un nanomaterial como:

“Material natural o intencionalmente sintetizado, manufacturado o fabricado que exhibe propiedades, fenómenos o efectos biológicos no convencionales, que son atribuibles a sus dimensiones hasta una escala límite de un micrómetro. En el caso específico de materiales nanoparticulados se consideran así cuando estos presenten una distribución mayor al 10% de partículas inferiores o iguales a 100 nm en al menos una de sus dimensiones. Además de esta clasificación, se incluyen los materiales no necesariamente nanoparticulados pero que han sido modificados a escala nanométrica en su conformación o interfase para dar lugar a un material con nuevas propiedades”.

2.2.2 Nanopartículas

De acuerdo con Velásquez *et al.*, (2015), las nanopartículas se pueden considerar como fragmentos de materia sólida, cuyo tamaño oscila entre 1 y 100 nm y que normalmente se aplican dispersas en un líquido; esta combinación puede considerarse en muchos casos como un fluido “inteligente” o nanofluido.

2.2.3 Nanofluidos

Un fluido inteligente o nanofluido es una mezcla que consiste en partículas de tamaño nanométrico (partículas de tamaño nanométrico de metal, óxido, carburos, nanotubos), y fibras dispersas en un líquido, el resultado de esta mezcla es la alteración de las propiedades físicas de la base líquida, tales como viscosidad, densidad y transferencia de calor, entre otros.

De acuerdo con Amanullah, Al-Tahini, (2009); según el número de aditivos de tamaño nanométrico en el fluido, estos fluidos se pueden clasificar como nanofluido simple y nanofluido avanzado. Los nanofluidos con un aditivo de tamaño nanométrico se definen como nanofluidos simples y los nanofluidos con más de un aditivo de tamaño nanométrico se definen como nanofluidos avanzados. Desde el punto de vista funcional, un nanomaterial podría ser funcional único o multifuncional. Un nanoaditivo multifuncional puede realizar varios trabajos en los sistemas de fluidos para completar las tareas funcionales del fluido con una reducción dramática en el contenido total de sólidos y / o químicos de un lodo y también el costo general del fluido. Se espera que la capacidad funcional sea significativamente mayor con una reducción en el costo general de los fluidos, a pesar de que el alto costo del aditivo individual sea uno de los rasgos característicos de los fluidos inteligentes basados en nano.

2.2.4 Nanotecnología aplicada en la ingeniería de perforación

Las nanopartículas son usadas en la perforación para la estabilización de arcillas, mejorar la viscosidad de los fluidos de perforación, control de pérdida de fluidos, colapso de la pared del hueco, estabilización del pozo, torsión y fricción de arrastre (Ponmani et al, 2013).

Hay varios investigadores que trabajan en el uso de nanopartículas como aditivos de fluidos de perforación para reducir la pérdida de fluido y mejorar la estabilidad del pozo. La retorta de filtro, desarrollada durante la filtración de fluido de perforación y basada en nanopartículas, es

muy delgada, lo que implica un alto potencial para reducir el problema de adherencia, a la presión diferencial y el daño de formación durante la perforación (El-Diasty, Ragab; 2013).

Uno de los problemas más comunes que se presenta en la perforación de pozos petroleros es la pérdida de fluido (lodo de perforación) por filtración hacia la formación; esto representa un costo significativo a tomar en cuenta en la fase de inversión y desarrollo de pozos productores, sin embargo, la adición de NPs al fluido de perforación constituye una posible solución al problema, bien por modificación de sus propiedades reológicas o por la formación de micro/nano estructuras que reducen tal migración de los fluidos desde el pozo hacia el yacimiento (Velásquez et al, 2015).

Basados en Amanullah, Al-Tahini, (2009), los chorros y el filtrado de lodo son los dos factores principales que causan daños en la formación durante la perforación. Los fluidos con un potencial de pérdida de filtraciones nulo/insignificante, en condiciones de pozos son esenciales para evitar la mayor parte del daño de formación inducido por el lodo. Debido al potencial de formar una retorta delgada, no erosionable e impermeable con telas y unidades estructurales nano-mejoradas, bien dispersas y apretadas, se espera que los fluidos basados en nano eliminen o reduzcan el alcance del daño del reservorio con un impacto positivo en la productividad del pozo.

2.2.5 Nanopartículas de Óxido Titanio (TiO_2) estado del arte

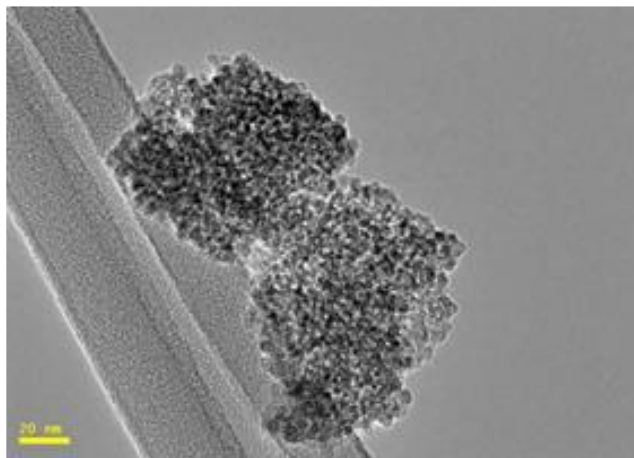
El óxido de titanio o dióxido de titanio (TiO_2), se considera como un semiconductor sensible a la luz que absorbe radiación electromagnética, en la región UV principalmente, siendo un material químicamente estable y muy económico teniendo la posibilidad de aplicarlo en diversas áreas (Cárdenas, 2012).

De acuerdo con el estudio realizado por Bayat et al., (2018), se intentó mejorar el rendimiento de un lodo base agua-bentonita mediante la adición de cuatro tipos de nanopartículas

hidrofílicas (NPs), dentro de las cuales se encuentra el Óxido de Titanio (TiO₂). Las NPs se dispersaron en el fluido de perforación con concentraciones de 0,01, 0,05, 0,1 y 1 % en peso; los resultados indicaron que la adición de las NPs en concentraciones inferiores al 0,5 % en peso al lodo base agua-bentonita, tienen potencial para mejorar las propiedades reológicas y de filtración del lodo. En este estudio el análisis XRD (Difracción de Rayos X) como se muestra en la figura 5, indica que las NPs de TiO₂ tienen estructuras parcialmente amorfas (semicristalinas) provenientes de la composición de la fase Anatasa, con tamaños de NPs entre los 6-11.8 nm. En cuanto al filtrado, la retorta formada por las NPs de TiO₂ fue la más consistente y menos quebradiza y a medida que se aumentaba la concentración en peso de NPs de TiO₂ la cantidad de filtrado se disminuía en comparación con las demás NPs utilizadas, se logró reducir hasta 11.4 ml en el estudio realizado por Bayat et al. (2018).

Figura 5

Análisis XRD de las NPs de TiO₂

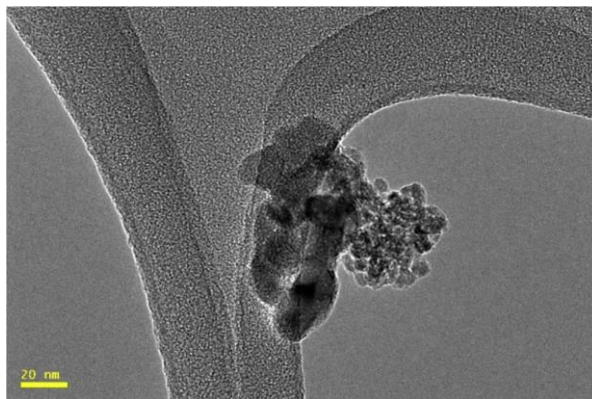


Nota: La imagen muestra la forma y estructura de las NPs de TiO₂. Tomada de Bayat *et al.* (2018).

En el estudio realizado por Bayat & Shams, (2019), fueron investigados los efectos de varias nanopartículas, dentro de las cuales se encuentran el óxido de titanio (TiO₂), en la mejora de las propiedades reológicas de un fluido base agua a dos temperaturas (25 y 50 °C). Las concentraciones de NPs en el lodo base se establecieron en 0.01, 0.05, 0.1 y 0.5% en peso, y se encontró que la concentración óptima de las NPs para aumentar la viscosidad plástica era del 0.01 % en peso. Además, al aumentar la concentración de NPs de TiO₂, los valores del yield point en el lodo se redujeron a 23,5 y 20,2 (lb/ 100 ft²) a 25 y 50 °C, respectivamente. Además. Las NPs de TiO₂ tuvieron los valores más bajos de fuerza de gel en 10 s y 10 min en todas las concentraciones y temperaturas aplicadas. Las imágenes TEM revelan que la morfología de las NPs es aproximadamente esférica con estructuras parciales (semicristalinas) con un tamaño de NPs de 3 a 65 nm como se observa en la figura 6 de la investigación hecha por Bayat & Shams. (2019).

Figura 6

Imágenes TEM de NPs TiO₂



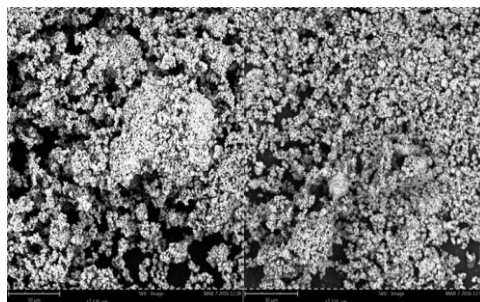
Nota: En la imagen se muestra la forma y estructura de las NPs de TiO₂. Tomada de Bayat & Shams. (2019). Pág. 4.

2.2.6 Nanopartículas de Óxido de Zinc (ZnO) estado del arte

En la investigación realizada por Afolabi et al., (2018), aplicaron un enfoque fundamental básico para derivar un modelo novedoso, que predice el impacto de las nanopartículas en la pérdida de fluido del lodo de perforación durante el proceso de filtración comparado con el modelo del Instituto Americano del Petróleo (API) utilizando medidas estadísticas y obteniendo con el nuevo modelo de pérdida de fluidos una mejor descripción del comportamiento de pérdida de fluidos del lodo de nano-perforación. En el modelo de Afolabi et al., (2018), se sintetizaron nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) y se aplicaron a un lodo de perforación base agua. La caracterización de las nanopartículas de ZnO se realizó mediante espectroscopía de rayos X dispersivos de energía (EDX), microscopía electrónica de barrido (SEM) y difracción de rayos X (XRD), sugiriendo una estructura cristalina cúbica centrada en la cara (FCC) para las nanopartículas de ZnO sintetizadas con un tamaño promedio de NPs de 14.96 nm, en la figura 7 se muestra la imagen SEM de las NPs de ZnO sintetizadas. La formulación del lodo se realizó con concentraciones de 1, 1.5 y 2 % en peso de NPs de ZnO, para las cuales se obtuvo una pérdida de filtrado a un tiempo de 30 min fueron alrededor de 52, 48 y 42 ml, respectivamente para el nuevo modelo propuesto por Afolabi et al., (2018).

Figura 7

Imágenes SEM de las NPs de ZnO sintetizadas

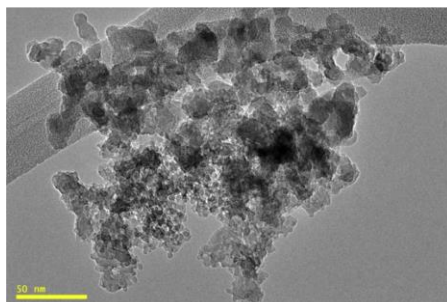


Nota: En la imagen se muestra la forma y estructura de las NPs de ZnO. Tomada de Afolabi et al., (2018). Pág. 6.

En el estudio realizado por Bayat & Shams. (2019), fueron investigados los efectos de varias nanopartículas, dentro de las cuales se encuentran el óxido de zinc (ZnO) en la mejora de las propiedades reológicas de un fluido base agua a dos temperaturas (25 y 50 °C). Las concentraciones de NPs en el lodo base se establecieron en 0.01, 0.05, 0.1 y 0.5% en peso, se encontró que la concentración óptima de todas las NPs para aumentar la viscosidad plástica era del 0.01 % en peso, pero la concentración más óptima de las NPs de ZnO era de 0.05 % en peso. Además, al aumentar la concentración de ZnO NPs hasta el 0,5 % en peso, el yield point del lodo base aumentó considerablemente a alrededor del 13,3 %. Además, las NPs de ZnO en concentraciones inferiores al 0,05% en peso tuvieron los mejores rendimientos para el control de pérdidas por filtración. Las NPs de ZnO tuvieron los valores más bajos de fuerza de gel en 10 s y 10 min en todas las concentraciones y temperaturas aplicadas. Las imágenes TEM revelan que la morfología de las NPs es aproximadamente esférica con estructuras amorfas cristalinas con un tamaño de NPs de 6 a 76 nm, como se observa en la figura 8 de la investigación realizado por Bayat & Shams. (2019).

Figura 8

Imágenes TEM de NPs ZnO



Nota: La imagen muestra la estructura y forma de las NPs de ZnO. Tomada de Bayat & Shams, (2019). Pág. 4.

2..2.7 Caracterización de las nanopartículas

Las mediciones basadas en la luz y otras formas de radiación electromagnética son ampliamente utilizadas en química analítica. Las interacciones de la radiación y la materia son el objeto de estudio de la ciencia llamada espectroscopia. Los métodos espectroscópicos analíticos se basan en medir la cantidad de radiación producida o absorbida por las especies moleculares o atómicas de interés. Podemos clasificar los métodos espectroscópicos de acuerdo con la región del espectro electromagnético utilizada o producida durante la medición. Se han utilizado las regiones de rayos g, rayos X, ultravioleta (UV), visible, infrarrojo (IR), microondas y las de radiofrecuencia (RF). De hecho, el uso actual extiende el significado de la espectroscopia para incluir técnicas como la espectroscopia acústica y la espectroscopia de electrones, en las cuales la radiación electromagnética no es parte de la medición. (Skoog et al., 2015, parr. 1).

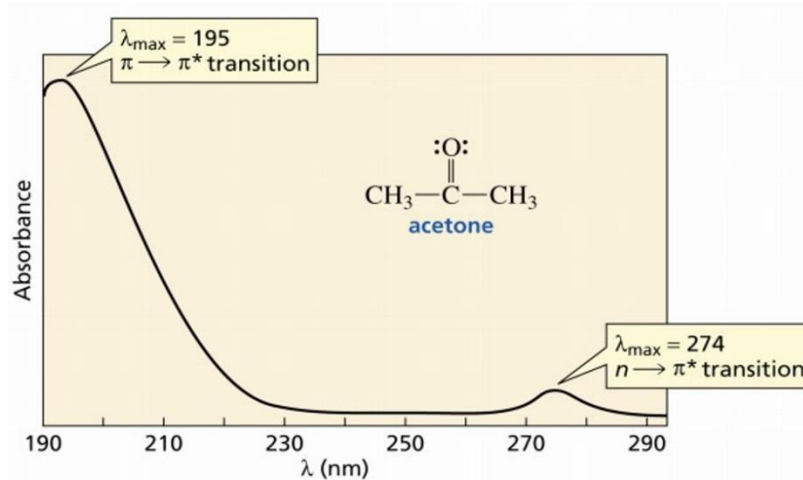
Durante los últimos años la espectroscopia ha ejecutado una función importante en el desarrollo de la teoría atómica moderna. Adicionalmente, los métodos espectro químicos han brindado las herramientas más utilizadas para la explicación de la estructura molecular, así como para las determinaciones cuantitativas y cualitativas tanto de compuestos inorgánicos como orgánicos.

Dentro de los principales métodos utilizados para la caracterización de las nanopartículas encontramos los siguientes: Dispersión dinámica de luz DLS, absorción de radiación UV, visible e IR.

2.2.6.1 Dispersión dinámica de luz (DLS). Es una técnica no invasiva usada para medir el tamaño y la distribución del tamaño de partículas y moléculas, para partículas suspendidas o disueltas en un medio acuoso (líquido). La determinación de su tamaño se encuentra dentro de una escala de 2nm hasta 2 micras.

