

**EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE SISTEMAS COMPUESTOS
(NANOCOMPOSITOS) BASADOS EN GRAFENO, SOBRE LAS PROPIEDADES
REOLÓGICAS EN FLUIDOS DE PERFORACIÓN**

**MIGUEL ANDRÉS ACOSTA PÁEZ
WILMER MIGUEL RAMÍREZ DIÁVILA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2018

**EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS COMPUESTOS (NANOCOMPOSITOS)
BASADOS EN GRAFENO, SOBRE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS EN
FLUIDOS DE PERFORACIÓN**

**MIGUEL ANDRÉS ACOSTA PÁEZ
WILMER MIGUEL RAMÍREZ DIÁVILA**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero de Petróleos

Director

**EMILIANO ARIZA LEÓN
Ph. D. en ingeniería Química**

CODIRECTOR

**ENRIQUE MEJÍA OSPINO
Ph. D. en Ciencias Químicas**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2018

DEDICATORIA

En primer lugar a Dios por darme la oportunidad de vivir, la familia que tengo y tan grandiosa oportunidad de cursar estos estudios.

A mi padre Miguel Acosta por brindarme su apoyo, y ser siempre un recordatorio que la sencillez y humildad es la llave que abre puertas, encontrando así personas maravillosas mientras se recorre el camino al éxito.

A mi madre Ana Páez, por ser esa persona incondicional y sin ninguna limitación a la hora de brindarme su amor infinito, haciéndome sentir premiado al tener una madre tan guerrera de cualidades como las tuyas; siendo un pilar fundamental en la consecución de esta meta.

A mi hermana Leidy, mi mona, por tan maravilloso privilegio de contar con su cariño, por aguantar mis ocurrencias, por ser su consentido, su nene; por ser ese mensaje diario de que por los sueños se trabaja, se lucha y no se renuncia nunca sin importar que tan alentador sea el panorama.

A la familia Páez Dulcey, los cuales siempre han estado al pendiente de mí, preocupándose por mi bienestar y haciéndome sentir como un integrante más de su familia.

A mis abuelos; mamá Isabel por tanto amor y cuidados recibido, y a papá Antonio por tantos consejos y enseñanzas recibidas en pro de ser una persona correcta y de bien, que aunque faltaron solo días para ver a tu nieto como Ingeniero, sé que donde quiera que estés, estarás muy orgulloso y con la sonrisa que siempre me recibías.

A toda mi familia y amigos los cuales siempre estuvieron ahí para brindarme su apoyo y palabras de aliento cuando más lo necesite.

Miguel Andrés Acosta Páez

DEDICATORIA

Principalmente a Dios nuestro señor por la gran oportunidad de haber empezado y ahora poder culminar esta gran experiencia junto a mis seres queridos.

A mi padre Miguel Ángel Ramírez por tanta paciencia a lo largo de estos años, pues en cada ciclo académico de mi paso por la universidad veía la nostalgia de un hombre al tener que despedir a su hijo, sin embargo, cada semestre la vida nos recompensaba con una sonrisa cada vez que regresaba a mi hogar.

A mi hermana Zaida Ramirez porque fue el motor moral y sobre todo anímico durante mi formación académica y profesional, sobre todo en aquellos momentos en los cuales llegué a sentirme solo y desorientado.

De igual manera a mi cuñado Israel Villarreal que junto a mi hermana no logro encontrar un solo momento en que no me hayan apoyado en todo el sentido de la palabra durante mi paso por la universidad.

A la familia Villarreal Sánchez por su inmenso apoyo y acogida como si fuera un miembro más, a cada uno de ellos mil gracias por tan carismático trato hacia mí y sobre todo por creer desde el inicio y en todo momento que luchar por tener una formación profesional había sido la mejor inversión de mi vida.

Durante este viaje lleno de alegrías y dificultades conocí muchas personas las cuales cada una de ellas me aportaron desde una alegre sonrisa hasta un buen consejo, para todas esas personas también dedico esta meta cumplida.

Wilmer Miguel Ramírez Diávila

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos muy especialmente a:

Primeramente, a la Universidad Industrial de Santander, Escuela de ingeniería de Petróleos junto con todo su personal administrativo y académico por la íntegra formación técnica y profesional que nos brindaron durante todo el ciclo universitario.

A nuestro director de proyecto Ph. D. Emiliano Ariza León por su acompañamiento y orientación para que este trabajo investigativo culminara con éxito.

A nuestro codirector Ph. D. Enrique Mejía Ospino por sus valiosos aportes en el área de la química en la que trabajamos, principalmente en los análisis de los fenómenos químicos que sucedieron a lo largo de las pruebas realizadas.

Al grupo del laboratorio LEAM ubicado en las instalaciones de Guatiguará en especial a David Cañas estudiante de doctorado de la escuela de química de la UIS, quien fue el principal guía dentro de este laboratorio.

A los encargados de los laboratorios de lodos tanto de la Escuela de Ingeniería de Petróleos como del Instituto Colombiano del Petróleo, por sus instrucciones para el éxito de estas pruebas, además de las valiosas recomendaciones hechas.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	20
1. GENERALIDADES SOBRE LODOS DE PERFORACIÓN	22
1.1 OPTIMIZACIÓN DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN	22
1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN	24
1.2.1 Movimientos y fuerzas internas de los fluidos	25
1.2.2 Fluidos base Agua.	28
1.2.3 Fluidos base Aceite.....	29
1.3 FUNCIONES DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN	29
1.4 REOLOGÍA EN LODOS DE PERFORACIÓN.....	32
1.4.1 Tensión o esfuerzo de corte (τ).....	33
1.4.2 Velocidad de corte.	34
1.4.3 Propiedades controladas por la reología.....	34
1.5 PROPIEDADES DE FILTRADO	37
1.5.1 Factores que afectan el filtrado y la formación de la torta.....	39
2. NANOTECNOLOGÍA	41
2.1 APLICACIONES DE LA NANOTECNOLOGÍA	42
2.1.1 Medio Ambiente.	42
2.1.2 Energía.	42
2.1.3 Medicina.....	43
2.1.4 Comunicaciones e Informática.	43

2.2 NANOMATERIALES	44
2.3 NANOMATERIALES BASADOS EN CARBONO.....	44
2.3.1 Grafito.	45
2.3.2 Grafeno.....	47
2.3.3 Óxido de grafeno.	54
2.3.4 Fullerenos.	57
2.3.5 Nanotubos de carbono.....	58
2.3.6 Grafano.....	60
2.4 ÓXIDO DE SILICIO.....	61
2.4.1 Formas en las que se presenta el óxido de Silicio	63
2.4.2 Aplicación en la industria de los hidrocarburos.	64
2.4.3 Algunas ventajas de la nanosílice	65
2.4.4 Óxido de silicio como agente controlador de filtrado.....	65
2.4.5 Óxido de silicio como aditivo para lechadas de cementación.	66
2.5 NANOCOMPOSITOS	67
2.5.1 Nanocompositos de matriz polimérica.	68
2.5.2 Nanocomposito de matriz cerámica.....	69
2.5.3 Nanocompositos de matriz metálica.	69
3. APLICACIÓN DE ÓXIDO DE GRAFENO Y ÓXIDO DE SILICIO EN FLUIDOS DE PERFORACIÓN.....	71
3.1 ANÁLISIS DE LA VISCOSIDAD Y FILTRADO EN LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN.....	90
3.2 APLICACIÓN DEL ÓXIDO DE GRAFENO Y ÓXIDO DE SILICIO EN UN NANOCOMPOSITO.....	92

4. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	93
4.1 SÍNTESIS DEL ÓXIDO DE GRAFENO.....	94
4.2 CARACTERIZACIÓN DEL O.G SINTETIZADO.....	94
4.3 DEFINICIÓN DE VARIABLES	94
4.4 PRUEBAS PRELIMINARES CON O.G Y O.S	95
4.5 PRUEBAS NANOCOMPOSITO.....	98
4.5.1 Pruebas de Compatibilidad.....	98
4.5.2 Pruebas de reología y filtrado con Nanocompositos.....	101
4.5.3 Reología con el paso del tiempo (Envejecimiento de lodo).....	103
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS	105
5.1 SÍNTESIS DEL ÓXIDO DE GRAFENO.....	105
5.2 CARACTERIZACIÓN DEL ÓXIDO DE GRAFENO.....	110
5.3 PRUEBAS DE COMPATIBILIDAD.....	115
5.4 PRUEBAS PRELIMINARES	116
5.4.1 Óxido de Grafeno (O.G).....	116
5.4.2 Óxido de Silicio (O.S).....	119
5.5 PRUEBAS CON NANOCOMPOSITO.....	126
5.5.1 Análisis del efecto del nanocomposito en la reología.....	126
5.5.2 Resultados de las pruebas de viscosidad.....	128
5.5.3 Análisis del efecto del nanocomposito en la pérdida de filtrado.....	134
5.5.4 Pruebas de envejecimiento.....	139
5.6 ANÁLISIS DE COSTOS.....	143

6. CONCLUSIONES	146
7. RECOMENDACIONES	148
BIBLIOGRAFIA	149
ANEXOS	153

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Respuesta de un fluido confinado ante un esfuerzo.	24
Figura 2. Fuerza de repulsión de las partículas.	25
Figura 3. Fuerza de cohesión y adhesión de las partículas.	26
Figura 4. Aplicación de un esfuerzo de corte y posterior deformación del fluido. ..	33
Figura 5. Perfil del esfuerzo aplicado a un fluido.	34
Figura 6. Movimiento relativo entre capas de un fluido.	34
Figura 7. Tipos de Geles.	36
Figura 8. Grafito conformado por el apilamiento de láminas de grafeno.	46
Figura 9. Estructura plana hexagonal del grafeno.	48
Figura 10. Lámina de óxido de grafeno.	54
Figura 11. Estructura de la molécula del fullereno.	58
Figura 12. Nanotubo de carbono.	60
Figura 13. Estructura del óxido de silicio.	62
Figura 14. Estructuras del Óxido de silicio cristalino y amorfo.	63
Figura 15. Matriz en cruz para pruebas con Nanocompositos.	102
Figura 16. Grafito tamizado en malla de 40 micrones.	105
Figura 17. Grafito oxidado a 12 horas.	107
Figura 18. Efecto del peróxido de hidrógeno en el óxido de grafito.	108
Figura 19. Efecto del agua fría en el óxido de grafito.	108
Figura 20. Óxido de grafeno.	108
Figura 21. Espectros FTIR de O.G.	111
Figura 22. Espectro Raman.	112
Figura 23. Patrones de DRX de grafito, O.G, grafito.	113
Figura 24. La exploración ancha de XPS de RGO y de G-PUF; c y d) XPS de alta resolución de C1S y N1s de RGO y G-PUF, respectivamente.	113
Figura 25. a, b, c y d. Micrografías TEM de O.G.	114
Figura 26. Viscosidad en función de la concentración de O.G.	117