Según Cuadros Moreno et al., (2014) en su estudio afirman que la luz láser al alcanzar las numerosas partículas que hay en una suspensión, se dispersa en todas las direcciones posibles. Si se separa una dirección, los haces de luz dispersados por distintas partículas interfieren entre sí y se obtiene una intensidad de dispersión determinada. Como consecuencia del movimiento browniano las posiciones relativas de las partículas varían constantemente entre sí, cosa que también provoca cambios en las condiciones de interferencia y en la propia intensidad de dispersión. Si las partículas se mueven rápidamente (partículas pequeñas), también se acelera la variación de la intensidad de dispersión. Por el contrario, las partículas lentas (grandes) llevan a variaciones más lentas. Por norma general, en la dispersión de luz dinámica la suspensión de la muestra permanece en reposo. El término "dinámica" no se refiere al movimiento de la muestra como un conjunto, sino a la "vibración" de las partículas que la componen.

2.2.6.2 Absorción de radiación UV. La espectroscopía UV-Vis está basada en el proceso de absorción de la radiación ultravioleta-visible (radiación con longitud de onda comprendida entre los 160 y 780 nm) por una molécula como se muestra en la figura 9. La absorción de esta radiación causa la promoción de un electrón a un estado excitado. Los electrones que se excitan al absorber radiación de esta frecuencia son los electrones de enlace de las moléculas, por lo que los picos de absorción se pueden correlacionar con los distintos tipos de enlace presentes en el compuesto. (Alicante, s. f, parr 1).

Figura 9*Gráfica UV-Vis*

Nota: En la figura como ejemplo se representa el espectro de absorción de la acetona donde podemos visualizar las longitudes de onda se registra y cuantifica la absorción, siendo así podemos notar que la longitud máxima a la cual la molécula absorbe la luz ultravioleta es a $\lambda_{\max}=195\pi\rightarrow\pi^*$ y $\lambda_{\max}=274n\rightarrow\pi^*$.

Tomada de <https://www.ehu.es/documents/1468013/5943652/Espectroscopia+1>.

Siendo así, la espectroscopía UV-Vis se utiliza para identificar los grupos funcionales de las moléculas y determinar el contenido y fuerza de una sustancia.

2.2.6.3 Absorción infrarroja. Técnica espectroscópica que mide la absorción o la transmisión de la luz en las moléculas, la radiación aplicada es energéticamente insuficiente para generar un salto electrónico, pero estas moléculas asociadas con el estado basal energético generan una transición vibracional y rotacional, representando dentro del espectro un pico representativo a dicha vibración, con el fin de ver los diferentes tipos enlaces y estructura de las partículas.

Las unidades de longitudes de onda del infrarrojo son en cm⁻¹ ya que no son muy energéticas las ondas, por lo tanto, se habla de número de onda.

Tabla 3

Principales características respecto a las técnicas UV/Vis e IR

Técnica	Intervalo	λ	ΔE(Kcal)	Efecto
UV/vis.	UV Visible	200-400 nm	280-82	Cambios en los orbitales electrónicos (O.M.)
		400-800 nm	82-36	
IR	IR	0,8-300 μ m	36-1	Vibración en los enlaces

Nota: Tomada de <https://www.ehu.es/documents/1468013/5943652/Espectroscopia+1>.

3. Métodos y Resultados

Con el fin de lograr los objetivos planteados, inicialmente se generó una caracterización de las nanopartículas comerciales de óxido de zinc (ZnO) y óxido de titanio (TiO₂) que posteriormente se usaron para formular los diferentes tipos de lodos. Teniendo como base principalmente 2 concentraciones diferentes de cada nanopartícula, enseguida se realizaron las respectivas pruebas reológicas a cada uno de los lodos. Finalmente haciendo una comparación con los resultados alcanzados, se comprobó cuál de las nanopartículas y en que concentración presento una mejor eficiencia y rendimiento en el fluido de perforación.

3.1 Caracterización de nanopartículas comerciales de ZnO y TiO₂

La caracterización de las nanopartículas se llevó a cabo en los laboratorios del Parque Tecnológico Guatiguará (UIS) con la ayuda del grupo de investigación LEAM, quienes proporcionaron todo el material para la realización de las pruebas, se buscaba encontrar, el tamaño, absorción de la luz, estructura molecular, tipos de enlaces y rendimiento de las nanopartículas, basándonos en las siguientes pruebas:

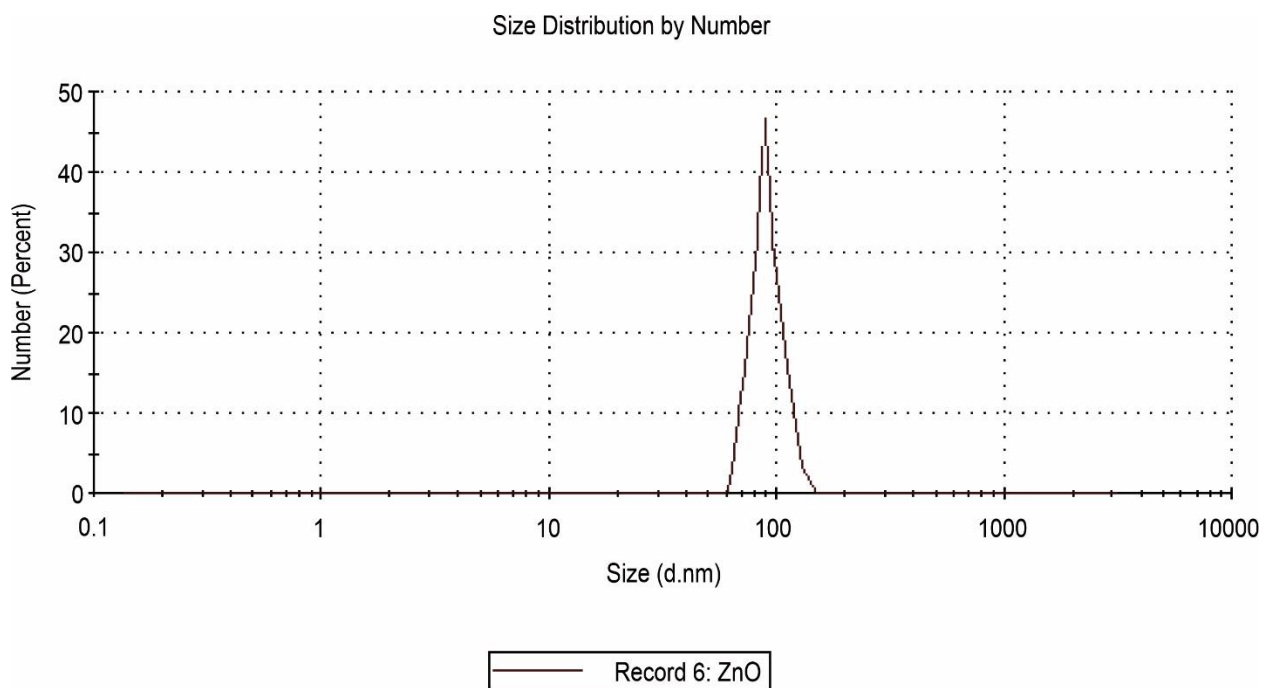
3.1.1 *Dispersión dinámica de luz (DLS) nanopartículas ZnO Y TiO₂*

3.1.1.1 Óxido de Zinc comercial (ZnO). Obteniendo un acercamiento al tamaño real de la nanopartículas mediante la técnica dispersión dinámica de luz (DLS) y teniendo en cuenta que se realiza examinando las interacciones partícula-medio acuoso, en la figura 10 podemos visualizar el tamaño de la nanopartícula respecto al porcentaje de la sustancia, es decir que en el 20% de la sustancia habitan nanopartículas comerciales de ZnO con un tamaño aproximado de 80 nm y que en un 45% de la sustancia encontramos un tamaño de nanopartículas comerciales de ZnO

aproximado de 90 nm. Al obtener estos resultados observamos que las nanopartículas se encontraban al límite de su tamaño nano es decir en un rango entre 1 a 100nm, sin embargo, se aplicó una prueba de separación para tener tamaños más pequeños.

Figura 10

Dispersión dinámica de luz (DLS) nanopartículas de ZnO sin aplicación de procesos de separación.



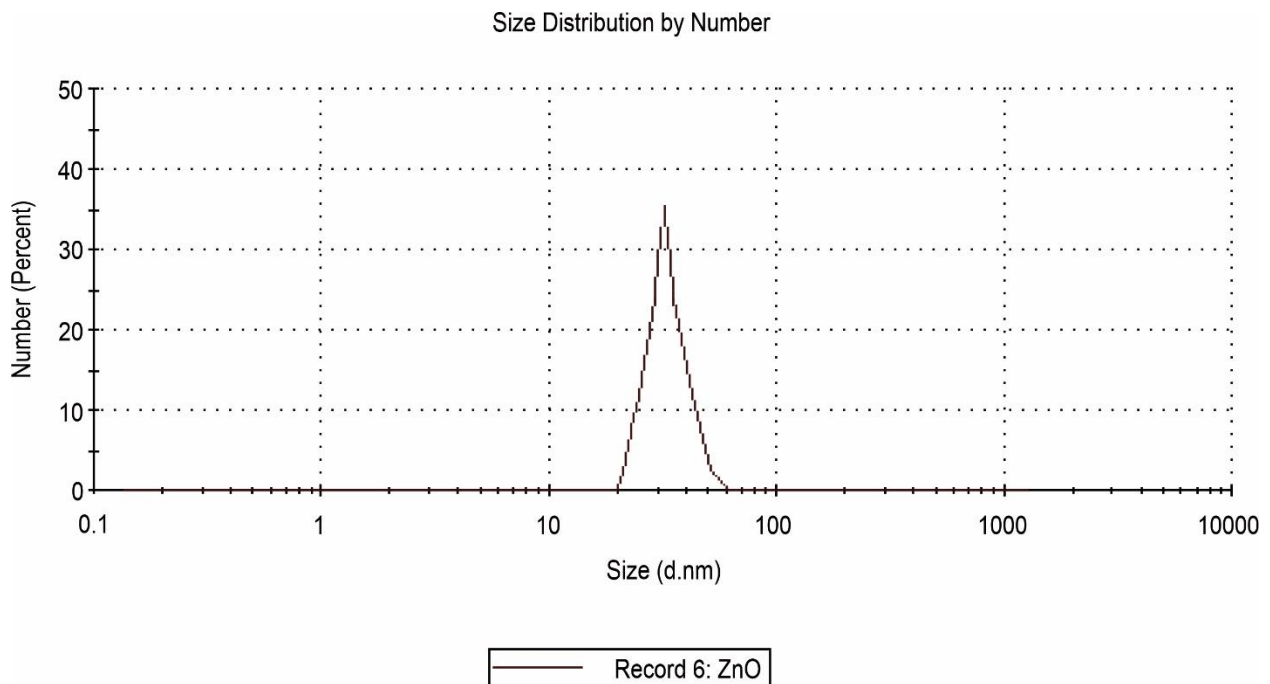
Nota: La figura muestra dispersión dinámica de luz (DLS) nanopartículas de ZnO sin aplicación de procesos de separación, con un tamaño de NPs entre los 60-115 nm. Tomada del Equipo DLS, Parque Tecnológico de Guatiguará (UIS).

Teniendo en cuenta que las nanopartículas son termodinámicamente inestables y como consecuencia del movimiento browniano las posiciones relativas de las partículas varían constantemente entre sí, tienden a formar aglomeraciones al encontrarse mucho tiempo en reposo.

Así que se recurrimos aplicar una técnica de dispersión (ultrasonido), este proceso emite pulsos con ondas electromagnéticas que generan que las nanopartículas se activen generando una ruptura en dicha aglomeración, teniendo las NPs más separadas con tamaños ideales. De esta manera en la figura 11 podemos observar que su tamaño cambio drásticamente, que en un 20% de la sustancia habitan nanopartículas comerciales de ZnO con un tamaño aproximado de 19 nm y en un 35% de la sustancia encontramos un tamaño de nanopartículas comerciales de ZnO aproximado de 25 nm.

Figura 11

Dispersión dinámica de luz (DLS) nanopartículas de ZnO con aplicación de ultrasonido.

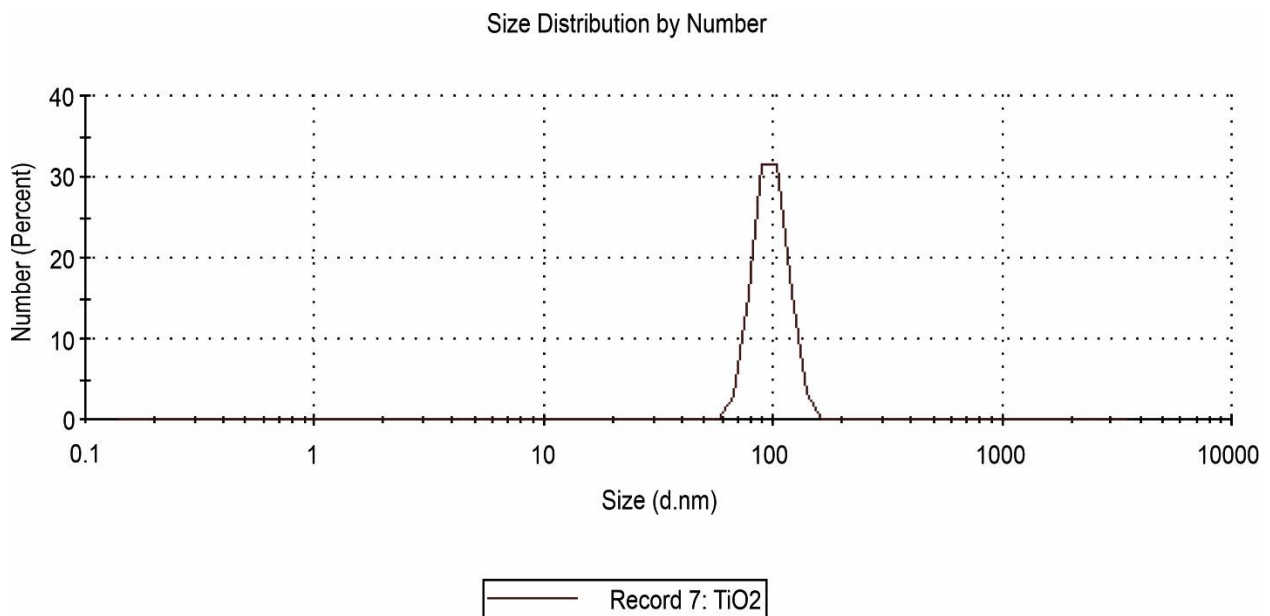


Nota: La figura muestra la dispersión dinámica de luz (DLS) nanopartículas de ZnO al aplicar ultrasonido durante 15 min, generando un tamaño de NPs deseado entre los 20-60 nm. Tomada del Equipo DLS, Parque Tecnológico de Guatiguará (UIS).

3.1.1.2 Óxido de Titanio comercial (TiO₂). Para determinar el tamaño de las nanopartículas de óxido de titanio comercial mediante DLS, se realizó el mismo proceso que con las nanopartículas de óxido de zinc, ya que estas también se encontraban en un estado de reposo y no se les había realizado ningún proceso de separación; en la figura 12, se puede observar el tamaño inicial de las nanopartículas, indicando que en un 20% de la sustancia habitan NPs de TiO₂ con un tamaño aproximado de 80 nm y que en un 30% de la sustancia encontramos un tamaño de nanopartículas comerciales de ZnO aproximado de 98nm, la mayoría de NPs se encontraban en el rango establecido de 1-100 nm.