Figura 27. Yield Point en función de la concentración de O.G.....	119
Figura 28. Viscosidad en función de la concentración de O.S.	120
Figura 29. Punto Cedente en función de la concentración de O.S.	121
Figura 30. Tortas del filtrado con O.S a diversas concentraciones.	122
Figura 31. Tortas del filtrado con O.S a diversas concentraciones.	123
Figura 32. Pérdida de filtrado en función de la concentración de O.S.	123
Figura 33. Control prueba de filtrado durante sus 30 Minutos.	125
Figura 34. Variación del esfuerzo de corte con O.G constante.....	127
Figura 35. Variación del esfuerzo de corte con O.S constante.	128
Figura 36. Viscosidades para concentración fija de O.S.....	129
Figura 37. Viscosidades para concentración fija de O.G.	131
Figura 38. Variación de los geles con O.S constante.	133
Figura 39. Variación de los geles con O.G constante.	134
Figura 40. Variación yield point con Nanocomposito.	134
Figura 41. Tortas de la pérdida de filtrado del nanocomposito.	135
Figura 42. Tortas de la pérdida de filtrado del nanocomposito.	136
Figura 43. Perdida de filtrado API vs concentración de Nanocomposito.	137
Figura 44. Pérdida del filtrado con el O.G constante.	138
Figura 45. Pérdida de filtrado con el O.S constante.....	139
Figura 46. Viscosidad plástica para pruebas de envejecimiento.....	141
Figura 47. Punto cedente para pruebas de envejecimiento.	141
Figura 48. Reogramas para lodo base envejecido.....	142
Figura 49. Reogramas para lodo con Nanocomposito envejecido.....	143

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resumen investigaciones O.G y O.S en fluidos de perforación.....	89
Tabla 2. Identificación y Definición de variables.	95
Tabla 3. Concentraciones O.G y datos a obtener en laboratorio.	96
Tabla 4. Concentraciones O.S y datos a obtener en laboratorio.....	96
Tabla 5. Concentraciones nanomaterial y toma de datos prueba de filtrado.	96
Tabla 6. Concentraciones O.G y datos obtenidos con resultados de laboratorio...	97
Tabla 7. Concentraciones O.S y datos obtenidos con resultados de laboratorio...	97
Tabla 8. Pruebas de compatibilidad.....	98
Tabla 9. Cantidad de aditivo usado en pruebas de compatibilidad.	99
Tabla 10. Cantidad de nanocomposito usado en pruebas de compatibilidad.	99
Tabla 11. Formato para observaciones de pruebas de compatibilidad.....	100
Tabla 12. Formulación de lodo para prueba con Nanocomposito.....	101
Tabla 13. Pruebas que realizar con Nanocomposito.	102
Tabla 14. Registro y control propiedades reológicas para fluido con nanocomposito.....	103
Tabla 15. Registro propiedades filtrado para fluido con nanocomposito.....	103
Tabla 16. Registro y control propiedades reológicas para fluido envejecido con nanocomposito.....	104
Tabla 17. Datos de reología obtenidos en laboratorio para O.G.....	116
Tabla 18. Datos de pruebas de laboratorio procesados para O.G.....	116
Tabla 19. Porcentaje de la variación de VP y YP para el O.G.	118
Tabla 20. Datos obtenidos en laboratorio para O.S.	119
Tabla 21. Datos obtenidos para O.S con resultados de laboratorio.....	120
Tabla 22. Porcentaje de la variación de VP y YP para el O.S.....	122
Tabla 23. Concentración O.S y datos de prueba de filtrado.....	122
Tabla 24. Porcentaje de reducción de pérdidas de filtrado con O.S.	124
Tabla 25. Seguimiento a diferentes tiempos de prueba filtrado API para O.S.	125

Tabla 26. Resultados Reología Pruebas con Nanocomposito.	126
Tabla 27. Porcentaje de variación de la VP y YP con el O.S constante.	130
Tabla 28. Porcentaje de variación de la VP y YP con el O.G constante.	132
Tabla 29. Resultados prueba de filtrado con Nanocomposito.	135
Tabla 30. Resultados en reología para lodo envejecido con contenido de Nanomaterial.	140
Tabla 31. Resultados en reología para lodo base envejecido.	140
Tabla 32. Costos asociados a la investigación.	144
Tabla 33. Costo final de Nanomateriales.	144
Tabla 34. Costos de obtener un barril de lodo.	145

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Datos obtenidos de pruebas de compatibilidad.....	153
Anexo B. Tablas evaluación de costos de la investigación.....	172

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS COMPUESTOS (NANOCOMPOSITOS) BASADOS EN GRAFENO, SOBRE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS EN FLUIDOS DE PERFORACIÓN*

AUTORES: MIGUEL ANDRÉS ACOSTA PÁEZ, WILMER MIGUEL RAMÍREZ DIÁVILA**

PALABRAS CLAVES: Fluido de perforación, Nanotecnología, Nanocomposito, Óxido de Grafeno, Óxido de Silicio, Propiedades Reológicas, Filtrado API.

DESCRIPCIÓN:

El grafeno es un material relativamente nuevo para el hombre el cual ha demostrado tener potenciales aplicaciones gracias a sus características y su nanoestructura en forma de láminas que posee tan solo un átomo de carbono de espesor, de este se deriva el óxido de grafeno que en su mayoría contiene las mismas propiedades gracias a que la relación entre el área superficial de este y su volumen es supremamente alta, es por eso que las aplicaciones en los lodos de perforación han favorecido sus propiedades principalmente las reológicas, debido a las interacciones entre sus partículas que generan mayores esfuerzos de corte.

La presente investigación plantea la aplicación de un nanocomposito formado por óxido de grafeno y óxido de silicio el cual este último ha tenido un amplio recorrido investigativo como agente taponador en las áreas donde se presenta la pérdida de filtrado, en un fluido de perforación base agua, con el fin de evaluar el comportamiento reológico y de filtrado del sistema compuesto, comparándolo con el desempeño por separado que tendrían los nanomateriales comprendidos en el sistema, y así exponer sus nuevas propiedades reológicas y de filtrado.

Se realizaron pruebas de reología y filtrado para evaluar los efectos del óxido de grafeno y óxido de silicio determinando una concentración óptima de cada uno, de acuerdo con su desempeño para formar el nanocomposito, este obtuvo propiedades reológicas que se vieron inhibidas por el óxido de silicio, aunque en las pruebas de filtrado se conservó esta propiedad a lo largo de todas las pruebas.

* * Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico- Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Ph. D. Emiliano Ariza León

ABSTRACT

TITLE: COMPOUND SYSTEMS ASSESSMENT (NANOCOMPOSITES) BASED ON GRAPHENE, ON THE RHEOLOGICAL PROPERTIES IN PERFORATION FLUIDS*

AUTHORS: MIGUEL ANDRÉS ACOSTA PÁEZ, WILMER MIGUEL RAMÍREZ DIÁVILA**

KEYWORDS: Drilling Fluid, Nanotechnology, Nanocomposite, Graphene Oxide, Silicon Oxide, Rheological Properties, API Filtering.

DESCRIPTION:

Graphene is a relatively new material for man, which has been shown to have potential applications due to its characteristics and its nanostructure in the form of sheets that have only one carbon atom in thickness, from which the graphene oxide is derived and most of them contain the same properties due to the relation between the surface area of it and its volume, which is very high, that is why the applications in the drilling muds have favored their properties, mainly the rheological ones, due to the interactions between their particles that generate greater cutting efforts.

The present investigation proposes the application of a nanocomposite formed by graphene oxide and silicon oxide, which the latter has had an extensive investigative journey as a clogging agent in the areas where loss of filtrate occurs, in a water-based drilling fluid, in order to evaluate the rheological and filtering behavior of the composite system, comparing it with the separate performance that would have the nanomaterials included in the system and thus exposing its new rheological and filtering properties.

Rheology and filtering tests were carried out to evaluate the effects of graphene oxide and silicon oxide, determining an optimum concentration of each one according to its performance to form the nanocomposite, this obtained rheological properties that were inhibited by silicon oxide, although in the filtering tests this property was preserved throughout all the tests.

* * Degree Work

** Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Petroleum Engineering. Director: Ph. D. Emiliano Ariza León

INTRODUCCIÓN

En una industria como la de los hidrocarburos, específicamente en las operaciones de perforación, es de gran importancia la evaluación e innovación de procesos que se realicen con el fin de optimizar tiempo, costos y sobre todo brindar la seguridad que especialmente requiere esta operación. Una parte fundamental de esta área es el lodo de perforación y los esfuerzos continuos que se hacen para mejorar sus propiedades, debido a que este es el encargado del soporte del pozo, arrastre de recortes, suspensión de sólidos, entre otros. En la actualidad se tiene una amplia gama de productos químicos que satisfacen las necesidades al preparar diferentes lodos de acuerdo con los requerimientos de cada pozo y las formaciones perforadas, como por ejemplo viscosificantes y dispersantes, sin embargo, desde hace tiempo se han venido realizando investigaciones con material nanoparticulado, con el fin de reforzar las propiedades necesarias para llevar a cabo las funciones de estos fluidos, además de promover la aplicación e innovación tecnológica de esta área a la ingeniería de lodos.

Una alternativa para introducir la nanotecnología aplicada a los lodos de perforación es la incorporación de nanopartículas que debido a su tamaño y forma intervienen de manera positiva en el mejoramiento de las principales propiedades como lo son la reología y el control en las pérdidas de filtrado, debido a las interacciones físico-químicas entre estas y los diversos aditivos utilizados en la formulación del fluido, es el caso del óxido de grafeno (O.G) que por su geometría en forma de lámina hace un aporte a las propiedades reológicas del lodo y su espesor de tamaño atómico contribuye a que se multipliquen las interacciones entre esta nanopartícula y las capas constituidas dentro del fluido cuando este fluye. Otra nanopartícula que ha incursionado dentro de las investigaciones con lodos de perforación es el óxido de silicio (O.S) del cual se han obtenido resultados prometedores cuando se han evaluado las propiedades de filtrado ya que por su forma y tamaño nanométrico se

le facilita actuar como un agente taponador en aquellas áreas de la formación donde los aditivos tradicionales no logran llegar.

La presente investigación muestra la evaluación realizada a un lodo de perforación base agua cuando a este se le adicionó un nanocomposito constituido por partículas nanométricas de óxido de grafeno y óxido de silicio como material de refuerzo, dicha evaluación se realizó tanto a nivel teórico como a nivel experimental, teniendo en cuenta que la principal propiedad evaluada fue la reología, sin embargo, para completar de una manera más eficiente la investigación y así obtener un mayor alcance, paralelamente se evaluaron las propiedades de filtrado.