Figura 12

Dispersión dinámica de luz (DLS) nanopartículas de TiO₂ sin aplicación de procesos de separación

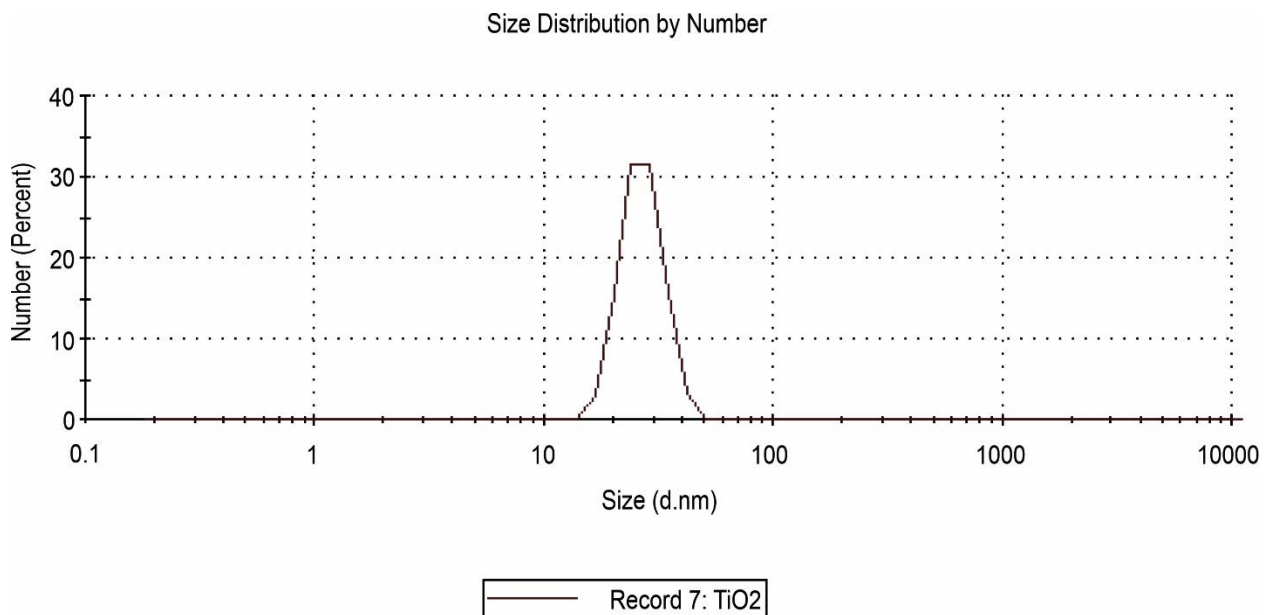


Nota: La figura muestra la dispersión dinámica de luz (DLS) de las NPs de ZnO sin aplicación de procesos de separación, con un tamaño de NPs entre los 59-118 nm. Tomada del Equipo DLS, Parque Tecnológico de Guatiguará (UIS).

Se aplicó la misma técnica de dispersión (ultrasonido) para generar una ruptura y evitar la aglomeración de las nanopartículas obteniendo así en la figura 13 los siguientes resultados, en un 20% de la sustancia habitan NPs de TiO₂ con un tamaño aproximado de 21 nm y alrededor de un 30% de la sustancia se encontró un tamaño de NPs de TiO₂ aproximado de 25 nm; obteniendo un tamaño de NPs deseado que oscila entre los 15-60 nm.

Figura 13

Dispersión dinámica de luz (DLS) nanopartículas de TiO₂ con aplicación de ultrasonido.



Nota: La figura muestra la dispersión dinámica de luz (DLS) de NPs de TiO₂ al aplicar ultrasonido durante 15 min, generando un tamaño de NPs deseado entre los 15-50 nm. Tomada del Equipo DLS, Parque Tecnológico de Guatiguará (UIS).

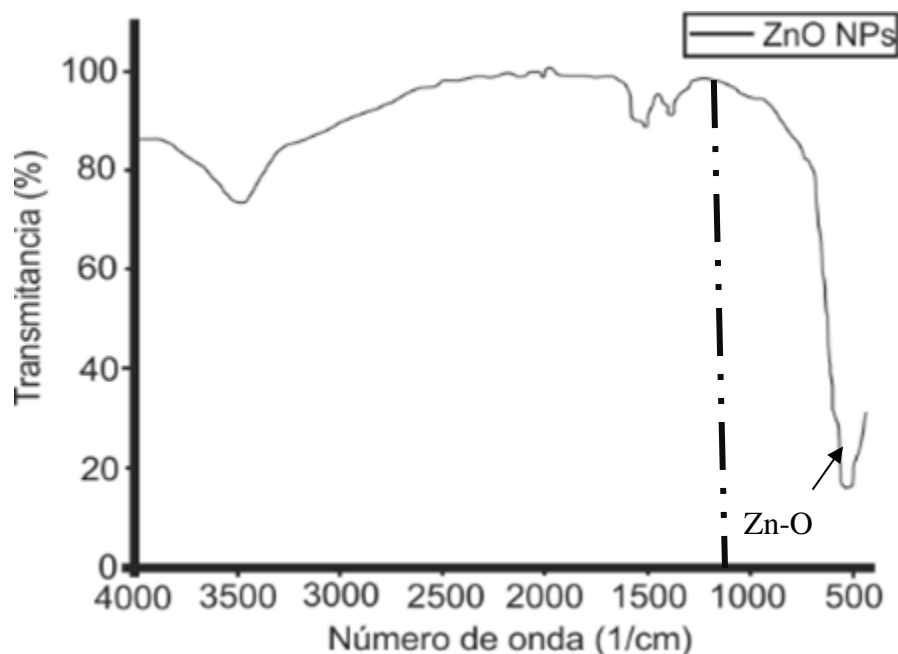
3.1.2 Absorción Infrarroja nanopartículas comerciales de ZnO Y TiO₂

3.1.2.1 Óxido de Zinc comercial (ZnO). El enlace químico de las NPs-ZnO comerciales se examinó mediante espectroscopia infrarroja. En la figura 14 podemos notar las bandas características exhibidos por el espectro IR de las nanopartículas de ZnO.

Se observó que la formación de enlaces metálicos comienza a partir aproximadamente desde 1250cm⁻¹ hasta 400cm⁻¹. Siendo así, de esta manera visualizamos que debido a las vibraciones de las nanopartículas la banda de interés donde se encuentran formados los enlaces Zn-O se encuentra entre 400 cm⁻¹ a 600cm⁻¹. Los picos restantes hacen representación a otros grupos funcionales presentes en las nanopartículas.

Figura 14

Absorción Infrarroja de NPs comerciales de ZnO

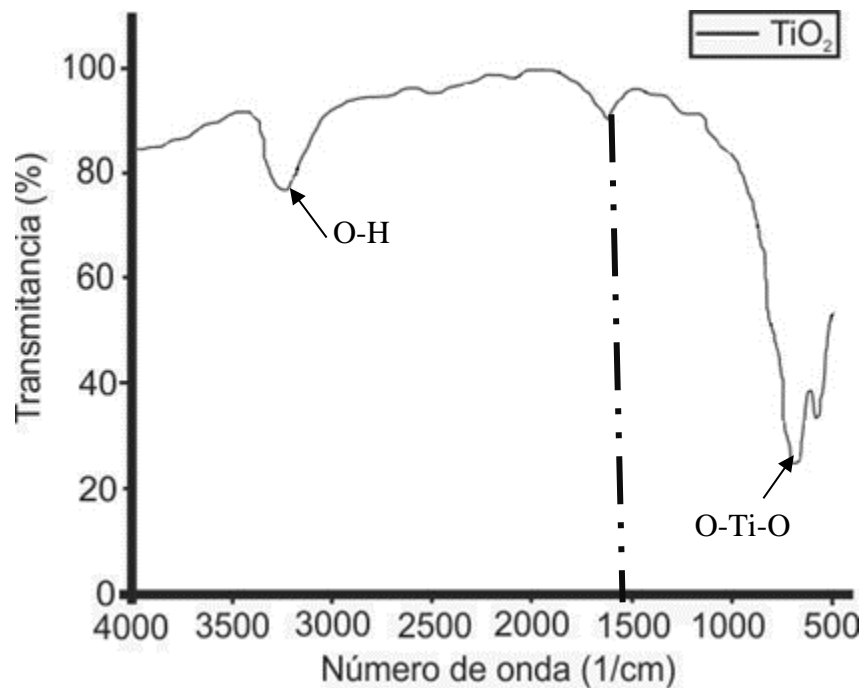


Nota: Tomada laboratorios de Parque Tecnológico de Guatiguará (UIS).

3.1.2.2 Óxido de Titanio comercial (TiO₂). La información estructural del TiO₂ obtenido, también fue analizado por espectroscopía infrarroja. En la figura 15 observamos que los metales comienzan a formarse desde 400cm⁻¹ a 1500 cm⁻¹, nuestra banda de interés, el enlace O-Ti-O se encuentra en el un pico entre 400 cm⁻¹ y 700 cm⁻¹. En el rango de 3300 cm⁻¹a 3700 cm⁻¹el pico formado se puede referenciar a la absorción de OH, que podría venir de moléculas de agua adsorbidas del medio circundante.

Figura 15

Absorción Infrarroja de NPs comerciales de TiO₂



Nota: Tomada laboratorios de Parque Tecnológico de Guatiguará (UIS).

De acuerdo en los estudios científicos publicados en the NIST WebBook (National Institute of Standards and Technology, 2018) y en la revista («SciELO citation index: Mejorando la visibilidad

de las revistas scielo», 2015), se comparó y se concluyó que los resultados obtenidos de la absorción infrarroja (IR) para las nanopartículas comerciales de ZnO como TiO₂ tenían veracidad.

3.2 Formulación y formatos de pruebas preliminares

Para evaluar el comportamiento de los aditivos sobre el lodo de perforación, inicialmente se realizó una comparación entre las NPs de ZnO y TiO₂ con un lodo base (agua + bentonita), y luego se realizó una comparación entre los efectos en el lodo base de las NPs de ZnO Y TiO₂, y el aditivo comercial PAC-L. Para desarrollar esta investigación se hizo la formulación de 8 lodos como se muestra en la tabla 4 para evaluar y comparar los 3 aditivos, sobre un lodo convencional base agua + bentonita.

Para llevar a cabo la realización de las pruebas se tomó como referencia 1 bbl equivalente que corresponde a 350 ml de fluido.

Tabla 4

Formulación de fluidos para pruebas preliminares

Tipo de lodo	Bentonita (lb/bbl)	PAC-L	NPs (ZnO)	NPs (TiO ₂)
Agua + bentonita	25	-	-	-
Agua + bentonita + PAC-L	25	0,15	-	-
Agua + bentonita + PAC-L	25	0,35	-	-
Agua + bentonita + NPs (ZnO)	25	-	0,15	-
Agua + bentonita + NPs (ZnO)	25	-	0,35	-
Agua + bentonita + NPs (TiO ₂)	25	-	-	0,15
Agua + bentonita + NPs (TiO ₂)	25	-	-	0,35
Agua + bentonita + NPs (TiO ₂) + NPs (ZnO)	25	-	0,35	0,35

Nota: La tabla muestra la formulación propuesta para llevar a cabo las pruebas preliminares, las unidades que se utilizaron para medir la cantidad de aditivo están en (lb/bbl).

3.2.1 Nanofluidos de ZnO Y TiO₂

Para evaluar el efecto que generan las NPs de óxido de zinc (ZnO) y el óxido de titanio (TiO₂) sobre un lodo de perforación convencional base agua + bentonita en el mejoramiento positivo de las propiedades reológicas y el filtrado, se propuso un fluido base agua compuesto únicamente de bentonita, con una cantidad suficiente para añadir viscosidad significativamente. Luego de tener el lodo base se planteó una formulación de 6 diferentes tipos de lodos usando diferentes concentraciones de nanopartículas de ZnO, TiO₂, en la tabla 5 se muestran las formulaciones propuestas.

Tabla 5

Formulación de fluidos para pruebas preliminares de ZnO y TiO₂

Tipo de lodo	Bentonita (lb/bbl)	NPs (ZnO)	NPs (TiO ₂)
Agua + bentonita	25	-	-
Agua + bentonita + NPs (ZnO)	25	0,15	-
Agua + bentonita + NPs (ZnO)	25	0,35	-
Agua + bentonita + NPs (TiO ₂)	25	-	0,15
Agua + bentonita + NPs (TiO ₂)	25	-	0,35
Agua + bentonita + NPs (TiO ₂) + NPs (ZnO)	25	0,35	0,35

Nota: La tabla muestra la formulación propuesta para llevar a cabo las pruebas preliminares, las unidades que se utilizaron para medir la cantidad de aditivo están en (lb/bbl) para la bentonita y en (g) para las NPs.

3.2.1.1 Reología y densidad nanofluidos de NPs ZnO y TiO₂. El formato para registrar los datos obtenidos en las pruebas preliminares de reología y densidad de las NPs de ZnO y TiO₂, se puede observar en la tabla 6.

Tabla 6

Formato registro de reología y densidad nanofluidos de ZnO y TiO₂

Reología NPs ZnO y TiO ₂								
Fluido	Θ600	Θ300	Vp (cP)	Va (cP)	Yp (lb/100 ft ²)	Gel (lb/100 ft ²)		Densidad (lpg)
						10 s	10 min	
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								

Nota: La tabla muestra el formato utilizado para tomar los datos de las pruebas de reología y densidad de los nanofluidos de ZnO y TiO₂.

3.2.1.2 Medición de pH nanofluidos de NPs ZnO y TiO₂. De igual manera, se realizaron pruebas de medición del pH para los lodos con las NPs, debido a que la acidez de las nanopartículas de ZnO y TiO₂, según estudios científicos Aquino et al, (2021) al ser agregadas estas NPs a un fluido de perforación base agua-bentonita se deriva una caída de pH en dicho fluido. El formato para el registro de la medición de pH en los nanofluidos se muestra en la tabla 7.

Tabla 7

Formato para registro del pH en los nanofluidos

Tipo de lodo	Bentonita (lb/bbl)	NPs (ZnO)	NPs (TiO ₂)	pH
Agua + bentonita	25	-	-	
Agua + bentonita + NPs (ZnO)	25	0,15	-	
Agua + bentonita + NPs (ZnO)	25	0,35	-	
Agua + bentonita + NPs (TiO ₂)	25	-	0,15	
Agua + bentonita + NPs (TiO ₂)	25	-	0,35	
Agua + bentonita + NPs (TiO ₂) + NPs (ZnO)	25	0,35	0,35	

Nota: La tabla muestra el formato propuesto para tomar los datos de la prueba de pH para los nanofluidos con NPs de ZnO y TiO₂.

3.2.1.3 Pruebas de filtrado API nanofluidos de NPs ZnO y TiO₂. Para la realización de las pruebas de filtrado API y análisis de la retorta, se utilizó el formato de registro mostrado en la tabla 8, con el fin de establecer si las NPs al mejorar las propiedades reológicas no tendrían consecuencias en otras propiedades del fluido.

Tabla 8

Formato para registrar el filtrado y análisis de retorta nanofluidos de ZnO y TiO₂

Fluido de perforación	Filtrado API [ml]	Análisis retorta		
	30 min	Consistencia	Plasticidad	Espesor (In)
1				
2				
3				
4				
5				
6				

Nota: La tabla muestra el formato utilizado para tomar los datos de filtrado y análisis para los nanofluidos de ZnO y TiO₂.

3.2.2 Comparación nanofluidos de ZnO y TiO₂ y fluido de PAC-L

Siendo el PAC-L uno de los aditivos más usados en la industria para el control de filtrado, se propuso hacer una comparación entre las NPs de ZnO Y TiO₂ y el PAC-L, con el objetivo de analizar qué tanto favorece cada aditivo al filtrado y a la reología, utilizando las mismas concentraciones. En la tabla 9, se muestra la formulación de los fluidos de perforación.