Estos nanomateriales arrojaron como resultados mejoras visibles en propiedades del lodo al momento de su evaluación por separado, llevando a plantear una serie de concentraciones para la evaluación como nanocomposito, donde en algunos casos hubo mejora de las propiedades evaluadas mientras que en otros sucedió lo contrario. La investigación también abarcó la síntesis del óxido de grafeno requerido para la elaboración de la parte experimental, por lo que cuando se realizó un análisis de costos aproximados para llevar a cabo la investigación se encontró que la mayor parte de gastos se hayan en dicha síntesis dado que este proceso es extenso y complejo, además los reactivos y equipos utilizados son de alto costo económico.

1. GENERALIDADES SOBRE LODOS DE PERFORACIÓN

La ingeniería de lodos dentro del mundo de la industria del petróleo hace parte del proceso vital en las operaciones de perforación, donde hay un trabajo constante en la búsqueda de mejoras continuas de los lodos de perforación. Esto debido a que de este fluido depende en gran parte el éxito de una buena terminación del pozo y si se tiene un lodo inapropiado como consecuencia se tendrán problemas y tiempos no productivos (NPT) que a su vez generan costos adicionales al proceso.

1.1 OPTIMIZACIÓN DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN¹

El objetivo básico de la optimización de perforación es lograr el mayor grado de eficiencia posible bajo condiciones implícitas o específicas. La optimización de la perforación es el proceso lógico de analizar efectos e interacciones de las variables pertenecientes a la perforación a través del modelamiento matemático con el fin de alcanzar la mayor eficiencia en el proceso que se realiza, la cual se refleja en una reducción de tiempos de trabajo que se traduce también en una reducción de costos asociados. El proceso también implica una post-evaluación de la efectividad de las variables de control seleccionadas, las cuales incluyen tipo de lodo, propiedades necesarias en el lodo para cada intervalo, hidráulica, tipo de broca y velocidad de rotación. También se debe crear espacios para cierta flexibilidad en el programa con el fin de permitir cambios técnicos guiados por la experiencia del personal a cargo de las operaciones a la hora de encontrar y solucionar ciertos problemas que surgen a medida que se avanza, los cuales son problemas no esperados y por tanto de mucho cuidado.

¹ LUMMUS, James, AZAR, Jamal., Drilling Fluids Optimization: A Practical Field Approach. California.: Pennwell Corporation, 1986.

El primer registro de utilización de un fluido que no fuera agua para las operaciones de perforación rotativa data del año 1901, cuando los perforadores bombearon lodo extraído de piletas naturales de reserva en el pozo durante su perforación, de este fluido no se tiene conocimiento alguno de las propiedades que se obtuvieron.

El término lodo reapareció aproximadamente 13 años después cuando se utilizó un fluido cargado de lodo natural, definido como una mezcla de agua y cualquier material arcilloso suspendido en agua durante un tiempo considerable.

Para los años de 1940 los esfuerzos fueron concentrados en la composición y control del lodo. El objetivo principal que se tenía era la perforación rápida, completamiento y la puesta en marcha de la producción del pozo.

Para los años de 1950, el enfoque fue la evaluación de los productos usados en la obtención del lodo y así hallar una mayor efectividad en las propiedades del fluido de perforación, tales como la viscosidad y pérdida de filtrado, así fue como se comenzó a relacionar las diferentes propiedades del lodo de perforación con una buena terminación del pozo.

A finales de la década de los 50, se llegó al punto de mantener las propiedades del fluido en ciertos límites específicos con el uso de los diferentes productos disponibles en la locación. A pesar de esto se pudo observar que, aun teniendo bajo control de las propiedades del lodo, estas se veían afectadas negativamente tras la interacción con las diferentes formaciones. De ahí la idea que “lodos perfectos no necesariamente significan pozos perfectos” impulsó a los ingenieros a desarrollar un mejor entendimiento de la relación de la química de lodos y el comportamiento del pozo.

En 1959, con una serie de 100 pozos perforados, se demostró que al reducir el porcentaje en volumen de sólidos del lodo, se obtenía una mayor eficiencia en la

tasa de perforación, cantidad de brocas y días del aparejo; lo cual se veía reflejado en los costos finales de la operación.

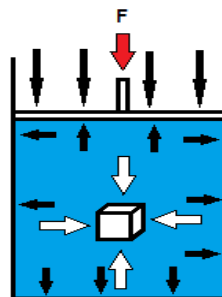
La optimización de los fluidos de perforación ha ocupado un ítem de gran valor e importancia desde sus principios hasta los días de hoy, requiriendo en el Ingeniero de lodos un total entendimiento de sus propiedades, efectos asociados al interactuar con el medio y como lograr una mejora continua. Así se puede garantizar el seguimiento del plan de perforación inicial y a su vez estar preparado para posibles inconvenientes no previstos inicialmente, que pueden comprometer la realización del proyecto en su totalidad.

1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Para una mayor comprensión del tema, a continuación, se tratará la definición de fluido y así mismo fuerzas y movimientos característicos de estos.

Un fluido es una sustancia o medio continuo que se deforma continuamente en el tiempo ante la aplicación de una tensión tangencial sin importar la magnitud de esta. Desde el punto de vista de la ingeniería, uno de los más interesantes lo constituye aquel que considera el comportamiento (**Figura 1**) de los elementos frente a situaciones especiales. De esta forma lo que define al fluido es su comportamiento y no su composición.

Figura 1. Respuesta de un fluido confinado ante un esfuerzo.



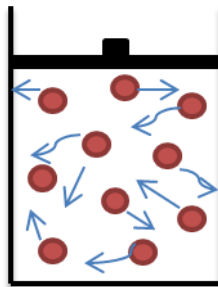
Fuente: Autores

Los fluidos reaccionan de una manera característica a las fuerzas aplicadas sobre este. Si se compara lo que le ocurre a un sólido y a un fluido cuando son sometidos a un esfuerzo de corte o tangencial se tienen reacciones características que se pueden verificar experimentalmente y que permiten diferenciarlos.

1.2.1 Movimientos y fuerzas internas de los fluidos²

Fuerzas de Repulsión: Las fuerzas de repulsión son choques caóticos y al azar siendo el resultado de la energía cinética que poseen las partículas y que las mantienen en constante movimiento como se observa en la **Figura 2**. La magnitud de este movimiento depende de la temperatura y presión a la que se encuentre la sustancia, generando un aumento de la viscosidad para el caso de los gases. El estado de agregación de una sustancia, bajo unas determinadas condiciones de temperatura y presión, es el resultado de la relación entre las fuerzas de atracción (cohesión) y las fuerzas de repulsión. Dichas fuerzas son elevadas en los gases, en los líquidos es casi despreciable y en los sólidos es cero. En los gases hay repulsiones fuertes a separaciones pequeñas. Por lo general estas fuerzas son de baja magnitud en los líquidos, pero de gran proporción en los gases.

Figura 2. Fuerza de repulsión de las partículas.



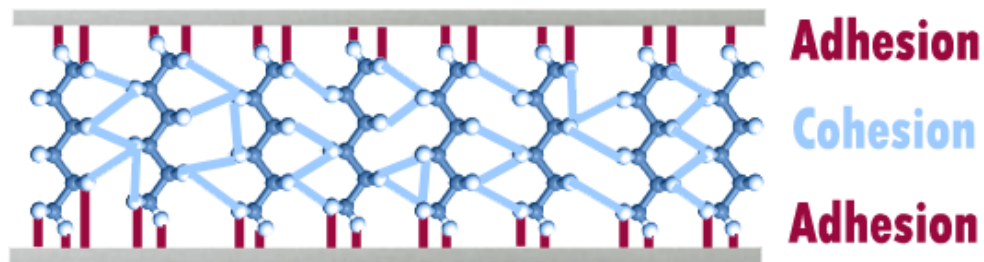
Fuente: Autores

² MOTT, Robert., Mecánica de Fluidos. Sexta Edición.: Pearson Educación de México, 2006.

Fuerzas de Cohesión: Son fuerzas intermoleculares entre moléculas de una misma sustancia o sustancias similares, la cual es la atracción que se ejerce entre las moléculas de un mismo cuerpo. En los sólidos la fuerza de tensión es muy fuerte, en los líquidos es poca y en los gases es despreciable. Para el caso de los líquidos, esta fuerza forma una serie de láminas que se apilan formando un volumen, y tienen la capacidad de deslizarse una sobre otra, y debido a esto es que los líquidos pueden tomar la forma del recipiente que los contiene, a diferencia de los sólidos.

En un líquido puro en reposo, las moléculas individuales están constantemente en movimiento. Sin embargo, a su estrecha cercanía, el movimiento está bastante restringido a una vibración de cada molécula dentro de una caja formada por sus vecinos más próximos (**Figura 3**).

Figura 3. Fuerza de cohesión y adhesión de las partículas.



Fuente: Tomado de www.losadhesivos.com/adhesion.html

Fuerzas de Adhesión. La adhesión es la propiedad de la materia por la cual se unen y plasman dos superficies de sustancias iguales o diferentes cuando entran en contacto la una con otra, y así manteniéndose unidas. Esta fuerza es de gran proporción en el agua, debido a esto es que el agua tiene una alta capacidad de mojar (**Figura 3**).

Movimiento Vibracional. Es el movimiento de cada una de sus moléculas con respecto a las otras (vibraciones individuales). En este tipo de vibración, los enlaces

de las moléculas se estiran, contraen y deforman de manera que la estructura oscila alrededor de la configuración más estable. Estas vibraciones en gran parte se deben a la energía que posee cada molécula que conforman la sustancia, pudiendo aumentar o disminuir mediante alteraciones de temperatura y presión.

Movimiento Rotacional. El movimiento rotacional de un flujo puede ser expresado en función de la vorticidad o rotación que experimentan las partículas de este. La vorticidad luego permite definir el concepto de flujo rotacional y sus consecuencias. Donde la vorticidad de un fluido es igual al movimiento rotacional de cuerpo rígido del mismo.

Movimiento Traslacional. Es el movimiento de toda la molécula (específicamente su centro de gravedad) en el espacio que lo contenga, esta se mueve de un lugar a otro, gracias a que las fuerzas de atracción en los líquidos son de magnitud intermedia, facilitando el deslizamiento entre sí de sus moléculas. Los fluidos de perforación pueden dividirse en tres categorías principales, las cuales pueden ser: fluidos neumáticos, fluidos base agua y fluidos base aceite.

1.2.2 Fluidos neumáticos.³ Estos fluidos pueden ser a base de aire o gas, y generalmente se emplean en zonas donde las presiones de formación son bajas. Una ventaja de estos fluidos es que se puede apreciar un aumento en la tasa de penetración, esto debido a las altas presiones que manejan al salir de la broca y por lo tanto tienden a arrancar recortes de roca presentes por delante. Entre los factores a tener en cuenta es su uso preferiblemente en formaciones que contengan gas, además no es recomendable su trabajo a grandes profundidades ya que el volumen necesario para levantar los ripios es bastante grande y se requerirán equipos de superficie de gran capacidad.

³ M-I & SWACO, 2001. Drilling Fluids Engineering Manual. Houston, Texas.

1.2.2 Fluidos base Agua.⁴ Son los fluidos de perforación generalmente más usados. Por lo general son fáciles de construir ya que su base es agua y usualmente se encuentra disponible en cantidades considerables, además de poder dar solución con ellos a la mayoría de los problemas presentes en una perforación. Para mayor comprensión de estos fluidos, se pueden subdividir en: lodos inhibidos, lodos no inhibidos y lodos poliméricos.

Inhibidos. Son aquellos lodos que retardan el hinchamiento de las arcillas y logran la inhibición por la presencia de cationes, generalmente Potasio (K⁺), Sodio (Na⁺) y Calcio (Ca⁺⁺); una combinación proporciona mayor grado de inhibición en la dispersión de arcillas. Estos lodos se utilizan generalmente en formaciones que contienen arenas y arcillas hidratables, donde un buen control de estas puede reducir los costos al no tener que usar un fluido inhibidor externo.

No Inhibidos. Son aquellos que no suprimen significativamente el hinchamiento de arcillas. Sólidos nativos pueden dispersarse en el sistema hasta que las propiedades reológicas no puedan seguir siendo controladas agregando más agua. Estos lodos son compuestos por bentonitas comerciales o arcillas nativas con un poco de soda caustica para el control del pH.

Poliméricos. Aquellos que se basan en las macromoléculas, ya sea con o sin interacciones de arcillas, estos fluidos pueden ser inhibidos o no inhibidos dependiendo si el catión inhibidor se utiliza. Los fluidos poliméricos pueden ser utilizados para viscosificar el lodo, control de propiedades de filtración, desfloculando o encapsulando sólidos. Estos fluidos también tienen sus limitaciones, los sólidos son de gran amenaza cuando se trabaja con estos fluidos.

⁴ Ibid., p. 26.

1.2.3 Fluidos base Aceite.⁵ El principal uso de estos fluidos es perforar formaciones duras y mejorar la estabilidad del agujero. Debido a su alto grado de lubricidad y capacidad de evitar la hidratación de las arcillas. También son seleccionados para casos especiales, como lo son las altas temperaturas, altas presiones, daños y minimizar el daño a la formación en la toma de núcleos. Además, son resistentes a los contaminantes tales como sal, anhídrita, CO₂ y gases ácidos (H₂S).

El costo es parte importante en su selección, el costo por barril de un lodo base aceite es muy elevado en comparación con un sistema de lodo convencional a base de agua. Sin embargo, los lodos base aceite pueden ser reacondicionados y reutilizados, además la política de recompra para el aceite usado en lodos puede hacerla una alternativa atractiva en situaciones donde el uso de lodos base agua limita el éxito de perforación y/o terminación de un pozo. Los costos de contención, transporte y eliminación pueden aumentar los costos de usar estos fluidos. Otra limitante es la prohibición o restricciones severas en muchas áreas, esto debido al aumento de las preocupaciones ambientales.

1.3 FUNCIONES DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN⁶

El Instituto Americano del Petróleo (API) define un fluido de perforación como “un fluido circulante usado en perforación rotaria para realizar cualquiera o todas las funciones requeridas en una operación de perforación”. Siguiendo la definición dada por James L. Lummus⁷ "un fluido de perforación óptimo es aquel en que la velocidad de flujo necesaria para limpiar el pozo resulta en la potencia hidráulica adecuada para limpiar la broca a un peso y velocidad de rotación impuesta para dar el menor costo, siempre que esta combinación de variables se cumpla, dará como resultado un pozo estable que cumple los criterios de evaluación de la formación, alcanzando

⁵ *Ibíd.*, p. 26.

⁶ IMCO: Tecnología Aplicada de Lodos. Imco Services: Una compañía Halliburton. Houston, Texas.

⁷ LUMMUS, James, AZAR, Op.Cit., p.

el objetivo deseado”. Las definiciones anteriores se quedan cortas al exponer la variedad de funciones que cumple en el proceso de perforación, por tal motivo se hace necesario definir cada una de las principales funciones que cumple este fluido.

Transporte de recortes y derrumbes a superficie. A medida que la broca va realizando su trabajo, genera recortes de roca los cuales pueden variar en su forma, tamaño y peso. Estos recortes por efectos de la gravedad tienden a precipitar al fondo y es ahí donde el lodo gracias a su viscosidad puede tomar esos recortes y sacarlos a la superficie. Dado que el fluido en el espacio anular circula hacia arriba, la velocidad a la cual las partículas son elevadas es la diferencia entre la velocidad anular y la velocidad de caída de los recortes o derrumbes. Si el pozo no se limpia de forma adecuada, el material sólido se acumulará en el fondo del pozo; lo que puede generar atascamiento de la broca, aumento en la torsión, tubería aprisionada y pérdida de circulación los cuales causan inconvenientes a la hora de perforar un pozo.

Mantener en suspensión sólidos cuando se detiene la circulación. Cuando el lodo no está circulando, la fuerza de elevación por el flujo de lodo ascendente es eliminada; los recortes y derrumbes que se encontraban en camino a superficie tenderán a caer al fondo, esto es controlado con la propiedad tixotrópica del lodo la cual consiste en formar una estructura tipo gel cuando no está fluyendo, que encapsula los recortes y puede recuperar su fluidez cuando se reinicia la circulación de nuevo.

Control de presiones de fondo. El agua, el gas y el petróleo que se encuentran en el subsuelo están bajo gran presión debido a la carga litostática, que por compactación reduce el espacio poroso donde se encuentran dichos fluidos y en consecuencia el aumento de presión. Con el fluido de perforación se crea una columna hidrostática que mantiene controladas las presiones de fondo, y así evitar un flujo incontrolado hacia el pozo y después a superficie, también se debe tener

presente no generar una presión muy superior a la de fondo ya que se puede fracturar la formación e incurrir en pérdidas de circulación. La presión hidrostática es directamente proporcional a la densidad del lodo y a la altura de la columna de lodo.

Enfriar y lubricar la broca y la sarta de perforación. A la hora que la broca avanza raspando el fondo del pozo y la sarta roza con las paredes del pozo, se genera calor debido a la fricción entre el metal y la roca; el fluido de perforación desempeña la función de absorber este calor y llevarlo a la superficie, mediante su circulación. El fluido también se desempeña como lubricante, esto debido a las emulsiones que forma con la barita y la cual disminuye el coeficiente de fricción entre la broca, tubería y paredes del pozo, viéndose reflejado en menores temperaturas producidas en fondo; en ocasiones se agregan materiales al lodo para tal fin, y poder crear beneficios tales como alargar la vida de la broca y sarta, una torsión y arrastre disminuidos y menor presión de bombeo.

Dar sostén a las paredes del pozo. Al momento de perforar el pozo se va extrayendo material de las diferentes formaciones, retirando el apoyo lateral que ofrecen las paredes del pozo. A menos que ese apoyo sea sustituido, las paredes se derrumbarán causando taponamiento y pegadas de los equipos de perforación; el fluido de perforación brinda la solución para esta situación, donde este ejerce una presión igual en todas las direcciones de la cara del pozo. La densidad es la variable encargada de esta función y entre más débil sea la formación más densa deberá ser el lodo, además debe tener la capacidad de formar una capa delgada pero resistente de partículas sobre las paredes del pozo, que también ayudan al sostén de sus paredes.

Apoyo del peso sobre la torre, mediante la suspensión de la sarta y del revestimiento. La torre de perforación es susceptible a tener que soportar grandes pesos cuando se mete o saca tubería dentro del pozo y más si se trabaja a grandes

profundidades. Esas tuberías están parcialmente sostenidas por el empuje que les ejerce el lodo, también llamado factor de flotación, la cual es definido como la fuerza neta en dirección hacia arriba que es igual a la suma del peso del fluido desplazado por el volumen del cuerpo u objeto sumergido. La presión ascendente depende de la presión ejercida por el fluido y la sección transversal sobre la cual la presión se ejerce.

Transmisión de potencia hidráulica sobre la formación. En el proceso de circulación del lodo, este es expulsado a grandes velocidades por las boquillas de la broca, encargándose de la limpieza de esta y así no seguir triturando los recortes viejos que pueden hacer embotar la broca y disminuir la tasa de perforación. Otra ventaja en formaciones no muy duras es que, al salir los chorros tipo jet, la potencia de estos ayuda a socavar el fondo, haciendo algo más fácil el trabajo de la broca y así aumente su vida útil. En situaciones especiales la fuerza hidráulica del lodo se emplea también para hacer girar la broca. La broca está conectada a un motor hidráulico en el fondo del pozo, este método se utiliza a menudo para lograr una perforación direccional.

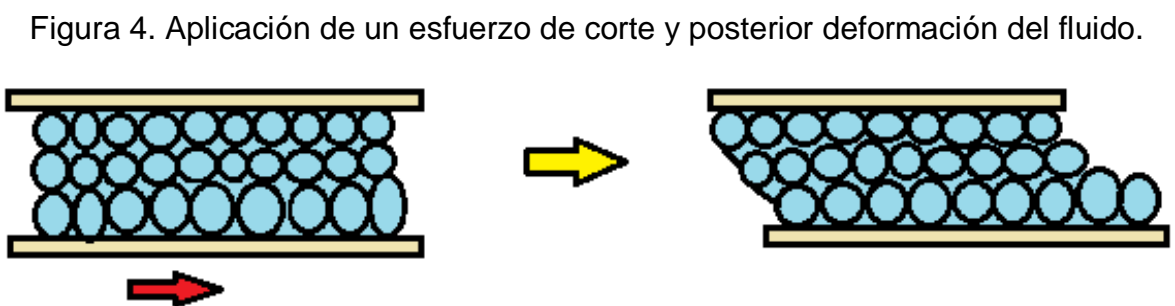
Medio adecuado para realizar los registros a pozo. En ocasiones la invasión de fluido de perforación a la formación productora causa ciertos daños en su productividad, pero se hacen necesarios en la toma de registros del hueco para su evaluación. Para esto se requiere que el lodo sea buen conductor de electricidad y que presente características diferentes a la de los fluidos de formación y así no generar confusiones en la interpretación de dichos registros.