Tabla 9

Formato de formulación para la comparación de nanofluidos con el PAC-L

Tipo de lodo	Bentonita (lb/bbl)	PAC-L (lb/bbl)	NPs (ZnO)	NPs (TiO ₂)
Agua + bentonita	25	-	-	-
Agua + bentonita + PAC-L	25	0,15 0,35	-	-
Agua + bentonita + NPs (ZnO)	25	-	0,15 0,35	-
Agua + bentonita + NPs (TiO ₂)	25	-	-	0,15 0,35
Agua + bentonita + NPs (TiO ₂) + NPs (ZnO)	25	-	0,35	0,35

Nota: La tabla muestra la formulación de lodos propuesto para realizar la comparación de los aditivos nanoparticulados de ZnO y TiO₂ con el PAC-L.

3.2.1.1 Reología y pH nanofluidos ZnO y TiO₂ y fluido PAC-L. En la tabla 10 se muestra el formato para la toma de datos de las pruebas de reología y pH, para la comparación de los nanofluidos de ZnO y TiO₂ con el PAC-L.

Tabla 10

Formato registro de comparación reología y pH nanofluidos ZnO y TiO₂ y fluido PAC-L

Reología y pH comparación nanofluidos ZnO y TiO ₂ con fluido PAC.L									
Fluido	Θ600	Θ300	Vp (cP)	Va (cP)	Yp (lb/100 ft ²)	Gel (lb/100 ft ²)		Densidad (lpg)	pH
						10 s	10 min		
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									

Nota: La tabla muestra el formato utilizado para tomar los datos de las pruebas de reología y pH para la comparación de nanofluidos de ZnO y TiO₂ con fluido de PAC-L.

3.2.1.3 Pruebas de comparación filtrado API nanofluidos ZnO y TiO₂ y fluido PAC-

L. El formato para la toma de resultados y análisis de la retorta se muestra en la tabla 11.

Tabla 11

Formato comparación para registrar el filtrado y análisis de retorta nanofluidos de ZnO y TiO₂ fluido PAC-L

Fluido de perforación	Filtrado API [ml]	Análisis retorta		
	30 min	Consistencia	Plasticidad	Espesor (In)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

Nota: La tabla muestra el formato propuesto para tomar los datos de filtrado y análisis para la comparación de los nanofluidos ZnO y TiO₂ con el fluido convencional PAC-L.

3.3 Desarrollo de las pruebas de laboratorio

Se estableció la realización de pruebas de laboratorio, con el fin de comprobar el efecto de las nanopartículas de óxido de titanio y óxido de zinc sobre las propiedades reológicas y de filtrado de un fluido de perforación base agua-bentonita. Se siguió el procedimiento de la norma API-RP 13B, se utilizaron la balanza de medición de densidad (Figura 16), el reómetro FANN 35A, cinta indicadora de pH (Figura 18) y la filtroprensa API de baja presión (Figura 19) disponibles en el laboratorio de lodos de la Escuela de Ingeniería de Petróleos (UIS). La realización de las pruebas se llevó a cabo a temperatura ambiente de 25 °C.

Las NPs utilizadas para la realización de estas pruebas fueron comerciales y proporcionadas por el profesor Enrique Mejía director del grupo de investigación y laboratorio LEAM de la sede UIS Parque Tecnológico Guatiguará.

La bentonita utilizada para la preparación de los fluidos es una bentonita nacional, proporcionada por el laboratorio de lodos de la Escuela de Ingeniería de Petróleos (UIS).

Figura 16

Balanza de medición de densidad para lodos



Nota: Foto tomada del laboratorio de lodos, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Universidad Industrial de Santander (UIS).

Figura 17

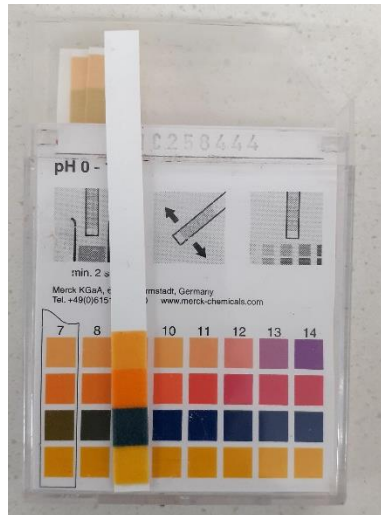
Imagen del reómetro de FANN 35 A



Nota: Foto tomada del laboratorio de lodos, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Universidad Industrial de Santander (UIS).

Figura 18

Imagen de la cinta indicadora de pH



Nota: Foto tomada del laboratorio de lodos, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Universidad Industrial de Santander (UIS).

Figura 19

Imagen de la filtroprensa



Nota: Foto tomada del laboratorio de lodos, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Universidad Industrial de Santander (UIS).

3.3.1 Pruebas nanofluidos de ZnO Y TiO₂

Para la realización de las pruebas como se observa la tabla 12 se formuló un lodo base agua convencional con bentonita a una concentración de 25 lb/bbl para todos los casos, y se utilizaron las mismas concentraciones para las NPs de ZnO y TiO₂ de 0.05 y 0.1 % en peso.

Tabla 12

Formulación de fluidos pruebas nanofluidos de ZnO y TiO₂

Fluido de perforación	Tipo de lodo	Bentonita (lb/bbl)	NPs (ZnO)	NPs (TiO ₂)
1	Agua + bentonita	25	-	-
2	Agua + bentonita + NPs (ZnO)	25	0,15	-
3	Agua + bentonita + NPs (ZnO)	25	0,35	-
4	Agua + bentonita + NPs (TiO ₂)	25	-	0,15
5	Agua + bentonita + NPs (TiO ₂)	25	-	0,35
6	Agua + bentonita + NPs (TiO ₂) + NPs (ZnO)	25	0,35	0,35

Nota: La tabla muestra la formulación que se realizó para llevar a cabo las pruebas para los nanofluidos y las unidades que se utilizaron para medir la cantidad de aditivo están dadas en (lb/bbl).

3.3.1.1 Prueba de reología y densidad nanofluidos de NPs ZnO y TiO₂. En la tabla 13 se encuentran los resultados obtenidos de las pruebas reológicas y de densidad para los nanofluidos de ZnO y TiO₂, junto con los resultados del lodo base.

Tabla 13*Resultados de reología y densidad nanofluidos de ZnO y TiO₂*

Reología y densidad nanofluidos de ZnO y TiO ₂								
Fluido de perforación	Θ600	Θ300	Vp (cP)	Va (cP)	Yp (lb/100 ft ²)	Gel (lb/100 ft ²)		Densidad (lpg)
						10 s	10 min	
1	19.50	11.00	8.50	9.75	2.50	1.50	7.5	8.60
2	25.00	17.00	8.00	12.50	8.00	2.00	8.5	8.65
3	29.00	21.50	7.50	14.50	14.00	2.75	10.00	8.70
4	27.50	17.50	10.00	13.75	7.50	2.20	9.00	8.70
5	31.00	22.00	9.00	15.50	13.00	3.00	11.50	8.65
6	28.00	19.40	8.60	14.00	10.80	2.00	9.5	8.65

Nota: La tabla muestra los datos obtenidos al realizar las pruebas de reología y densidad de los nanofluidos de ZnO y TiO₂ y el lodo base.

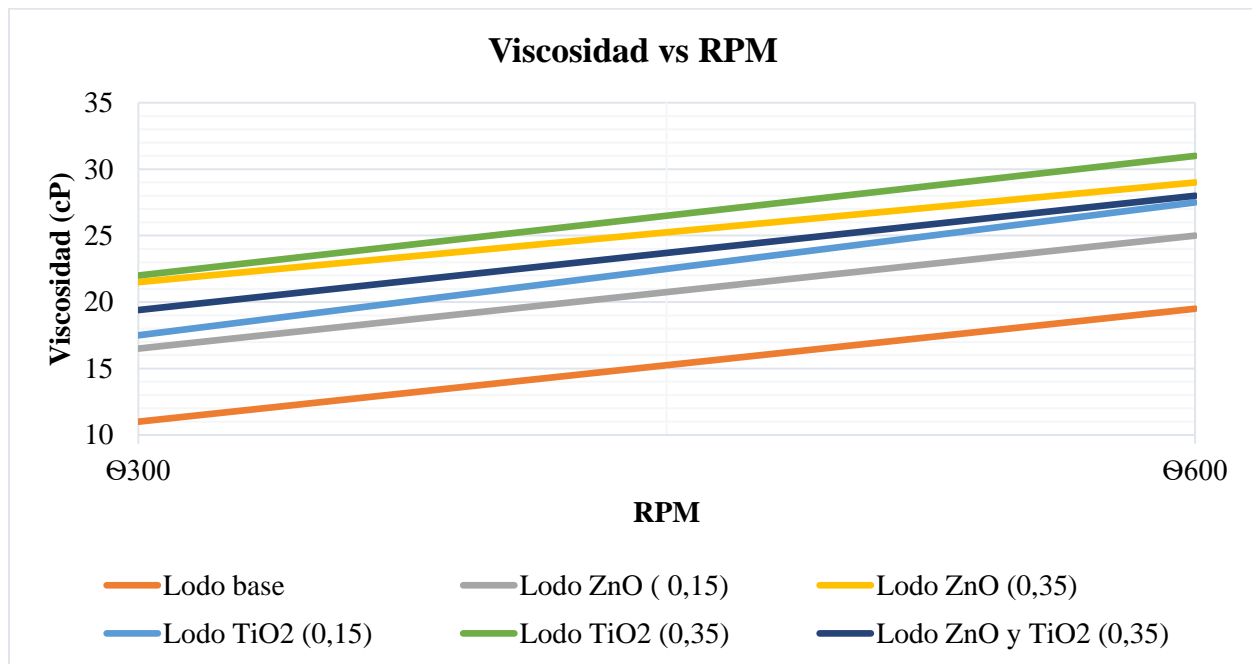
3.3.1.1.1 Densidad nanofluidos ZnO y TiO₂. la densidad o gravedad específica de las 6 muestras de lodo como se muestra en la tabla 13, no cambiaron significativamente, indicando que el uso de las nanopartículas no hace que la densidad del nanofluido cambie drásticamente sino ligeramente. La densidad también varía respecto a la presión hidrostática del pozo, y las pruebas se realizaron a presión y temperatura ambiente.

3.3.1.1.2 Viscosidad dinámica nanofluidos ZnO y TiO₂. En la figura 20 se puede apreciar que hay diferencia de viscosidades en las diferentes muestras de lodo. Todas las muestras de nanofluidos presentaron un aumento en su viscosidad con respecto al lodo base, lo cual es un resultado positivo que permite comprobar que las NPs de ZnO y TiO₂, incrementan dichas propiedades del fluido de perforación. Las muestras con mayores valores de viscosidad fueron las NPs TiO₂ a (0,1 % en peso) y NPs ZnO a (0,1 % en peso). Las cargas negativas remanentes en la superficie de la bentonita con interacción de los grupos oxigenados de las nanopartículas de ZnO

y TiO₂ comprueban un aumento en la viscosidad aparente, por lo que esta interacción convierte la superficie de la bentonita en una red estructural complicada que aumenta la fricción entre las diferentes capas del sistema e incrementa la viscosidad entre las fases del fluido.

Figura 20

Representación de la viscosidad vs RPM (Θ 300 y Θ 600)



Nota: La gráfica muestra el comportamiento de la viscosidad en cada una de las formulaciones de los lodos propuestas, donde se muestra que las mejores en este caso NPs de TiO₂ 0.1 % en peso mejoran en un 80 % la viscosidad del lodo base. y ZnO a 0.1 % en peso, mejoran en un 75 % la viscosidad del lodo base.

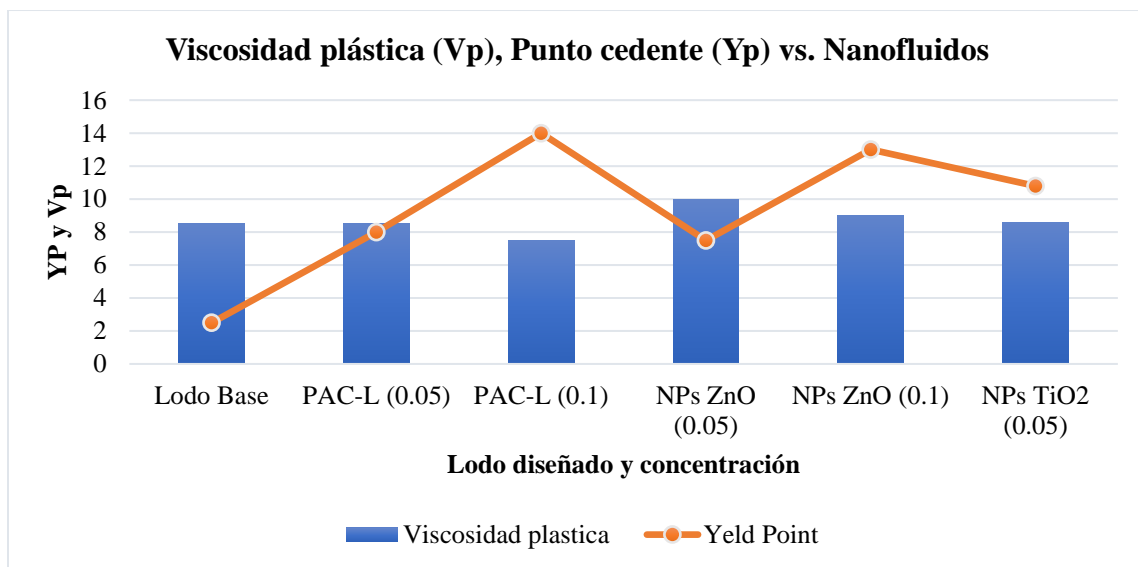
Abascal Estela C, (2019) menciona que la viscosidad de los nanofluidos puede ser afectada por parámetros como la viscosidad del fluido base, la concentración en volumen de las nanopartículas en el fluido, el tamaño, su forma y la temperatura.

3.3.1.1.3 Viscosidad plástica (Vp) y punto cedente (Yp) de los nanofluidos de ZnO y TiO₂.

La medición del punto cedente se realizó en el laboratorio, los resultados se representan en la figura 21. Los nanofluidos de ZnO (0.05 % en peso) y TiO₂(0,1 % en peso) en su medición presentan una reducción (mejora) mucho mayor y un punto cedente más alto, comparados con los demás lodos, con una viscosidad plástica de 7.5 y 9 (cP), respectivamente y un punto cedente de 14 y 13 (lb/100*ft²), respectivamente; con lo cual se puede indicar que, con un punto cedente alto, el nanofluido se está comportando como un fluido no newtoniano, es decir, se transportan mejor los recortes del pozo. Una viscosidad plástica baja indica que el lodo es capaz de perforar rápidamente debido a la baja viscosidad del lodo que sale en la broca, en conclusión, estos lodos tienen mayor capacidad de transportar recortes a superficie, lo cual es muy positivo porque favorece a la estabilidad del pozo evitando que los recortes no se depositen en el fondo del pozo obstruyendo el movimiento y perforación de la broca.

Figura 21

Gráfica de Viscosidad plástica y Punto cedente para los nanofluidos



Nota: La gráfica describe el comportamiento de la viscosidad plástica y el punto cedente para cada uno de los nanofluidos, indicando que las NPs de TiO₂ y ZnO a 0.1 % en peso, tienen una mayor viscosidad plástica y punto cedente al lodo base.