1.4 REOLOGÍA EN LODOS DE PERFORACIÓN

Reología e hidráulica son términos de ingeniería que describen el comportamiento de fluidos en movimiento, encargados del estudio de la manera en que la materia se deforma y fluye. Donde relaciona el esfuerzo de corte, velocidad de corte y el

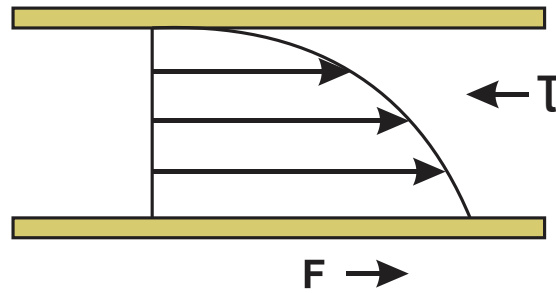
impacto de fluidos en tuberías y así poder predecir la manera como fluiría bajo ciertas condiciones. Las propiedades de flujo de un lodo deben ser controladas si se pretende que se comporte de forma apropiada a la hora de cumplir sus múltiples funciones. Una de las funciones más importantes es la relacionada con la viscosidad, donde su control se hace primordial, y es definida como la relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte para un fluido determinado, y donde la reología es la encargada del estudio de dicha relación. El entendimiento de los términos tensión o esfuerzo de corte y velocidad de corte, hará más fácil apreciar y comprender la relación de estos con el flujo de los fluidos de perforación, haciéndose importantes a la hora de fluir por las diferentes tuberías y orificios presentes en el proceso de circulación a fondo de pozo y su posterior regreso con recortes a superficie.

1.4.1 Tensión o esfuerzo de corte (τ). Fuerza de resistencia que una capa individual ofrece al deslizamiento de las capas vecinas, al momento de aplicar una fuerza por unidad de superficie sobre ella. En este caso, sobre el área de deslizamiento se produce un esfuerzo cortante, o tangencial, o de cizalladura. Al aplicar una fuerza en una de las caras del fluido, se rompe su estado de reposo, las partículas al tener movilidad se transmiten este esfuerzo capa tras capa. En la proximidad de la pared sólida el esfuerzo cortante será máximo, y disminuirá progresivamente a medida que se aleja de esta. Las **Figuras 4 y 5** describen lo anterior.



Fuente: Autores

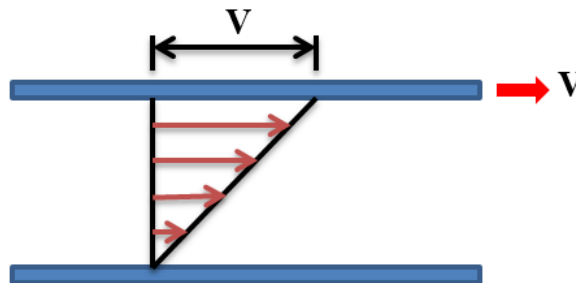
Figura 5. Perfil del esfuerzo aplicado a un fluido.



Fuente: Autores

1.4.2 Velocidad de corte. Velocidad relativa con la cual una capa individual se mueve con respecto a las otras capas vecinas (**Figura 6**), al momento de aplicar una fuerza por unidad de superficie sobre ella. Depende de la velocidad promedio del fluido de perforación en la sección que está atravesando en ese momento. Además, es de aclarar que la tensión de corte depende de la velocidad de corte.

Figura 6. Movimiento relativo entre capas de un fluido.



Fuente: Tomado y modificado de www.fisica.laguia2000.com/dinamica-clasica/dinamica-de-una-particula/flujo-laminar

1.4.3 Propiedades controladas por la reología⁸. El control de las propiedades reológicas en un fluido de perforación toma un papel importante en el proceso de perforar un pozo; ya que con esto se podrá monitorear y trabajar sobre márgenes

⁸ IMCO: Tecnología Aplicada de Lodos. Imco Services: Una compañía Halliburton. Houston, Texas. M-I & SWACO, 2001. Drilling Fluids Engineering Manual. Houston, Texas.

permisibles a la hora de llevar un control estricto sobre las funciones del lodo y con qué grado de eficiencia se están ejecutando, y así mismo poder tener parámetros de referencia por si se requieren modificaciones sobre el fluido. El ingeniero al observar un cambio en las propiedades puede inferir ciertos problemas o contaminante presentes, y así poder tomar decisiones oportunas en aras del éxito de las operaciones de perforación. Todas estas evaluaciones se hacen posible gracias a la obtención de datos en laboratorio mediante un viscosímetro Fann.,

1.4.3.1 Viscosidad Efectiva. La viscosidad de un fluido no newtoniano cambia con el esfuerzo cortante, por lo que la viscosidad efectiva se toma como la viscosidad a unas condiciones específicas. Incluyen velocidad de corte, presión y temperatura.

1.4.3.2 Viscosidad Aparente. En ocasiones es definida como viscosidad efectiva, o también se define como la viscosidad que tuviese un fluido regido por modelo newtoniano.

$$VA [cP] = \Theta 600 / 2$$

1.4.3.3 Viscosidad Plástica. Es la resistencia al flujo por resistencia mecánica, causado por la interacción entre partículas sólidas que principalmente son agregadas al lodo en su elaboración y/o recogidas durante la limpieza del pozo. La reducción en tamaño de las partículas o un cambio en su forma pueden dar como resultado un aumento en la viscosidad plástica. Es importante tener bajo control esta viscosidad, siendo una de las encargadas de la limpieza del agujero y parte del arrastre de recortes. Entre las soluciones para su buen manejo, están el control efectivo de sólidos y dilución.

$$VP [cP] = \Theta 600 - \Theta 300$$

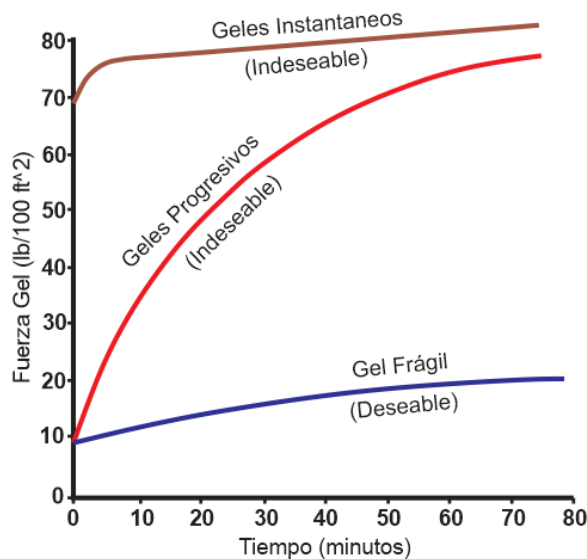
1.4.3.4 Punto Cedente o Yield Point. Es una medida de la resistencia al flujo causada por las fuerzas electroquímicas o de atracción entre las partículas que hacen parte del fluido de perforación, bajo condiciones dinámicas de flujo.

Contaminantes como sal, cal y anhídrita hacen que esta medida aumente. En general, todo lo que hace flocular al lodo aumenta el punto cedente. Dispersantes, dilución o control de sólidos son alternativas para el manejo de esta propiedad.

$$YP [Lb/100 ft^2] = \Theta 300 - VP$$

1.4.3.5 Resistencia de Gel. Propiedad también llamada Tixotropía y es una medida de la resistencia al flujo causada por las fuerzas electroquímicas o de atracción entre las partículas que hacen parte del fluido de perforación, bajo condiciones estáticas de flujo. Cuando el esfuerzo de corte es cero o cercano a cero, partículas cargadas eléctricamente o polímeros especiales se enlazan entre sí para formar un gel semirrígido o rígido. Un amplio margen entre la lectura inicial de gel (10 segundos) y la lectura a 10 minutos se denomina gel progresivo, que es un indicativo de acumulación de sólidos. Si la lectura inicial y la lectura de 10 minutos son ambas elevadas, con pequeña diferencia entre ellas, se tiene un gel instantáneo, lo que indicaría floculación. Lo expuesto en los dos casos anteriores es no deseable, donde un gel frágil (**Figura 7**) es lo óptimo para la operación de perforación.

Figura 7. Tipos de Geles.



Fuente: Manual de fluidos M-I & SWACO

1.5 PROPIEDADES DE FILTRADO⁹

Las propiedades de filtrado del lodo de perforación son de importante seguimiento y optimización, ya que muestran la película delgada (revoque o torta) y su calidad tal como plasticidad, consistencia y espesor adecuado para soportar las condiciones internas del pozo, además esta capa se encarga de impedir que el fluido no se pierda en las formaciones lo suficientemente permeables para generar pérdidas significativas del fluido, las cuales acarreen con costos elevados por el hecho de tener que reponer este fluido perdido con otro nuevo y con probabilidades de problemas para el equipo de perforación, pues si la columna hidrostática se está perdiendo igualmente lo hará la presión hidrostática ejercida, corriendo el riesgo de que la presión de la formación supere la del pozo y se provoque su venida (reventón de pozo).

Para que ocurra la generación de la torta, es necesario contar con un material sólido que se deposite en las paredes, en la mayoría de lodos base agua el sólido encargado de esta labor es la bentonita; también debe haber una presión diferencial la cual será originada por la columna hidrostática, que empujará por así decirlo el fluido sobre las paredes del pozo obligándolo a entrar; y por último se debe contar con un medio permeable por donde fluya el fluido y vaya dejando por el camino los sólidos que se encargarán de crear la película protectora. El proceso de filtración se puede dar de manera estática y dinámica, la primera es cuando el lodo de perforación no está circulando, este seguirá en el proceso de generar la torta la cual con el paso del tiempo se irá haciendo más gruesa y por ende menos fluido la atravesará; en la manera dinámica es cuando el fluido está en circulación o la sarta está en movimiento, hay una velocidad de depositación de sólidos sobre la pared pero así mismo habrá una velocidad de erosión de esta capa y la diferencia de estas velocidades dará el espesor aparente de la torta.

⁹ *Ibíd.*, p. 33.

Si no se lleva un control apropiado en la tasa o velocidad de filtración, control de espesor de la torta y propiedades químicas del filtrado se puede llegar a tener posibles dificultades tales como:

Problemas asociados con espesor excesivo:

- Reducción del espacio anular, traducido en aumento del torque por puntos apretados, además de un aumento en las presiones de suaveo y pistoneo las cuales pueden inducir fracturas a la formación y por ende pérdidas parciales o totales de fluido.
- Dificultades a la hora de cementar, ya que será de difícil remoción de la torta para después ser reemplazada por el cemento.
- Pegas de la sarta de perforación debido a que se recuesta a las paredes de gran espesor, lo que en ocasiones también genera ojos de llave que implica dificultades para sacar la sarta a superficie.
- Dificultades para bajar herramientas por la disminución del espacio anular que se tenía previsto.