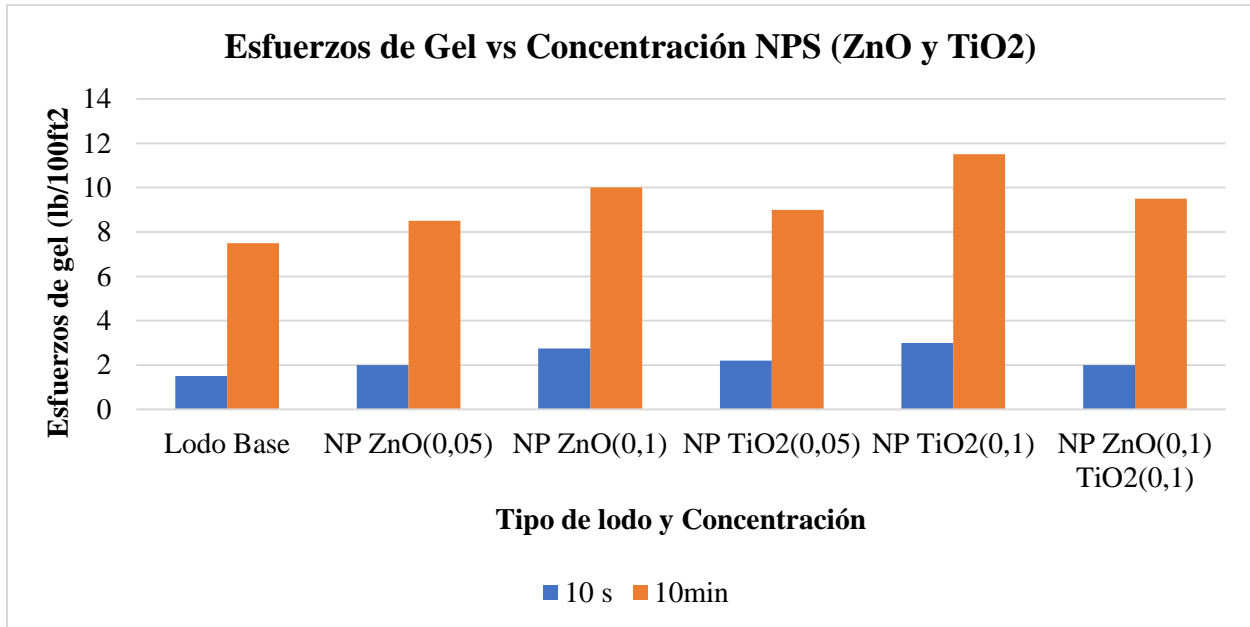
3.3.1.1.4 Esfuerzos de gel nanofluidos ZnO y TiO₂. Según Cuadros Moreno et al., (2014), la dispersión de nanopartículas de ZnO y TiO₂ en el fluido base ayuda a generar una red de geles cuando el fluido de perforación se encuentra estático. En la Figura 22 se puede ver un incremento en los esfuerzos de gel a 10 segundos y 10 minutos con la adición de las NPs al lodo base, siendo más notorio el esfuerzo de gel a 10 minutos con respecto al esfuerzo medido a 10 segundos. Se puede ver que los nanofluidos de TiO₂ y ZnO a 0.1 % en peso, presentan un esfuerzo de gel a 10s de 2.75 y 3, respectivamente y a 10 min de 10 y 11.5, respectivamente.

Estos resultados, permiten concluir que los esfuerzos de gel de los fluidos con nanopartículas de ZnO y TiO₂ son buenos y favorables, ya que no se generan geles progresivos (amplio rango entre el gel inicial y el de 10 min), tampoco se generó un high-flat-gels (aumento excesivo de los esfuerzos de gel). También, se pudo notar un aumento dentro de los valores deseados y estables para poder ejecutar la función de suspensión de recortes y materiales densificantes.

Basados en Amado y Rueda, (2018) la formación de geles (gelificación) generada por la presencia de nanoestructuras de ZnO y TiO₂ con grupos funcionales polares, como el ZnO y TiO₂, se debe a interacciones débiles tipo dipolo-dipolo, Van der Waals e incluso puentes de hidrógeno entre dichos sistemas y la estructura cristalina de la bentonita. Estas interacciones pueden ser neutralizadas por un esfuerzo mecánico restableciendo la movilidad (fluidez) del sistema.

Figura 22

Esfuerzos de gel vs concentración de Nanopartículas de ZnO y TiO₂



Nota: La grafica muestra el comportamiento del esfuerzo de gel a 10 s y 10 min, donde se puede ver que los nanofluidos de TiO₂ y ZnO a 0.1 % en peso, presentan un esfuerzo de gel a 10s de 2.75 y 3, respectivamente y a 10 min de 10 y 11.5, respectivamente.

3.3.1.1.5 Medición de pH nanofluidos de NPs ZnO y TiO₂. Se realizó la medición mediante una cinta indicadora de pH para la obtención del pH en cada muestra de los fluidos, ya que es un indicador principal que indica el grado de acidez y alcalinidad del fluido, los resultados obtenidos son presentados en la Tabla 14, donde se puede observar que la adición de las nanopartículas ocasiona un leve aumento en el pH, lo que indica que el fluido no se floculará.

Tabla 14

Medición pH en los nanofluidos de ZnO y TiO₂

Tipo de lodo	Bentonita (lb/bbl)	NPs (ZnO)	NPs (TiO₂)	pH
Agua + bentonita	25	-	-	9.7
Agua + bentonita + NPs (ZnO)	25	0,15	-	9.4
Agua + bentonita + NPs (ZnO)	25	0,35	-	9.1
Agua + bentonita + NPs (TiO ₂)	25	-	0,15	9.2
Agua + bentonita + NPs (TiO ₂)	25	-	0,35	9.0
Agua + bentonita + NPs (TiO ₂) + NPs (ZnO)	25	0,35	0,35	9.4

Nota: La tabla muestra los resultados obtenidos para cada uno de los nanofluidos formulados, donde el cambio de pH no se ve alterado de forma considerable por el uso de NPs.

3.3.1.1.6 Análisis de filtrado API nanofluidos de NPs ZnO y TiO₂. En la tabla 15 se muestran los resultados de la prueba de filtrado a 30 min y análisis de la retorta hecha por los nanofluidos de ZnO y TiO₂.

Tabla 15

Resultados de filtrado y análisis de retorta nanofluidos de ZnO y TiO₂

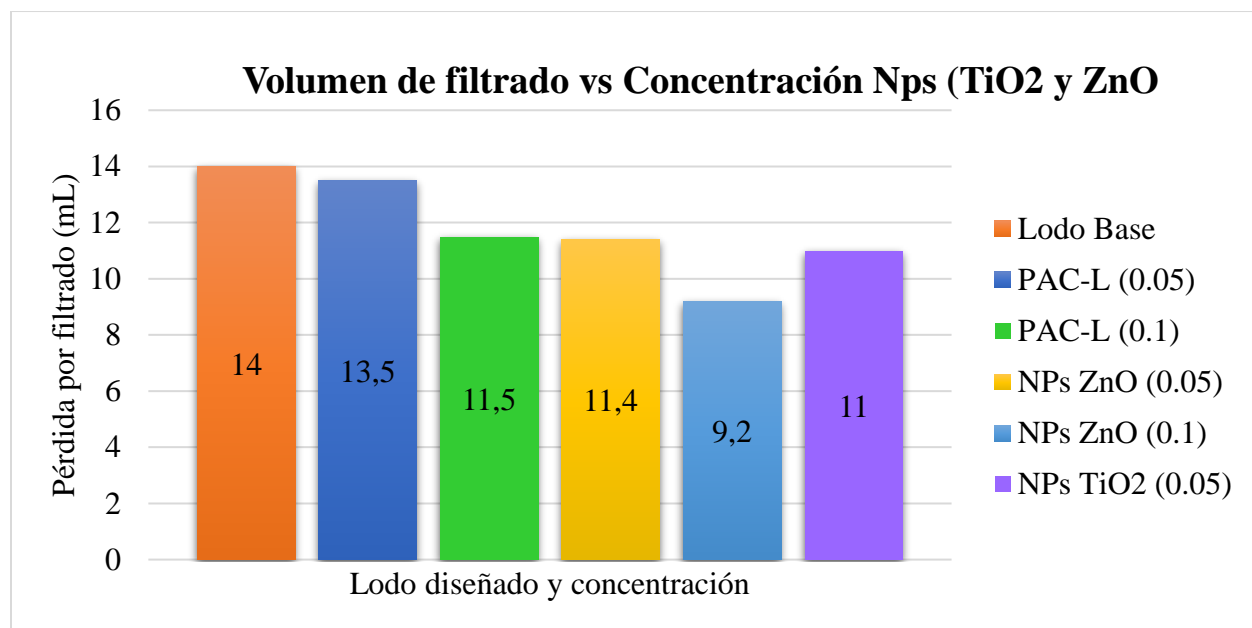
Fluido de perforación	Filtrado API [ml]		Análisis retorta		
	30 min	Consistencia	Plasticidad	Espesor (In)	
1	14.0	SI	Plástica	<1/32	
2	11.4	SI	Plástica	<1/32	
3	9.20	SI	Plástica	<1/32	
4	11.0	SI	Plástica	<1/32	
5	9.80	SI	Plástica	<1/32	
6	12.4	SI	Plástica	<1/32	

Nota: La tabla muestra los resultados obtenidos de la prueba de filtrado API y análisis de la retorta forma, se observa que la filtración ha mejorado y la retorta tiene buenas condiciones.

En la figura 23 se observa una disminución en el volumen de filtrado a medida que se aumenta la concentración de NPs de ZnO y TiO₂ en el fluido. Además, las propiedades de la retorta del fluido de perforación fueron ideales tanto para las dos nanopartículas en las concentraciones usadas, generando consistencia, plasticidad y un espesor menor a 1/32 pulgadas. Con relación a todas las muestras el tipo de lodo con Nanopartículas de ZnO (0.1 % en peso) presentó el mejor desempeño frente a las demás con una reducción de la pérdida de filtrado a 9.20 ml, disminuyendo así en un 34.29 % la pérdida de filtrado en comparación al lodo base.

Figura 23

Volumen de filtrado obtenido en los nanofluidos de ZnO y TiO₂



Nota: La grafica muestra el filtrado de lodo obtenido para cada uno de los nanofluidos, en la cual se observa que el nanofluido de ZnO a 0.1 % en peso, presentó la menor pérdida de fluido en comparación a los demás.

Al adicionar las nanopartículas de ZnO y TiO₂ al lodo, el volumen de filtrado disminuye, ya que por su reducido tamaño les permite adherirse a los demás aditivos del fluido de perforación, formando así un sello efectivo en la retorta o revoque, haciéndolo menos permeable al taponar los nanoporos, y por lo tanto impidiendo que se pierda mayor cantidad de la fase acuosa al someterse a un diferencial de presión.

Según Halim Chuks, (2019) en su investigación resultados de laboratorio han demostrado que, las nanopartículas llegan aun a taponar los poros del papel filtro cuando se utilizan en la prueba en la de filtroprensa.

De acuerdo con Valencia, (2019), la filtración que se genera cuando la broca rompe la formación es mínima y despreciable debido al taponamiento producido por la deformación de la roca. El volumen de filtrado instantáneo que pasa a la formación antes de que el revoque sea formado, se conoce como spurt loss y reducir este, representa uno de los mayores retos para los fluidos drill-in ya que causa daños importantes cerca de la cara del pozo del yacimiento. Por lo tanto, en la cara del pozo las partículas grandes como las pequeñas se depositarán debido a la alta fuerza de arrastre hacía la superficie de la retorta. Después de esta etapa, solo las partículas cada vez más pequeñas son aquellas que se depositarán.

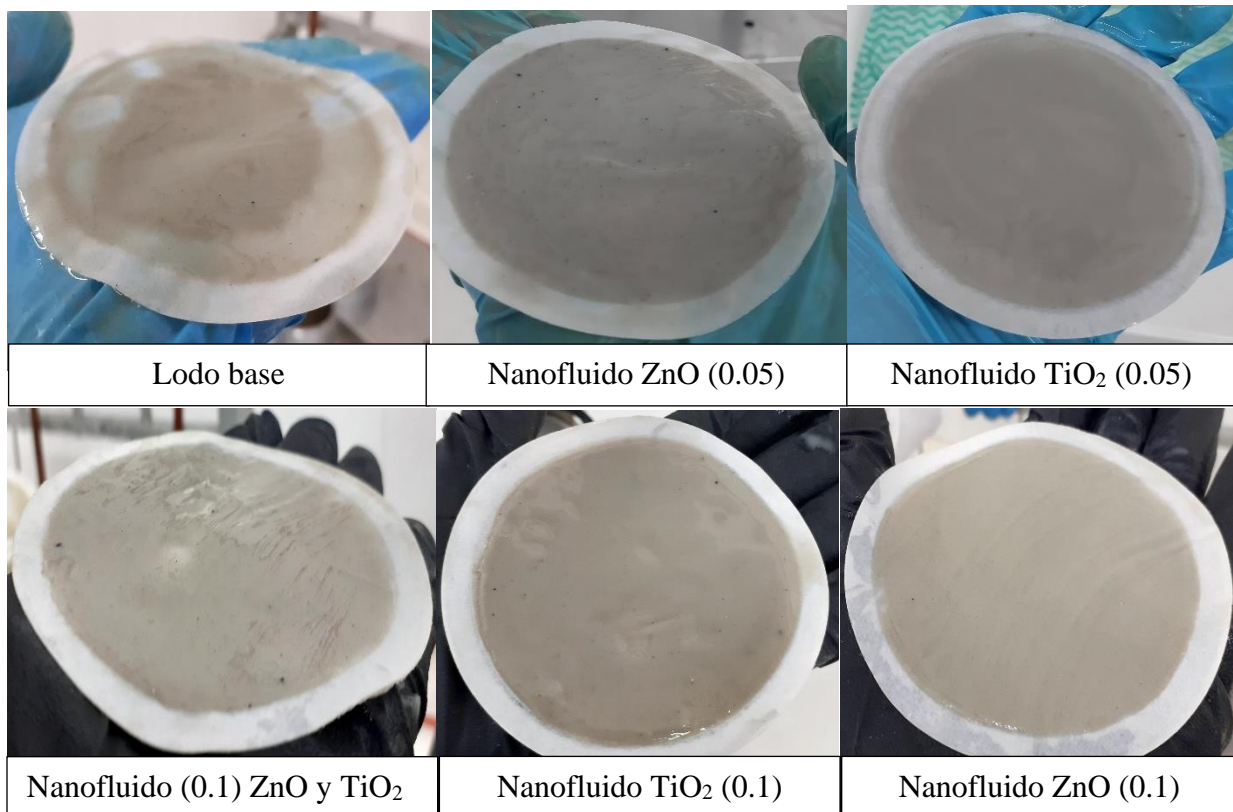
La cantidad de fluido que se pierde es directamente proporcional a la velocidad de formación de la retorta, es decir, decrece paulatinamente hasta que el revoque alcanza un alto grado de impermeabilidad, o hasta que ya no se encuentran en el fluido partículas muy pequeñas para depositarse en los poros de menor tamaño. Todo esto indica que al tener un tamaño pequeño de partículas en el fluido de perforación se espera formar una retorta impermeable.

3.3.1.1.7 Retortas Nanofluidos ZnO y TiO₂. En la figura 24 se muestran las retortas de los lodos diseñados en laboratorio para el lodo base y los lodos con NPs de TiO₂ y ZnO; donde se puede ver el efecto positivo que generan las NPs sobre el lodo base, pasa de ser una retorta poco consistente en el lodo base a una retorta con las mejores condiciones del nanofluido de ZnO a 0.1 % en peso.

El análisis de las retortas se encuentra reflejado en la tabla 15 anteriormente indicada.

Figura 24

Retortas formadas por el lodo base y los nanofluidos de ZnO y TiO₂



Nota: En la figura se pueden observar las retortas formadas por los lodos formulado: lodo base y nanofluidos de ZnO y TiO₂, indicando que la retorta formada por el nanofluido de ZnO (0.1 % en peso) presenta la mejor consistencia. Foto tomada por autores.

3.3.2 Comportamiento de las propiedades del lodo con las nanopartículas comerciales de Óxido de Zinc (ZnO) y óxido de Titanio (TiO₂) y el PAC-L comercial.