Problemas por pérdida excesiva de filtrado:

- Desplazamiento parcial o total de los fluidos de interés de las cercanías de la cara del pozo.
- A la hora de generar muestreo de la formación, se induce en errores ya que se extraerán en su mayoría muestras con el fluido de filtrado y no los hidrocarburos; así mismo lo hará en la interpretación de registros a pozo.
- Taponamiento de zonas productoras, en las que sólidos disminuyen la permeabilidad o el filtrado reacciona con ciertas zonas y produce la precipitación orgánica que también genera obstrucciones al fluido de interés.
- Costos asociados a los barriles que se pierden ya que no se recuperan y hay que reemplazarlos con nuevos barriles, donde se incurren en más costos por los aditivos adicionales.

1.5.1 Factores que afectan el filtrado y la formación de la torta¹⁰

Temperatura: Entre más temperatura mayor filtrado se tendrá, esto por reducción de viscosidad del fluido con este incremento, haciendo más fácil que el lodo pase por los minúsculos poros ya que se hace más fluido.

Presión: Este factor influye dependiendo si el revoque es compresible o incompresible, en el primero la presión influye de tal modo que las partículas que conforman la torta puede aplanarse y deformarse, de modo que se acomoden de mejor manera al poro a taponar e impidan el paso de fluidos; al ser incompresible significa que el revoque es rígido y por tal no se deformará y dependerá de la eficiencia con que se acomoden las partículas en los poros, en ocasiones al ser rígidos habrá mayor facilidad al paso de fluidos y por ende mayor probabilidad a que suceda uno de los problemas descritos anteriormente.

Sólidos: Dependerá de la forma que tengan estos sólidos a depositar, si son de forma laminar será más eficiente pues tendrán más área superficial con la cual tapan las paredes del pozo, estos revoques serán compresibles por el hecho de estar una lámina encima de la otra y así soportar mayores presiones. Otra forma y no tan conveniente son esféricas, las cuales dejaran más espacios de una a la otra por donde pasará mayor cantidad de fluidos.

Tiempo: Con mayor tiempo mayor será la deposición de sólidos de la torta si las demás condiciones como viscosidad, permeabilidad y diferencial de presión se mantienen constantes.

Dispersión: Una buena dispersión de sólidos en el fluido de perforación es de gran ayuda, pues habrá variedad de tamaños con los cuales taponar los poros; mientras

¹⁰ *Ibíd.*, p. 33.

que si está floculado las partículas se aglomerarán y aumentarán de tamaño siendo más complicado taponar los poros más pequeños.

Permeabilidad de la torta: El tamaño de las partículas influye mucho en este factor, mientras haya más variedad de tamaños habrá mayor eficiencia para la formación de la torta, pues habrá sólidos de tamaños apropiados para cada poro, yendo desde partículas grandes hasta otras de diminutos tamaños que refuercen los espacios dejados por las demás partículas.

2. NANOTECNOLOGÍA

Se conoce la nanotecnología como un campo de las ciencias aplicadas que se encarga del estudio, manipulación y aplicación de la materia a escala nanométrica entre otras características que abarca este concepto. El considerado padre de la nanociencia Richard Feynman¹¹ a quien se le atribuyó en 1965 el premio Nobel de Física, fue quien propuso la elaboración de productos basados en un reordenamiento de átomos y moléculas. El control y manipulación que se hace sobre los materiales intervenidos en este campo, se realizan a nivel atómico y molecular de los mismo, dado que a esta escala muchos materiales presentan mejores propiedades que las presentadas a escala macro.

Se estima que desde que se inventó el microscopio AFM (Atomic Force Microscope) los científicos contaron con una herramienta para facilitar el trabajo de observación de los materiales y sus propiedades, en particular a escala nanométrica. Para entender mejor la escala a la que se trabaja en este entorno, se parte de la microtecnología como ejemplo, donde se manipula y trabaja con materiales de la escala del micrón; un micrón es una milésima de un milímetro o una millonésima de un metro, por otro lado un nanómetro es una millonésima de un milímetro o bien una milmillonésima de un metro; así siendo más fácil el interpretar este minúsculo tamaño, dado que en la mayoría de casos en los que se trabaja a esta escala las interacciones generalmente son sobre un átomo o una molécula del material en el cual se está trabajando; un ejemplo es el procedimiento de exfoliar grafito hasta conseguir hojas individuales de grafeno las cuales cuentan con un grosor de aproximadamente un átomo. Aunque una buena definición de lo que es un material

¹¹ Richard P. Feynman. "There's Plenty of Room at the Bottom" (conferencia). American Physical Society at CalTech., Diciembre 29, 1959.

nanométrico incluye el concepto de que por lo menos una de las tres dimensiones de este, esté entre 1 y 100 nanómetros.

2.1 APLICACIONES DE LA NANOTECNOLOGÍA

Esta rama en la actualidad comprende muchas aplicaciones, sin embargo, se hará énfasis en las más representativas y que le aportan mucho a la vida y bienestar del ser humano, más adelante (Tercer capítulo) se mostrarán otras aplicaciones más específicas de los nanomateriales que se han estudiado fundamentalmente para el desarrollo de esta investigación.

2.1.1 Medio Ambiente. Actualmente muchos de los avances a escala nanométrica siguen siendo a nivel de prototipos de laboratorio, los científicos buscan la manera de que por medio de la nanotecnología se encuentren soluciones a problemáticas medioambientales como por ejemplo la contaminación al momento de desarrollar materiales, energías y múltiples procesos que en la actualidad conllevan al deterioro ambiental; también se estudia intensivamente en los tratamientos de aguas residuales, desalinización de agua, descontaminación de suelos, tratamiento de residuos dañinos, reciclaje de sustancias químicas y nanosensores que tengan la capacidad de detectar sustancias tóxicas con tan solo la presencia de un átomo.

2.1.2 Energía. En lo que interviene al sector energético se tienen grandes expectativas en cuanto al mejoramiento y optimización de sistemas de producción de energía así como la manera de almacenarla con mejor eficiencia a las que se tienen en la actualidad, esta aplicación tiene un enfoque en las energías renovables, principalmente en la solar, también y no menos importante en este sector se buscan tecnologías que disminuyan el consumo energético, esto se espera lograr por medio del desarrollo de eficientes aislantes térmicos basados en nanomateriales especiales que puedan suplir estas propiedades requeridas.

2.1.3 Medicina. Este es uno de los campos en los que más se tiene interés por parte de los investigadores, pues existen múltiples funciones que los nanomateriales podrían suplir a la hora de encontrar alguna cura para diversas enfermedades, en este caso la nanotecnología enfocada a la medicina recibe el nombre de NANOMEDICINA¹², por ejemplo se han encontrado aplicaciones para nanotransportadores de fármacos dirigidos a sitios específicos del cuerpo, esto con el fin de un ataque focalizado a células cancerígenas o alguna otra célula dañina sin tener que afectar las demás partes del cuerpo del paciente, también se podría tener éxito en la fabricación de biosensores moleculares que puedan detectar con mayor facilidad alguna sustancia de interés en el cuerpo humano como por ejemplo glucosa o algún biomarcador molecular de alguna enfermedad en específico; también se estudia la posibilidad del uso de la nanomedicina en la reparación molecular de diversos tejidos del cuerpo, como lo es el sistema óseo en el caso de las fracturas o más recientemente la regeneración de tejidos en los sistemas ópticos de personas que sufren de miopía en la recuperación del iris del ojo humano, por estas y más aplicaciones que podrían ayudar a combatir enfermedades es que la nanociencia ha tomado un gran vuelo a nivel de investigación.

2.1.4 Comunicaciones e Informática. Este campo sin duda es el que más ha avanzado en cuanto a resultados y estudios hechos hasta el momento, la razón tal vez pudiera ser que es un entorno en donde se mueve mucho el rubro económico y para sus pioneros no es un secreto que dejaría numerosas ganancias tanto a nivel social como a nivel económico. En este aspecto de la nanotecnología se manejan cualidades como el almacenamiento masivo de datos en sistemas mucho más pequeños que los convencionales, en la fabricación de pantallas que se basan en materiales con alta resistencia a la compresión o golpes, alta flexibilidad y otras propiedades atractivas como la transparencia de estos sistemas.

¹² Josep Samitier, Nanomed España, Plataforma Española de Nanomedicina, Instituto de Bioingeniería de Cataluña, Barcelona 2012.

Cabe mencionar que estas solo son aplicaciones que representan de una buena manera el uso de la nanotecnología, pero que en la vida actual las posibles aplicaciones de esta rama de la ciencia son más numerosas.¹³

2.2 NANOMATERIALES

Es conocido que la nanotecnología interactúa y manipula partículas o materiales a escala nanométrica, en la actualidad existen diversas clasificaciones de estos nanomateriales, en esta parte se profundizará en lo que respecta a nanomateriales basados en carbono y óxido de silicio; los cuales conforman el nanocomposito del cual se tratará más adelante, una vez entendido los materiales que lo componen.

2.3 NANOMATERIALES BASADOS EN CARBONO

Entre los elementos químicos más estudiados se encuentra el carbono, este elemento es de gran utilidad para áreas como la biología, medicina, también en la producción de energía y conservación del medio ambiente, además de encontrarse en muchos más sistemas de nuestra vida cotidiana; desde el siglo pasado cuando se inventó el primer transistor, el silicio demostró ser el elemento idóneo para llevar a cabo todos estos avances tecnológicos, sin embargo debido a la necesidad en el campo de la electrónica de minimizar los tamaños de diversos aparatos electrónicos y sobre todo la necesidad de aumentar la conductividad tanto eléctrica como térmica para mejorar la eficiencia en el funcionamiento de estos dispositivos, se requería de materiales que le brindaran a los investigadores la opción de poder interactuar con ellos de manera que fuera posible desarrollar sistemas basados en la organización adecuada de las moléculas.

¹³ Universidad de Guanajuato, revista enjambre, la nanotecnología y sus aplicaciones.