Para realizar la comparación se analizó el efecto que se genera sobre el volumen de filtrado, la retorta y las propiedades reológicas del fluido de perforación base, con el aditivo convencional PAC-L (Producido por Halliburton y proporcionado por el laboratorio de lodos de la escuela de Ingeniería de Petróleos UIS), comparado con las nanopartículas comerciales de ZnO y TiO₂ (Proporcionadas por el grupo de investigación LEAM, Parque Tecnológico Guatiguará UIS).

Las pruebas se realizaron bajo las normas API, se utilizó la misma formulación del lodo base agua como en las pruebas anteriores con una composición de bentonita de 25 lb/bbl. Para analizar el efecto que estos aditivos generan, se prepararon 2 lodos adicionales idénticos a los lodos descritos anteriormente, con las mismas concentraciones de las NPs para el aditivo PAC-L. Teniendo en cuenta que en la industria el PAC-L se puede usar a unas concentraciones mayores alrededor de 3 lb/bbl. Un total de 8 lodos a comparar se procedió a realizar las pruebas descritas anteriormente. La formulación de los lodos se encuentra en la tabla 16.

Tabla 16

Formulación de fluidos ya establecidos y el nuevo fluido con el aditivo PAC-L

Fluido de Perforación	Tipo de lodo	Bentonita (lb/bbl)	PAC-L (lb/bbl)	NPs (ZnO)	NPs (TiO ₂)
1	Agua + bentonita	25	-	-	-
2	Agua + bentonita + NPs (ZnO)	25	-	0,15	-
3				0,35	-
4	Agua + bentonita + NPs (TiO ₂)	25	-	-	0,15
5				-	0,35
6	Agua + bentonita + NPs (TiO ₂) + NPs (ZnO)	25	-	0,35	0,35
7	Agua + bentonita + PAC-L	25	0,15	-	-
8			0,35	-	-

Nota: La grafica muestra la formulación de los nanofluidos anteriormente mencionados y los nuevos fluidos con el aditivo PAC-L.

3.3.2.1 Comparación pruebas de reología, densidad y pH de los nanofluidos de ZnO y TiO₂ con el fluido de PAC-L. En cuanto al efecto de los aditivos sobre las propiedades reológicas del fluido base, como se muestra en la tabla 17, se observó que a medida que la concentración se aumentaba, las propiedades también mejoraban, las NPs de ZnO y TiO₂ a 0.1 % en peso, mostraron el mejor rendimiento en las viscosidades, punto cedente y esfuerzo de gel, en comparación a los efectos generados por el PAC-L. El aditivo que presento las mejores características en la reología del lodo fue el TiO₂ a 0.1 % en peso con una Vp de 9 cP y un Yp de 13 lb/100ft².

Tabla 17

Resultados pruebas de reología, densidad y pH para los nanofluidos ya planteados y el nuevo fluido con PAC-L

Reología, densidad y pH comparación nanofluidos ZnO y TiO ₂ con fluido PAC-L									
Fluido	Θ600	Θ300	Vp (cP)	Va (cP)	Yp (lb/100 ft ²)	Gel (lb/100 ft ²)		Densidad (lpg)	pH
						10 s	10 min		
1	19.50	13.00	9.50	11.25	3.50	1.50	7.50	8.60	9.7
2	25.00	16.50	8.50	12.50	8.00	2.00	8.50	8.65	9.4
3	29.00	21.50	7.50	14.50	14.0	2.75	10.0	8.70	9.1
4	27.50	17.50	10.00	13.75	7.50	2.20	9.00	8.70	9.2
5	31.00	22.00	9.00	15.50	13.0	3.00	11.5	8.65	9.0
6	28.00	19.40	8.60	14.00	10.8	2.00	9.50	8.65	9.4
7	20.40	11.00	9.40	10.20	1.60	1.70	4.20	8.62	9.5
8	24.00	14.20	9.80	12.00	4.40	2.20	6.20	8.68	9.2

Nota: La tabla muestra los resultados ya obtenidos de reología, densidad y pH para el fluido base, los nanofluidos de ZnO y TiO₂, y ahora se adicionan los resultados del fluido PAC-L, se observa que el efecto sobre las propiedades reológicas, densidad y pH tiene un notable efecto de mejoramiento en los nanofluidos de ZnO Y TiO₂ en relación con el fluido de PAC-L.

El efecto sobre la densidad y el pH tanto en los nanofluidos de ZnO y TiO₂, como en el fluido de PAC-L, no tienen una variación abrupta como se ve reflejado en la tabla 17, se puede considerar que la presencia de NPs en los fluidos de perforación no afecta la densidad, y el pH, manteniendo las condiciones establecidas para el lodo de perforación.

3.3.2.2 Comparación pruebas de filtrado de los nanofluidos de ZnO y TiO₂ con el fluido de PAC-L. Basados en la norma API RP 13B-1 y 13B-2 del Manual de Perforación de Fluidos del API, se realizó la prueba de filtrado a temperatura ambiente y a una presión de 100 psi, registrando los resultados de pérdida de fluido en ml a 30 min, junto con el análisis de la retorta obtenida por cada uno de los lodos formulados como se muestra en la tabla 18, en donde se indica que todos los lodos diseñados mantienen una buena consistencia del lodo, una buena plasticidad y espesor dentro de las condiciones establecidas, lo que hace que los lodos sean diferentes es el volumen de pérdida de filtrado que se obtuvo, en donde se encontró que a diferentes concentraciones y dependiendo el tipo de aditivo que se agregue se puede tener una mejora en la condiciones del filtrado o mantener las mismas condiciones iniciales.

Tabla 18

Resultados obtenidos prueba de filtrado a 30 min y análisis de la retorta comparación de nanofluidos de ZnO y TiO₂ con fluido de PAC-L

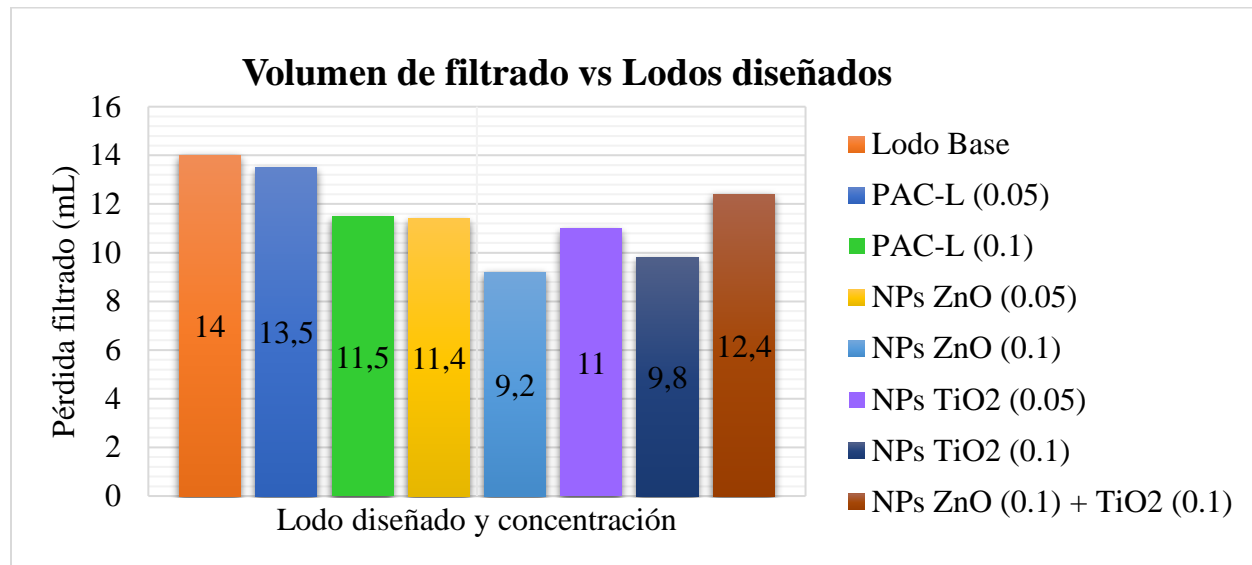
Fluido de perforación	Filtrado API [ml]	Análisis retorta		
	30 min	Consistencia	Plasticidad	Espesor (In)
1	14.0	SI	Plástica	<1/32
2	11.4	SI	Plástica	<1/32
3	9.20	SI	Plástica	<1/32
4	11.0	SI	Plástica	<1/32
5	9.80	SI	Plástica	<1/32
6	12.4	SI	Plástica	<1/32
7	13.5	SI	Plástica	<1/32
8	11.5	SI	Plástica	<1/32

Nota: La tabla muestra los resultados obtenidos en la prueba de filtrado para los nanofluidos de ZnO y TiO₂ y el fluido de PAC-L, se observa que los nanofluidos presentan una disminución de la pérdida de fluido mayor a la del fluido PAC-L.

De acuerdo con los resultados obtenidos al momento de realizar la prueba de filtrado como se muestra en la figura 25, y comparar el efecto que genera el PAC-L como las NPs de ZnO y TiO₂ en los fluidos de perforación, la pérdida de filtrado del PAC-L fue más alta, de 13.5 ml para 0.05 % en peso, y 11.5 ml para 0.1 % en peso, en comparación a la pérdida de filtrado de las NPs de ZnO de 11.4 ml para 0.05 % en peso y 9.2 ml para 0.1 % en peso, y para las NPs de TiO₂ de 11 ml para 0.05 % en peso y 9.8 ml para 0.1 % en peso, y demostrando que las nanopartículas cumplen su función de disminuir la pérdida de fluidos.

Figura 25

Comparación de las pérdidas de filtrado de los nanofluidos de ZnO y TiO₂ con el fluido de PAC-L



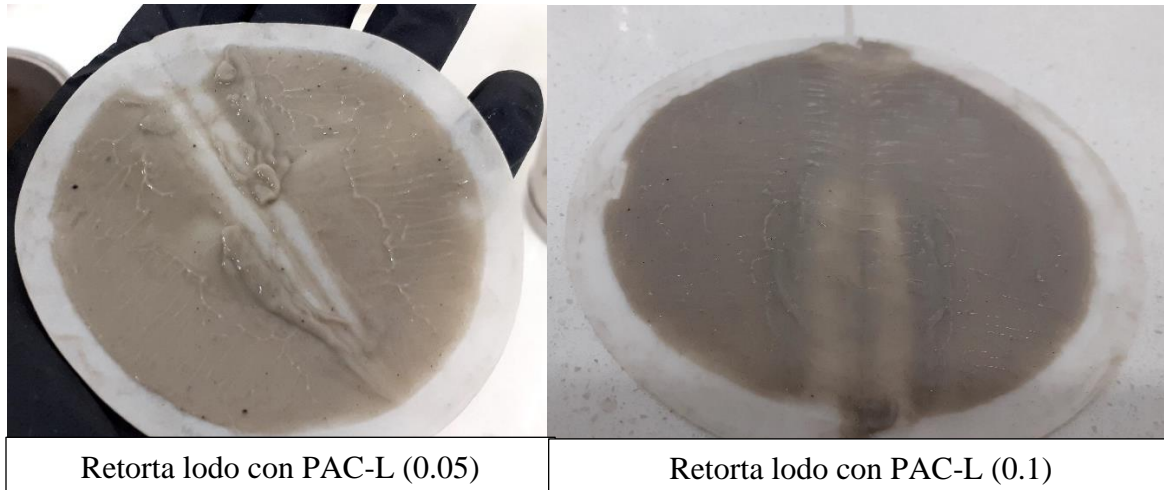
Nota: La gráfica muestra la pérdida de filtrado en ml para cada uno de los lodos propuestos, donde se puede observar que el fluido 5 tiene la menor pérdida con 9.2 ml de filtrado.

El lodo diseñado que mostró el mejor comportamiento para disminuir las pérdidas de filtrado fue el fluido 5 que corresponde al lodo con NPs de ZnO de 0.05 % en peso con una cantidad de pérdida de 9.2 ml a 30 min y una reducción del 34.29 % de la pérdida de filtrado del fluido base y en comparación al PAC-L de 0.1 % en peso con una cantidad de filtrado de 13.5 ml a 30 min que reduce las pérdidas de filtrado en un 14.29 % del fluido base.

3.3.2.3 Retortas PAC-L. En la figura 26 se muestran las retortas de los lodos diseñados en laboratorio para el lodo con el aditivo PAC-L. El análisis de las retortas se encuentra reflejado en la tabla 18.

Figura 26

Retortas formadas por el lodo con el aditivo PAC-L



Nota: En la figura se muestra las retortas formadas del lodo con aditivo PAC-L en donde se puede observar que no tienen tanta consistencia. Foto tomada por autores.

3.3.3 Pruebas de compatibilidad de las NPs de ZnO y TiO_2

Se realizaron pruebas de compatibilidad para determinar que las nanopartículas de óxido de titanio y óxido de zinc al ser combinadas con otros aditivos comerciales usados en los fluidos convencionales de perforación no presentaran reacciones químicas, cambios en las propiedades y presencia de precipitados, las pruebas se iniciaron después de mantener las soluciones en agitación durante dos horas, y se hicieron en diversos intervalos de tiempo a 1, 3, 7, 15 y 30 días. En ellas se establecieron diferentes parámetros para tener una buena compatibilidad como, color, presencia de espuma o burbujas, precipitado, separación de la mezcla, anomalías u otra observación.

Las pruebas se realizaron añadiendo agua, nanopartículas de óxido zinc y óxido de titanio a determinada cantidad de un aditivo específico dentro de un recipiente de vidrio; para establecer la cantidad de aditivo en gramos a añadir en cada recipiente, se disminuyó en 3,5 veces la cantidad

utilizada en el laboratorio como se refleja en la tabla 19, esto, con el fin de reducir los materiales a utilizar, es decir, de 1 bbl equivalente usado en laboratorio normalmente que corresponde a 350 ml, se añadieron 100 ml de agua, y así se realizó la correlación para cada uno de los aditivos. La concentración de referencia usada para las NPs de ZnO y TiO₂ fue de 0.1% en peso para cada una, ya que estas mostraron los mejores resultados en las pruebas de reología.

Tabla 19

Formulación de los aditivos para pruebas de compatibilidad

Muestra	Tiempo de agitación Min	NPs TiO₂ Gramos (g)	NPs ZnO Gramos (g)	Aditivo Gramos (g)
NPs ZnO + Agua	5.00	-	0.10	100
NPs TiO ₂ + Agua	5.00	0.10	-	100
NPs ZnO + Bentonita	5.00	-	0.10	7.143
NPs TiO ₂ + Bentonita	5.00	0.10	-	7.143
NPs ZnO +PAC-L	5.00	-	0.10	0.10
NPs TiO ₂ +PAC-L	5.00	0.10	-	0.10
NPs ZnO + Soda Cautica	5.00	-	0.10	0.10
NPs TiO ₂ + Soda Cautica	5.00	0.10	-	0.10

Nota: La tabla muestra la formulación de cada uno de los aditivos para las pruebas de compatibilidad.

Se realizaron pruebas de compatibilidad con el objetivo de establecer la interacción entre las nanopartículas de ZnO y TiO₂ y aditivos comerciales como bentonita, PAC-L y soda cáustica (NaOH). El resultado de estas pruebas se encuentra en las tablas 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 y 27, donde se establecieron todos parámetros para conocer la compatibilidad de los aditivos.

Tabla 20
Observaciones pruebas de compatibilidad para ZnO + Agua

Composición muestra			NPs ZnO (g)	Aditivo (g)
NPs ZnO + 100 ml Agua			0.10	100
Fecha			pH	Observaciones
Día	Mes	Año		
07	08	2020	2.8	1 Sin color o transparente
Observación inicial				2 No
				3 No
				4 pH básico
07	08	2020	2.8	1 Sin color o transparente
Observación 2 horas después				2 No
				3 No
				4 -
08	08	2020	2.8	1 Sin color o transparente
Observación día 1				2 No
				3 No
				4 -
10	08	2020	3.0	1 Sin color o transparente
Observación día 3				2 No
				3 -
				4 Fluido levemente viscoso
14	08	2020	3.1	1 Sin color o transparente
Observación día 7				2 No
				3 -
				4 -
22	08	2020	3.1	1 Sin color o transparente
Observación día 15				2 -
				3 Poca presencia de precipitados
				4 -
06	09	2020	3.2	1 Sin color o transparente
Observación día 30				2 -
				3 Poca presencia de precipitado
				4 -
Referencia de muestra				NPs ZnO

Tabla 21
Observaciones pruebas de compatibilidad para TiO₂ + Agua

Composición muestra			NPs TiO ₂ (g)	Aditivo (g)
NPs TiO ₂ + 100 ml Agua			0.10	100
Fecha			pH	Observaciones
Día	Mes	Año		
07	08	2020	2.6	1 Sin color o transparente
Observación inicial				2 No
				3 No
				4 pH acido
07	08	2020	2.6	1 Sin color o transparente
Observación 2 horas después				2 No
				3 No
				4 -
08	08	2020	2.7	1 Sin color o transparente
Observación día 1				2 No
				3 No
				4 -
10	08	2020	2.8	1 Sin color o transparente
Observación día 3				2 No
				3 -
				4 -
14	08	2020	2.8	1 Sin color o transparente
Observación día 7				2 No
				3 -
				4 -
22	08	2020	2.8	1 Sin color o transparente
Observación día 15				2 -
				3 Leve presencia de precipitados
				4 -
06	09	2020	2.8	1 Sin color o transparente
Observación día 30				2 -
				3 Leve presencia de precipitado
				4 -
Referencia de muestra				NPs TiO ₂

Tabla 22
Observaciones pruebas de compatibilidad para NPs ZnO + Bentonita

Composición muestra			NPs ZnO (g)	Aditivo (g)	
NPs ZnO + Bentonita + 100 ml Agua			0.10	7.143	
Fecha			pH	Observaciones	
Día	Mes	Año			
07	08	2020	9.4	1	Color gris cenizo
Observación inicial				2	No
				3	No
				4	-
07	08	2020	9.3	1	Color gris cenizo
Observación 2 horas después				2	No
				3	No
				4	-
08	08	2020	9.4	1	Color gris cenizo
Observación día 1				2	No
				3	No
				4	Fluido levemente viscoso
10	08	2020	9.5	1	Color gris cenizo
Observación día 3				2	No
				3	-
				4	Fluido levemente viscoso
14	08	2020	9.6	1	Color gris cenizo
Observación día 7				2	No
				3	-
				4	Fluido levemente viscoso
22	08	2020	9.5	1	Color gris más oscuro
Observación día 15				2	Presencia de espumas
				3	Poca presencia de precipitados
				4	Fluido levemente más viscoso
06	09	2020	9.4	1	Color gris más oscuro
Observación día 30				2	Presencia de precipitado
				3	Fluido levemente más viscoso
				4	-
Referencia de muestra				NPs ZnO	

Tabla 23
Observaciones pruebas de compatibilidad para NPs TiO₂ + Bentonita

Composición muestra			NPs TiO ₂ (g)	Aditivo (g)	
NPs TiO ₂ + Bentonita + 100 ml Agua			0.10	7.143	
Fecha			pH	Observaciones	
Día	Mes	Año			
07	08	2020	9.2	1	Color gris cenizo
Observación inicial				2	No
				3	No
				4	Fluido levemente viscoso
07	08	2020	9.1	1	Color gris cenizo
Observación 2 horas después				2	No
				3	No
				4	Fluido levemente viscoso
08	08	2020	9.0	1	Color gris cenizo
Observación día 1				2	No
				3	No
				4	Fluido levemente viscoso
10	08	2020	9.5	1	Color gris cenizo
Observación día 3				2	No
				3	-
				4	Fluido levemente viscoso
14	08	2020	9.4	1	Color gris cenizo
Observación día 7				2	No
				3	-
				4	Fluido levemente viscoso
22	08	2020	9.3	1	Color gris cenizo oscuro
Observación día 15				2	-
				3	Leve presencia de precipitados
				4	Fluido levemente viscoso
06	09	2020	9.4	1	Color gris cenizo oscuro
Observación día 30				2	-
				3	Leve presencia de precipitado
				4	Fluido levemente viscoso
Referencia de muestra				NPs TiO ₂	

Tabla 24

Observaciones pruebas de compatibilidad para NPs ZnO + PAC-L

Composición muestra			NPs ZnO (g)	Aditivo (g)
NPs ZnO + PAC-L + 100 ml Agua			0.10	0.1
Fecha			pH	Observaciones
Día	Mes	Año		
07	08	2020	4.2	1 Sin color o transparente
Observación inicial				2 No
				3 No
				4 pH menor a la bentonita
07	08	2020	4.4	1 Sin color o transparente
Observación 2 horas después				2 No
				3 No
				4 -
08	08	2020	4.5	1 Sin color o transparente
Observación día 1				2 No
				3 No
				4 Fluido levemente viscoso
10	08	2020	4.5	1 Sin color o transparente
Observación día 3				2 No
				3 -
				4 Fluido levemente más viscoso
14	08	2020	4.5	1 Sin color o transparente
Observación día 7				2 No
				3 Poca presencia de precipitados
				4 Fluido levemente viscoso
22	08	2020	4.6	1 Sin color o transparente
Observación día 15				2 -
				3 Poca presencia de precipitados
				4 Fluido levemente más viscoso
06	09	2020	4.7	1 Sin color o transparente
Observación día 30				2 Presencia de precipitado
				3 Fluido levemente más viscoso
				4 Una o dos burbujas
Referencia de muestra				NPs ZnO

Tabla 25

Observaciones pruebas de compatibilidad para NPs TiO₂ + PAC-L

Composición muestra			NPs TiO ₂ (g)	Aditivo (g)
NPs TiO ₂ + PAC-L + 100 ml Agua			0.10	0.10
Fecha			pH	Observaciones
Día	Mes	Año		
07	08	2020	4.4	1 Sin color o transparente
Observación inicial				2 No
				3 pH menor a la bentonita
				4 Fluido levemente viscoso
07	08	2020	4.5	1 Sin color o transparente
Observación 2 horas después				2 No
				3 No
				4 Fluido levemente viscoso
08	08	2020	4.5	1 Sin color o transparente
Observación día 1				2 No
				3 No
				4 Fluido levemente viscoso
10	08	2020	4.6	1 Sin color o transparente
Observación día 3				2 No
				3 -
				4 Fluido levemente viscoso
14	08	2020	4.6	1 Sin color o transparente
Observación día 7				2 No
				3 -
				4 Fluido levemente viscoso
22	08	2020	4.8	1 Sin color o transparente
Observación día 15				2 Pocas burbujas en superficie
				3 Leve presencia de precipitados
				4 Fluido levemente viscoso
06	09	2020	4.8	1 Sin color o transparente
Observación día 30				2 Pocas burbujas en superficie
				3 Leve presencia de precipitado
				4 Fluido levemente viscoso
Referencia de muestra			NPs TiO ₂	

Tabla 26
Observaciones pruebas de compatibilidad para NPs ZnO + Soda Cáustica (NaOH)

Composición muestra			NPs ZnO (g)	Aditivo (g)
NPs ZnO + NaOH+ 100 ml Agua			0.10	0.10
Fecha			pH	Observaciones
Día	Mes	Año		
07	08	2020	11.8	1 Sin color o transparente
Observación inicial				2 No
				3 No
				4 pH bastante alto
07	08	2020	11.8	1 Sin color o transparente
Observación 2 horas después				2 No
				3 No
				4 -
08	08	2020	12	1 Sin color o transparente
Observación día 1				2 No
				3 pH bastante alto
				4 Fluido levemente viscoso
10	08	2020	12.2	1 Sin color o transparente
Observación día 3				2 No
				3 pH bastante alto
				4 Fluido levemente más viscoso
14	08	2020	12.2	1 Sin color o transparente
Observación día 7				2 pH bastante alto
				3 -
				4 Fluido levemente viscoso
22	08	2020	12.3	1 Sin color o transparente
Observación día 15				2 pH bastante alto
				3 -
				4 Fluido levemente más viscoso
06	09	2020	12.3	1 Sin color o transparente
Observación día 30				2 Poca presencia de precipitados
				3 Fluido levemente más viscoso
				4 pH bastante alto
Referencia de muestra				NPs ZnO

Tabla 27
Observaciones pruebas de compatibilidad para NPs TiO₂ + Soda Cáustica (NaOH)

Composición muestra			NPs TiO ₂ (g)	Aditivo (g)	
NPs TiO ₂ + NaOH+ 100 ml Agua			0.10	0.10	
Fecha			pH	Observaciones	
Día	Mes	Año			
07	08	2020	11.5	1	Sin color o transparente
Observación inicial				2	No
				3	No
				4	pH bastante alto
07	08	2020	11.5	1	Sin color o transparente
Observación 2 horas después				2	No
				3	No
				4	pH bastante alto
08	08	2020	11.8	1	Sin color o transparente
Observación día 1				2	No
				3	pH bastante alto
				4	Fluido levemente viscoso
10	08	2020	12.1	1	Sin color o transparente
Observación día 3				2	No
				3	pH bastante alto
				4	Fluido levemente más viscoso
14	08	2020	12.1	1	Sin color o transparente
Observación día 7				2	pH bastante alto
				3	-
				4	Fluido levemente viscoso
22	08	2020	12.2	1	Sin color o transparente
Observación día 15				2	pH bastante alto
				3	-
				4	Fluido levemente más viscoso
06	09	2020	12.3	1	Sin color o transparente
Observación día 30				2	Poca presencia de precipitados
				3	Fluido levemente más viscoso
				4	pH bastante alto
Referencia de muestra				NPs TiO ₂	

En las tablas 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 y 27 se observa que, en ningún caso las nanopartículas de óxido de Zinc y Titanio causaron alteraciones en los aditivos que pudieran afectar el comportamiento del fluido de perforación, por ejemplo, el color se mantuvo constante

ya que la mayoría de los aditivos excepto la bentonita, presentaban transparencia al diluirlos en agua. El pH, no tuvo variaciones significativas, puesto que de ser lo contrario podría generar problemas de corrosión cuando su valor logra ser muy ácido. Respecto a su viscosidad, se mantuvo en un comportamiento ideal para todos los aditivos, representando cada uno su función respectiva.

3.4 Análisis económico nanofluidos de ZnO y TiO₂

Se realizó una evaluación económica del costo de uso de la bentonita, utilizada tradicionalmente en los fluidos de perforación convencionales base agua, frente a los costos en el uso de nanopartículas en los lodos de perforación convencionales base agua. Para este estudio las nanopartículas utilizadas fueron comerciales, NPs de TiO₂ (Fase Anatasa de 18 nm) y NPs de ZnO (35-45 nm), junto con los aditivos convencionales bentonita y PAC-L.

El análisis económico se realizó en referencia al estudio de laboratorio, es decir, el coste del fluido de perforación se dará por bbl equivalente, ya que no se estaba aplicando a un circuito en específico de lodo en un campo, este análisis se basó en los 8 lodos formulados en laboratorio como se muestra en la tabla 28.

Tabla 28

Formulación de lodos para análisis económico

Fluido de Perforación	Tipo de lodo	Bentonita (lb/bbl)	PAC-L (lb/bbl)	NPs (ZnO)	NPs (TiO ₂)
1	Agua + bentonita	25	-	-	-
2	Agua + bentonita + NPs (ZnO)	25	-	0,15	-
3				0,35	-
4	Agua + bentonita + NPs (TiO ₂)	25	-	-	0,15
5				-	0,35
6	Agua + bentonita + NPs (TiO ₂) + NPs (ZnO)	25	-	0,35	0,35
7	Agua + bentonita + PAC-L	25	0,15	-	-
8			0,35	-	-

Los precios de los aditivos fueron brindados por funcionarios del laboratorio LEAM del Parque Tecnológico Guatiguará (UIS). Para los aditivos comerciales de quien no se conoció el proveedor, un costo de Bentonita Nacional de 17 USD/saco, Bentonita en presentación de 100 lb/saco (0.17 USD/lb y 0.000375 USD/g), y PAC-L producto Nacional 48 USD/saco, PAC-L en presentación de 50 lb/saco (0.48 USD/lb y 0.00106 USD/g), y con un costo del proveedor US Research Nanomaterials, Inc. para las NPs comerciales de ZnO en 185 USD/kg (84.09 USD/lb y 0.215 USD/g) y las NPs comerciales de TiO₂ en 218 USD/kg (99.09 USD/lb y 0.218 USD/g). En la tabla 29 se puede ver el precio en USD/bbl para cada aditivo y formulación de lodo establecida.

Tabla 29

Precio de los aditivos y costo en USD/bbl

Fluido de perforación	Bentonita	PAC-L	NPs ZnO	NPs TiO ₂	Costo fluido
	USD/bbl Equiv.	USD/bbl Equiv.	USD/bbl Equiv.	USD/bbl Equiv.	USD/bbl Equiv.
1	0.009	-	-	-	0.009
2	0.009	-	0.032	-	0.042
3	0.009	-	0.075	-	0.085
4	0.009	-	-	0.033	0.042
5	0.009	-	-	0.076	0.086
6	0.009	-	0.075	0.076	0.161
7	0.009	0.0002	-	-	0.0095
8	0.009	0.0004	-	-	0.0097

Nota: La tabla muestra el precio en USD/bbl para cada uno de los aditivos y el costo solamente de la materia prima de fluido en las formulaciones de lodo planteadas, se puede observar que los nanofluidos tienen un costo similar al fluido con PAC-L usado convencionalmente.

A continuación, en la tabla 30, se muestran los precios de los aditivos y costo de los lodos formulados en pesos colombianos (COP), para tener un estimado en nuestra moneda se asume una

Tasa Representativa del Mercado (TRM) al día 16 de enero de 2022 del precio del dólar (USD) con respecto al valor del peso colombiano (COP), de \$ 3946.88 (1 USD = 3946.88 COP).

Tabla 30

Precio de los aditivos y costo del fluido en COP/bbl equivalente

Fluido	Bentonita	PAC-L	NPs ZnO	NPs TiO ₂	Costo fluido
	COP/bbl Equiv.	COP/bbl Equiv.	COP/bbl Equiv.	COP/bbl Equiv.	COP/bbl Equiv.
1	37.002	-	-	-	37.002
2	37.002	-	127.29	-	164.29
3	37.002	-	297.00	-	334.00
4	37.002	-	-	129.06	166.06
5	37.002	-	-	301.15	338.15
6	37.002	-	297.00	301.15	635.15
7	37.002	0.6276	-	-	37.63
8	37.002	1.4643	-	-	38.47

Nota: La tabla muestra el costo de los aditivos y de los fluidos formulados en pesos colombianos por barril de lodo, COP/bbl.

De acuerdo con los resultados obtenidos en las tablas 29 y 30, con respecto al precio de los aditivos y costo de cada uno de los fluidos, se observa que los nanofluidos presentan un costo similar al coste de un aditivo convencional como lo es el PAC-L en laboratorio; esta comparación solo se basa en el coste de la materia prima de los aditivos y las NPs comerciales, no se tiene una referencia del coste de transporte y almacenamiento de los aditivos. Teniendo en cuenta las pruebas realizadas con anterioridad a cada uno de los lodos formulados y con el fin de comparar los costes de los nanofluidos con los fluidos convencionales, se tomaron como referencia los fluidos de NPs de ZnO (0.1 % en peso) y NPs TiO₂ (0.1 % en peso) que presentaron el mejor desempeño,

comparándolas con el lodo base, y el aditivo PAC-L (0.1 % en peso) como se muestra en la tabla 31.

Analizando el precio de los lodos formulados en comparación al lodo base, se puede decir que el aumento presentado en los nanofluidos puede ser compensando por el coste-beneficio que generan las NPs en el lodo, ya que generan una mayor estabilidad de pozo, menor daño e invasión a la formación, reducción de tiempos de viaje; por ejemplo, disminución en la pérdida de fluido, es decir, se requerirá menor cantidad de nanofluido en la perforación, disminuyendo así los costos y tiempos en un fluido de perforación reforzado con NPs, en comparación al lodo base y al fluido de perforación de PAC-L.