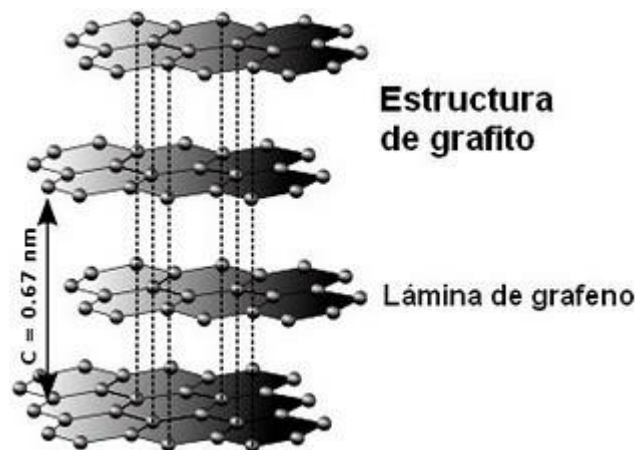
El carbono es un elemento que le permite a los investigadores obtener de cierta manera lo que estaban buscando, pues este se presenta en diversas formas alotrópicas las cuales cada una de ellas presentan propiedades físicas y químicas que son requeridas actualmente y que difícilmente se encuentran en otros materiales. Durante mucho tiempo se estudió a profundidad las dos formas alotrópicas más típicas del carbono que son el grafito y el diamante, pero desde hace un tiempo hasta la actualidad la investigación se ha centrado en estudiar la manera de poder aprovechar con éxito las propiedades de otros materiales constituidos por carbono, estas otras especies alotrópicas son el grafeno, óxido de grafeno, los fullerenos, los nanotubos de carbono, también existen otras especies basadas en carbono poco estudiadas como el grafano, se realizará una descripción enfocando en las propiedades y aplicaciones del grafeno dado que es éste de quien se componen por así decirlo las demás especies y por su puesto porque de sus propiedades es que se fundamenta la presente investigación.¹⁴

2.3.1 Grafito. El grafito, es la forma alotrópica más estable en la que se presenta el carbono, en este los átomos de carbono presentan enlaces dobles, $C=C$, lo que quiere decir que cada uno de los carbonos presenta una estructura plana con ángulos de 120° , estas estructuras se van enlazando de manera que logran la estructura laminar del grafito, que es una estructura de forma hexagonal similar a lo que sería una colmena de abejas, de manera rápida se puede decir que el grafito es un material formado por pequeñas láminas apiladas como se observa en la **Figura 8**. Las uniones covalentes que presentan los átomos de una sola de estas capas son consideradas extremadamente fuertes y muy difíciles de romper, aunque las uniones entre capas son mucho más débiles debido a que estas capas están unidas principalmente por fuerzas de Van der Waals, dado que uno de los usos industriales del grafito consiste en la fabricación de minas de lápices, esta es la explicación del por qué al arrastrar el grafito sobre un papel se permite la escritura.

¹⁴ López Fernández V. Nanomateriales basados en carbono, Universidad Autónoma de Madrid-Departamento de química inorgánica, Tesis Doctoral, Madrid, 2009.

Entre las propiedades del grafito este se caracteriza por su color negro con cierto brillo metálico, refractario y se exfolia con gran facilidad, presenta una conductividad de electricidad baja en la dirección perpendicular a las capas que lo conforman, dicha conductividad aumenta con el incremento de la temperatura, por lo que también en algunas industrias es usado como un semiconductor, a pesar de que el grafito y el diamante que es otra de las formas alotrópicas estables en las que se presenta el carbono, están formados exclusivamente por átomos de carbono, el grafito es blando y opaco, mientras que el diamante es extremadamente duro aparte de que permite pasar la luz a través de él; estas grandes diferencias se presentan debido a la diferencia en las que estos dos materiales poseen su red cristalina o retículos sobre los que se disponen sus átomos de carbono, para el caso del grafito, los átomos de carbonos están dispuestos en los vértices de prismas hexagonales, y en el diamante la red cristalina está hecha de tetraedros regulares cuyos vértices son átomos de carbono.

Figura 8. Grafito conformado por el apilamiento de láminas de grafeno.



Fuente: Tomado de <http://www.guatequimica.com>

El grafito, aunque es un material que abunda en la naturaleza, este viene con muchas imperfecciones e impurezas, por lo que en muchas ocasiones es más conveniente fabricarlo sintéticamente y así lograr conseguir características mejores

que las del grafito natural, principalmente lo que se busca con esto es encontrar una mejor cristalinidad.¹⁵

2.3.2 Grafeno. El grafeno es un material con diversas características constituido por átomos de carbono fuertemente cohesionados en una superficie medianamente uniforme y que no llega a ser del todo plana¹⁶, sino que por el contrario tiene algunas ondulaciones del orden de un átomo de grosor, estos átomos de carbono se encuentran unidos por enlaces covalentes sp^2 , es una estructura de tamaño nanométrica, físicamente se presenta de una forma bidimensional, las láminas formadas por el arreglo hexagonal de carbonos permite que se forme tomando la similitud de un panal de abejas (**Figura 9**), esta lámina de grafeno está constituida por un anillo de benceno naturalmente despojada de sus componentes hidrogenados. Esta pequeña forma es considerada la base fundamental para la formación de otros alótropos formados por el carbono con excepción del diamante.

Este término es utilizado para aquellos arreglos de átomos que conforman una capa individual o para conjuntos de hasta un promedio máximo de 10 capas superpuestas unas con las otras, después de que la superposición supera este número, se le denomina a este conjunto hojas de grafeno espesas y no son muy atractivas para el área de la investigación dado que se ha demostrado científicamente que las propiedades especiales del grafeno se conservan hasta más o menos las 10 capas superpuestas, por eso se dice que sus propiedades dependen de la dimensionalidad; por lo que el grafeno puede ser clasificado en tres grupos, el primer conjunto son el de aquellas capas que tienen alto grado de separación y se logran mantener solas, es decir, monocapas, el segundo grupo son aquellas láminas que en el proceso de separación no se lograron separar por completo y quedaron unidas a otra lámina, esas son las bicapa, y por último se tienen aquellas láminas

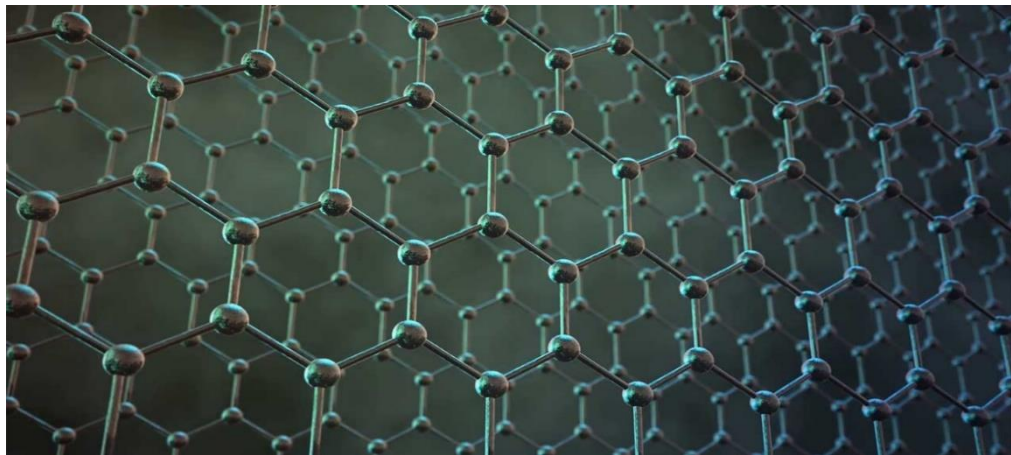
¹⁵ Solís P. "Modificación superficial de materiales de carbono: grafito y grafeno", Universidad de Oviedo, Memoria de tesis doctoral, 2011.

¹⁶ A. K. Geim, K. S. Novoselov, The rise of Graphene. 2007, 6, 183-191.

que tuvieron menos eficacia a la hora de la separación y que quedaron adheridas a otras láminas en grupos de entre 3 a 10 capas superpuestas.

El grafeno tiene una alta estabilidad en su estructura laminar, ya que los enlaces entre átomos de carbono que comprenden la lámina son enlaces covalentes demasiado fuertes de romper, y el arreglo hexagonal se caracteriza por estar casi libre de defectos e impurezas. En algunos casos se requiere grafeno sin nada de impureza ni imperfecciones por lo que se vuelve necesario hacer grafeno de manera sintética, volviendo más eficiente las propiedades del material que hoy en día hace aportes a la comunidad científica por sus propiedades mecánicas, térmicas y químicas¹⁷.

Figura 9. Estructura plana hexagonal del grafeno.



Fuente: Tomado de www.adslzone.net/app/uploads/2018/07/grafeno.jpg

Propiedades del grafeno¹⁸: El grafeno es un material que contiene diversas propiedades, aunque es compleja su explicación básicamente consiste en que el grafeno que se considera una superficie casi plana puede delinearse como un

¹⁷ P. Avouris, Z. H. Chen, V. Perebeinos. Carbon-based electronics. *Nanotechnol* 2007, 2, 605-615.

¹⁸ Info Grafeno. Información obtenida de la plataforma info grafeno. Consultado el 12 de febrero de 2018. Disponible en: www.infografeno.com/propiedadesdelgrafeno.

arreglo hexagonal con hibridación tipo sp^2 , gracias a este tipo de hibridación se forma una estructura trigonal plana en el que cada átomo de carbono se une mediante enlaces sigmas con otros 3 átomos vecinos, estos quedan a una distancia aproximada de 1,42 Angstrom, el orbital $2p_z$ que queda remanente se visualiza como un par de lóbulos perpendiculares por arriba y por abajo al plano hexagonal formado, lo que origina un solapamiento lateral dando lugar a un estado electrónico no localizado denominado sistema π , estando débilmente ligado el electrón que se encuentra en estos orbitales salta de orbital en orbital tomando la forma de una distribución electrónica continua por arriba y por debajo del plano del grafeno, esta gran movilidad de los electrones π (π) deslocalizados en las direcciones paralelas al plano de grafeno es lo que le da la gran propiedad electrónica a este material.¹⁹

El grafeno cuenta con una serie de propiedades que lo hacen un material lleno de cualidades y ventajas, las cuales se pueden aprovechar para diversas funcionalidades en diferentes áreas de la ciencia; por ejemplo una de las propiedades que tiene es su gran dureza, siendo está definida como la cantidad de energía que puede absorber un material antes de romperse o deformarse, se estima que el grafeno es alrededor de 200 veces más duro que el acero común, siendo esta similar a la del diamante, esta propiedad lo hace un material muy resistente al desgaste y por su puesto soportar grandes pesos, se estima que para romper y atravesar una lámina de grafeno con un objeto cortante se requieren alrededor de 4 toneladas de peso.