Tabla 31

Comparación nanofluidos de NPs ZnO y TiO₂ con el lodo base y el fluido de PAC-L

Fluido de Perforación	Costo fluido	Incremento precio respecto al lodo base
	COP/bbl Equiv.	%
Agua + bentonita	37.002	0
Agua + bentonita + PAC-L	38.47	3.97
Agua + bentonita + NPs ZnO	334	802.65
Agua + bentonita + NPs TiO ₂	338.15	813.87

Nota: La gráfica muestra el incremento en los costos de fluidos con respecto al lodo base al agregar aditivos para mejorar las propiedades de este, se puede observar que los nanofluidos tienen un alto porcentaje de incremento con respecto al fluido de PAC-L.

Analizando la tabla 31, los nanofluidos de perforación aumentan entre 800% y 815% el coste en comparación al fluido de bentonita y PAC-L, debe tenerse en cuenta que el valor presentando corresponde a un análisis de laboratorio en el cual la cantidad de material es mínima, y al ser algo

novedoso, es costoso. Sin embargo, si se quisiera usar a nivel de industria, para realizar un análisis más detallado dependería del diseño de fluido para cada campo en específico, y su costo se vería disminuido, ya que, al requerir mayor cantidad de material, los precios ofrecidos por los proveedores son menores.

3.5 Aditivo recomendado

En base al estudio realizado en esta investigación las NPs que presentaron el mejor comportamiento costos-beneficios fueron las NPs de ZnO a 0.1 % en peso, ya que presentaron la menor cantidad de fluido filtrado de 9.2 ml, disminuyendo la pérdida en un 34.29 % en comparación al fluido base.

Estas NPs incrementaron de forma positiva las propiedades del fluido base agua-bentonita, alrededor de un 50%, con una viscosidad plástica de 7.5 cP, Yield Point de 14 (lb/100 ft²), esfuerzo de gel a 10 min de 11.5 (lb/100 ft²).

Presento la mejor consistencia, y tamaño de retorta en comparación a los demás fluidos.

Los costos de un nanofluido con NPs de ZnO de 0.1 % en peso son menores a los costos de un nanofluido con NPs de TiO₂ de 0.1 % en peso.

4. Conclusiones

El uso de nanopartículas en la formulación de lodos de perforación ha tomado un impulso en los últimos años de investigación, donde los estudios indican que es adecuado añadir NPs de TiO₂ y ZnO a concentraciones inferiores al 0.5% wt a un fluido de perforación convencional base agua-bentonita, debido a sus características funcionales que mejoran las propiedades reológicas y de filtrado, minimizando los problemas operacionales en la perforación.

Las pruebas de medición del tamaño con DLS para la caracterización de las NPs de ZnO y TiO₂, indica que las nanopartículas comerciales cuando se encuentran en reposo durante bastante tiempo se aglomeran formando partículas con un tamaño más grande del que se desea obtener, antes de usarlas se deben realizar procesos de separación como el ultrasonido para activar las NPs rompiendo su unión y obtener los tamaños deseados, en este caso de estudio de 20-60 nm para ZnO y 15-50 nm para TiO₂.

Las Nanopartículas de ZnO y TiO₂ demostraron ser unos aditivos que mejoran las propiedades reológicas, pero la nanopartícula ZnO a una concentración de 0.35% en peso, presentó los mejores resultados en la viscosidad plástica, aparente, yield point y esfuerzos de gel a 10 segundos y 10 minutos, en un fluido de perforación base agua-bentonita.

El nanofluido con NPs de ZnO a una concentración de 0.1 % en peso, presentó un mayor desempeño en las pruebas de filtrado, reduciendo en un 34.29% el volumen de filtrado del lodo de perforación convencional base agua-bentonita, con una retorta de buena calidad, consistente, plástica y con un espesor ideal (<1/32 in) generando un bueno sello.

Tras el análisis de los resultados obtenidos se identifica que con una concentración menor a 0,1% en peso de NPs, no se obtienen mejores resultados en las propiedades reológicas y control de filtrado, siendo la cantidad de nanopartículas tan pequeña que los valores tienden a aumentar, esto indica que el punto significativo es la selección de las concentraciones de NPs, y juegan un papel vital en el uso de los fluidos de perforación.

Las NPs de ZnO y TiO₂ presentan una buena compatibilidad con los aditivos PAC-L y NaOH, usados normalmente en un fluido de perforación convencional, no generaron reacciones, ni alteraciones que se vean a simple vista y puedan generar cambios negativos en las propiedades de los fluidos.

Al comparar el costo de un nanofluido de perforación con NPs de ZnO y TiO₂ diseñado en laboratorio a concentraciones de 0.1% en peso, con el de un lodo convencional base agua bentonita, se observa un incremento del 802.65% y 813.87% respectivamente; este incremento en el precio se puede ver compensado con la reducción del 34.29% y 30% en la pérdida del filtrado del lodo base generado por estas NPs, lo cual a gran escala puede traer un beneficio para la industria de los hidrocarburos, disminuyendo el tiempo y costos en la perforación.

5. Recomendaciones

Realizar una síntesis de las nanopartículas de ZnO y TiO₂ y mirar su comportamiento reológico en comparación de las nanopartículas comerciales.

Se recomienda realizar una prueba piloto en campo, ya que los resultados logrados en el laboratorio son favorables y podrían ayudar al mejoramiento de las propiedades reológicas y control del filtrado generando un sello o retorta adecuada. Además, podría beneficiar a la industria generando ahorros importantes de tiempo y dinero.

Realizar pruebas de desplazamiento con corazones expuestos al fluido con y sin nanopartículas de ZnO y TiO₂ con el fin de evaluar si genera un filtrado ideal que ocasione que las nanopartículas pasen a través del medio poroso teniendo un efecto favorable al incrementando en el factor de recobro.

Realizar pruebas de reología y filtrado HPHT a un fluido de perforación con óxido de titanio y zinc para comprobar a condiciones reales que efecto tienen las propiedades del fluido de perforación en el yacimiento y poder generar un comparativo, con otros tipos de aditivos comerciales usados actualmente en la industria.

Referencias Bibliográficas

Abascal Estela C. (2019). Aportaciones para el uso de nanofluidos en un intercambiador de calor de carcasa y tubos/ contributions to the use of nanofluids in a shell and tube heat exchanger. [Tesis de Maestria, universidad de cantabria y la universidad del país vasco/euskal herriko unibertsitatea].

Abdo Jamil, Danish M., 2010, Nanoparticles: Promising solution to overcome stern drilling problems. En Nanotech Conference and Exhibition, Anaheim, California.

Afolabi, R. O., Paseda, P., Hunjenukon, S., & Oyeniya, E. A. (2018). Model prediction of the impact of zinc oxide nanoparticles on the fluid loss of water-based drilling mud. *Cogent Engineering*, 5(1), 1514575. DOI: 10.1080/23311916.2018.1514575

Amado Leon, J.J. Rueda Galvis, J.D (2018). Evaluación del comportamiento reológico de un fluido de perforación base agua reforzado con nanofluidos de óxido de grafeno. [Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander].

Amanullah, M., & Al-Tahini, A. M. (2009, May). Nano-technology-its significance in smart fluid development for oil and gas field application. In *SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium*. OnePetro.

Amanullah, M., & Al-Tahini, A. M. (2009, May). Nano-technology-its significance in smart fluid development for oil and gas field application. In *SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium*. OnePetro.

API. (s. f.). AMERICAN PETROLUUM INSTITUTE| BENTONITA.

<https://www.api.org/products-and-services/es/standards>.

<https://www.api.org/products-and-services/es/standards>.

Aquino, P., Osorio, A., Ninán, E. and Torres, F., 2021. Caracterización de nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método de precipitación y su evaluación en la incorporación en pinturas esmalte. [online] Scielo.org.pe. Available at: <http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2018000100002> [Accessed 15 December 2021].

Bayat AE, Jalalat P, Piroozian A, Rafati R, Experimental Investigation of Rheological and Filtration Properties of Water-Based Drilling Fluids in Presence of Various Nanoparticles, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* (2018), <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.07.001>

Bayat AE, Jalalat P, Piroozian A, Rafati R, Experimental Investigation of Rheological and Filtration Properties of Water-Based Drilling Fluids in Presence of Various Nanoparticles, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* (2018), <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.07.001>

Bayat, A. E., & Shams, R. (2019). Appraising the impacts of SiO₂, ZnO and TiO₂ nanoparticles on rheological properties and shale inhibition of water-based drilling muds. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 581, 123792. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123792>.

BENITEZ HERNÁNDEZ. et al., s. f.) BENITEZ HERNÁNDEZ., I. N. G. M. I. G. U. E. L. A., Garaicochea Petreirena, F., & Reyes Alvarez, C. (s. f.). APUNTES FLUIDO DE PERFORACIÓN. Universidad Nacional Autónoma de México - Facultad Ingeniería. Recuperado 25 de marzo de 2021, de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/13244/FLUIDOS%20DE%20PERFORACION%20C3%93N.pdf?sequence=1>

Camacho Beltrán, Á. S., Duarte, Á., Dubay, D., Forero, E., González, E., Jaramillo Isaza, F., ... & Urquijo, W. (2016). Definición de nanomateriales para Colombia.

Cardenas, C.R. 2012. Evaluación de las propiedades físicas y fotocatalíticas de cemento adicionado con nanopartículas de dióxido de titanio. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas Medellín, Colombia. 118 pp.

Cuadros Moreno, A., Casañas Pimentel, R., San Martín Martínez, E., & Yañes Fernandez, J. (2014, 13 diciembre). Dispersión de luz dinámica en la determinación de tamaño de nanopartículas poliméricas. Lajpe.org. http://www.lajpe.org/dec14/4314_San_Martin.pdf

Dejtaradon, P., Hamidi, H., Chuks, M. H., Wilkinson, D., & Rafati, R. (2019). Impact of ZnO and CuO nanoparticles on the rheological and filtration properties of water-based drilling fluid. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 570, 354-367.

Drilling fluid | oilfield glossary, 1979). AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. https://www.glossary.oilfield.slb.com/en/terms/d/drilling_fluid.

El-Diasty, Abdelrahman & Salem, Adel. (2013). Applications of Nanotechnology in the Oil & Gas Industry: Latest Trends Worldwide & Future Challenges in Egypt. Society of Petroleum Engineers - North Africa Technical Conference and Exhibition 2013, NATC 2013. 2. 10.2118/164716-MS. DOI:10.2118/164716-MS.

El-Diasty, Abdelrahman & Salem, Adel. (2013). Applications of Nanotechnology in the Oil & Gas Industry: Latest Trends Worldwide & Future Challenges in Egypt. Society of Petroleum Engineers - North Africa Technical Conference and Exhibition 2013, NATC 2013. 2. 10.2118/164716-MS. DOI:10.2118/164716-MS.

Funciones y tipos de lodos, 2017. Lodos de perforación.
<https://lodosdeperforacion.wordpress.com/acerca-de/>

Hernandez Pedreros, M.M. Manrique Osorio, A. (2018). Formulacion de un fluido de perforación de alto rendimiento polimerico en base agua para el bloque cPo-05 de la cuenca de los llanos orientales. [Tesis de Pregrado, Fundacion Universidad de America]
<https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6721/1/6112774-2018-1-IQ.pdf>

Hoelscher K., Guido de Stefano, Meghan R., Young S., 2012, Application of nanotechnology in drilling fluids. In SPE International Oilfield Nanotechnology Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, SPE 157031

MI & SWACO, s. f., pp. 1–3). Drilling fluids engineering Manual. (Vol. 2) [Libro electrónico].
<https://vdocuments.site/manual-fluidos-de-manual-fluidos-de-perforacion-mi-swaco.html>

National Institute of Standards and Technology. (2018). Libro del web de química del NIST, SRD 69 [Libro electrónico]. <https://webbook.nist.gov/chemistry/index.html>.es

P. & DrillingFormulas.Com. (2020, 5 septiembre). Tipos de Flujo y Modelos Reológicos en el Lodo. Perfoblogger. <https://perfoblogger.wordpress.com/2020/09/05/tipos-de-flujo-y-modelos-reologicos-en-el-lodo/>

Ponmani, S., Nagarajan, R., & Sangwai, J. (2013). Applications of nanotechnology for upstream oil and gas industry. In *Journal of Nano Research* (Vol. 24, pp. 7-15). Trans Tech Publications Ltd.

Ponmani, S., Nagarajan, R., & Sangwai, J. (2013). Applications of nanotechnology for upstream oil and gas industry. In *Journal of Nano Research* (Vol. 24, pp. 7-15). Trans Tech Publications Ltd.

Rodríguez Olarte, M. A. Fundamentos para una regulación específica de la nanotecnología en Colombia. (2015).

Rodríguez Olarte, M. A. Fundamentos para una regulación específica de la nanotecnología en Colombia. (2015).

Romero, s. f.) Propiedades de los fluidos de perforación. Slideshare. <https://es.slideshare.net/RicardoRomero232/propiedades-de-los-fluidos-de-perforacin>

Santana, R. & Gañán, P. (2019). Derecho y nanotecnología: definiendo lo invisible. *Revista de la Facultad de Derecho y Ciencias Políticas*, 49 (131), pp. 507-520. doi: <http://dx.doi.org/10.18566/rfdcP.v49n131.a11>.

Santana, R. & Gañán, P. (2019). Derecho y nanotecnología: definiendo lo invisible. Revista de la Facultad de Derecho y Ciencias Políticas, 49 (131), pp. 507-520. doi:

<http://dx.doi.org/10.18566/rfdcp.v49n131.a11>

Schlumberger, s. f.) Viscosidad plástica | oilfield glossary. Oilfield glossary.

https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/terms/p/plastic_viscosity#:~:text=Un%20par%C3%A1metro%20del%20modelo%20pl%C3%A1stico,matem%C3%A1ticas%20del%20modelo%20de%20Bingham.

Schlumberger. (s. f.-a). Almidón | oilfield glossary. Schlumberger| oilfield glossary. Recuperado

12 de abril de 2021, de

<https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/terms/s/starch#:~:text=Un%20aditivo%20para%20lodo%20de,de%20cal%20de%20alto%20pH.&text=Los%20dos%20pol%C3%ADmeros%20se%20entrelazan%20dentro%20de%20los%20gr%C3%A1nulos%20del%20amid%C3%B3n.>

Schlumberger. (s. f.-a). Atapulgita | oilfield glossary. Schlumberger| Oilfield glossary. Recuperado

12 de abril de 2021, de

<https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/terms/a/attapulgite#:~:text=Un%20mineral%20de%20arcilla%20acicular%20compuesto%20por%20silicato%20de%20magnesio%20aluminio.>

Schlumberger. (s. f.-c). Modelo plástico de bingham | oilfield glossary. Schlumberger | oilfield

glossary. Recuperado 13 de abril de 2021, de

https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/terms/b/bingham_plastic_model

SciELO citation index: Mejorando la visibilidad de las revistas scielo. (2015). Información tecnológica, 26(4), 01–02. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642015000400001>

Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2015). FUNDAMENTOS DE QUÍMICA ANALÍTICA (Vol. 9). Cengage Learning Editores. https://www.academia.edu/34474929/Libro_Fundamentos_Analitica_Skoog_9ed

Valencia Quiceno Laura M (2019). 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 de Maestría, Universidad Nacional de Colombia].

Velásquez, C. L., Khatib, S. K., & González, F. L. (Eds.). (2015). Nanopartículas: fundamentos y aplicaciones. Universidad de los Andes.

Williamson, 2013, p. 1). Williamson, D. (2013). Definición de los fluidos de perforación. Fundamentos de los fluidos de perforación, 25(1), 1–3. <http://www.paginaspersonales.unam.mx/app/webroot/files/4676/Asignaturas/1458/Archivo2.3223.pdf>