Adicionalmente a la dureza el grafeno también cuenta con otras propiedades como lo son una elevada elasticidad y una gran flexibilidad, gracias a la primera este material tiene la capacidad de cubrir diversas superficies, protegerla debido a que este tendrá menor tendencia a quebrarse bajo situaciones adversas, cosa que no sucedería con otro material de recubrimiento de superficies; con la segunda

¹⁹ Rodríguez C, "Obtención de hojas de óxido de grafeno para el desarrollo de nanocompositos poliméricos", Universidad autónoma de Nuevo León, Tesis doctoral, San Nicolás de los Garza, N.L. 2012.

característica este material tendría un gran número de aplicaciones gracias a que por su flexibilidad los objetos construidos con este material tendrían la facilidad de moldearse al gusto de cualquier diseño en particular que se requiera.

Dos propiedades que también son de importancia para los adelantos científicos es su capacidad para conducir el calor y la electricidad, la conducción del calor se presenta muy bien en los metales, aunque el grafeno no es uno tiene esta característica; también es muy bien vista y aprovechable su capacidad de conducir la electricidad y gracias a esta cualidad sus aplicaciones son muchas para el futuro, pues este conduce mejor la electricidad que el cobre, material que por lo general se utiliza para transporte eléctrico. El grafeno también tiene la particularidad de ser un material transparente y muy ligero, gracias a estas características se ha previsto construir en el futuro pantallas mucho más ligeras que las actuales, adicionalmente si se combina con otras cualidades como lo es la flexibilidad se puede llegar a utilizar para la construcción de pantallas que sean transparentes en su inactividad, muy ligeras de peso y con la particularidad de que sean plegables o enrollables.

Este material nano estructurado también cuenta con la característica de reaccionar químicamente con otras sustancias, gracias a esto se tiene la oportunidad de servir como base para la creación de nuevos materiales basados en grafeno, también le permite a los investigadores encontrar la manera de introducir en su estructura lo que se puede llamar como impurezas las cuales servirían para modificar alguna propiedad o característica en específico para fines particulares; esto permitiría día tras día abrir más la gama de aplicaciones de todo tipo que podría tener este material, ampliando la gama de posibles aplicaciones. También soporta bien la radiación ionizante, esto le brinda la capacidad de resistirse a ser modificado ante este tipo de radiación cuando pueda estar expuesto a su efecto.

Otra de las propiedades que se estima sea de las más aprovechables del grafeno es su elevada densidad, este material es tan denso que no cualquier molécula o átomo podrían atravesarlo, sirviendo como un filtro de gran eficiencia, por lo que se

está estudiando actualmente la forma de poder llegar a desalinizar el agua de una manera económica mediante la utilización del grafeno y sus propiedades. Por último, entre sus propiedades se tiene que el grafeno ofrece un resultado positivo ante un efecto bacteriano, lo que significa que en este material no se presenta el crecimiento de bacterias, esta característica, permite estudiarlo para su aplicación en campos como la industria de los alimentos y la biomedicina.

Aplicaciones del grafeno²⁰: Ahora se mostrarán algunas estimaciones de cuáles serían los principales campos donde el grafeno podría aplicarse y que jugaría un importante papel a tal punto de revolucionar cada uno de estos.

- **Electrónica**

Como se mencionó anteriormente, tal vez la electrónica sea el área más revolucionada y beneficiada con este material por sus propiedades, podría llegar a emplearse para fabricar transistores y microchips, estos dos últimos se consideran imprescindibles en prácticamente todos los equipos y dispositivos electrónicos, en la actualidad existen diferentes empresas que están estudiando y desarrollando tintas conductoras, que se emplearían para imprimir circuitos, además por las características del grafeno, este podría utilizarse para desarrollar dispositivos electrónicos flexibles que podrán enrollarse o plegarse según las necesidades que se presenten.

- **Informática**

Actualmente se desarrollan ordenadores a base de silicio, reemplazándolos con grafeno estos ordenadores podrían llegar a ser mucho más rápidos y tener un menor consumo energético, también se tienen estimaciones de que un disco duro del mismo tamaño que uno de los empleados actualmente, podría llegar a almacenar hasta mil veces más información.

²⁰ Info Grafeno. Op. Cit., p. 48.

- **Telefonía móvil**

Usando este material en esta área se pueden llegar a desarrollar nuevos dispositivos los cuales se adapten mejor a la fisionomía del ser humano, estos móviles no contarían con una forma ni colores preestablecidos, tendrían pantallas plegables, flexibles y por su puesto táctiles, aparte de todo se presume que la eficiencia y velocidad de las comunicaciones inalámbricas aumentarían.

- **Sectores energéticos**

El tema energético es uno de los más importantes para la investigación que se lleva actualmente con grafeno, pues con sus propiedades y un adecuado uso con este material se podrían llegar a construir baterías las cuales tendrían un elevado rendimiento y gracias a sus propiedades electrónicas estas podrían necesitar no más que unos pocos segundos para cargarse por completo, además tendría un gran impacto positivo en el área de las placas solares, ya que aquellas recubiertas de este material llegaría a ser mucho más eficientes, revolucionando así las energías renovables.

- **Industria del blindaje**

El grafeno tiene excelentes propiedades como la dureza, también cuenta con la capacidad de moldearse pero siempre manteniéndose como un material muy ligero, estas son las características ideales para que este material se use para desarrollar diversos elementos de seguridad, como lo son los chalecos antibalas, cascos, no solo para la protección personal sino también para la seguridad de equipos e incluso automóviles conservando ante todo la ligereza que no brindan otros materiales de características similares.

- **Industria automovilística**

Una de sus aplicaciones sería el de los autos híbridos, pues estos se convertirían en una alternativa real para la población y no para una minoría, sería más atractivo un auto con baterías que cargaran en mucho menos tiempo que las actuales y que

por su puesto duren mucho más; además la aplicación de este material en el chasis de los automóviles los haría mucho más resistentes, por lo que en circunstancias adversas se tiene una mayor seguridad para las personas involucradas y de esta manera podrían disminuir las muertes por accidentes automovilísticos.

- **Industria alimentaria**

En esta área no se presume tanto el adelanto investigativo, pues el uso de este material en relación con los alimentos más que todo se ve enfocado a la creación de envases para alimentos que sean más seguros y en recubrimientos para muebles y superficies donde el derrame de alimentos podría llegar a permitir el desarrollo de bacterias en sus superficies.

- **Tratamiento de aguas**

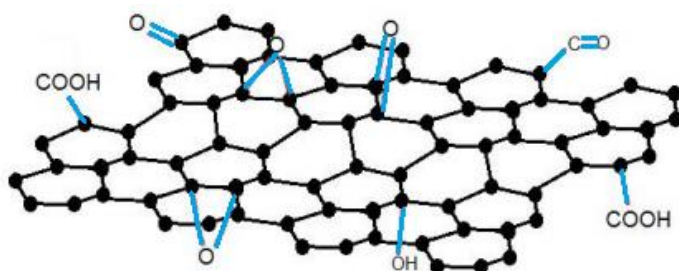
Debido a la estructura hexagonal que poseen estas capas bidimensionales que forman al grafeno, se estudia la forma de que sea posible su uso en la desalinización del agua, por su pequeño tamaño atómico que presenta esta estructura es posible que a través de ella circulen las moléculas de agua sin que las moléculas de los cloruros que conforman la sal puedan continuar su camino junto a las de agua, no se niega que es un estudio bastante tedioso y por su puesto bastante costoso, pero como todo en el mundo, se espera que se pueda llegar a producir de manera rentable económicamente.

- **Desarrollo de la ciencia**

En este caso lo que ha atraído grandemente a los investigadores acerca de este material es su alta reactividad con otros elementos químicos distintos del carbono, hasta el momento se han descubierto algunos derivados del grafeno como lo es el grafano, este material se consiguió cuando se le adicionó átomos de hidrógeno en la estructura molecular del grafeno, dando como resultado un nuevo material que tenía como principal característica el ser aislante.

2.3.3 Óxido de grafeno. En términos generales y simplificados el óxido de grafeno se puede definir como un derivado del grafeno, recordemos que el grafito es un alótropo del carbono que está conformado por el apilamiento y compactación de láminas de grafeno unidas por interacciones débiles como lo son las fuerzas de van der Waals; donde el protagonista es el grafeno que se puede obtener del grafito por medio de métodos de exfoliación, es ahí donde uno de estos métodos como lo es la oxidación de grafito, permite llegar desde este último hasta lo que se conoce como óxido de grafeno. Cabe resaltar que una hoja o lámina de este óxido tiene propiedades similares a las del grafeno puro con algunas diferencias, aunque la principal característica y tal vez ventaja del óxido de grafeno es su capacidad de formar nuevas especies con otros compuestos tanto orgánicos como inorgánicos, debido a la gran cantidad de grupos oxigenados (**Figura 10**) que en él habitan y que lo hacen un compuesto en el que se podrían estudiar múltiples combinaciones, aplicaciones y que abre el campo de la investigación en diversas áreas.

Figura 10. Lámina de óxido de grafeno.



Fuente: Tomado de [Wikipedia.org/reducci3n.del.grafeno](https://es.wikipedia.org/wiki/Reducci3n_del_grafeno).

En pocas palabras el óxido de grafeno se define como una forma oxidada del grafeno el cual se sintetiza exfoliando y oxidando el grafito, para al final obtener una hoja de grafeno con diferentes grupos oxigenados²¹ como lo son principalmente los grupos carboxilos, hidroxilos y epóxidos, las propiedades y aplicaciones del óxido de grafeno dependen del grado de oxidación del grafito y el método utilizado para

²¹ A. Lef, H. He, M. Forster, J. Klinowski, Structure of Graphite Oxide Revisited, The Journal of Physical Chemistry B (1998).

su síntesis por esta razón hoy en día no se tiene un consenso acerca de su estructura, aunque existen diversos modelos de lo que podría ser una aproximación de éste, sin embargo un modelo bien aceptado en la actualidad es uno que comprende la presencia de forma aleatoria en casi toda la lámina de grafeno de estos grupos oxigenados mencionados anteriormente.

Obtención del óxido de grafeno: Una aproximación a la obtención de óxido de grafeno se produjo en el año 1840 por el señor Schafhaeutl quien para su época hizo un reporte de la exfoliación de grafito con ácido sulfúrico y ácido nítrico²² pero no fue sino hasta 1859 que se produjo por primera vez el óxido de grafeno por un químico de origen británico de apellido Brodie, este químico inicialmente hacía experimentos y estudios usando algunas modificaciones del método de Schafhaeutl con el fin de poder caracterizar el peso molecular del grafito sometándolo a reacciones con fuertes agentes oxidantes como el clorato de potasio $KClO_3$ en ambientes ácidos constituidos por ácido sulfúrico o ácido nítrico.²³

Esto conllevó a la intercalación de las capas de grafito, también provocó la oxidación química de la superficie de las capas de este, adicionalmente se concluyó que esta oxidación química entre el grafito debilita aún más las fuerzas interplanares que causan el apilamiento de las capas de grafeno, por lo tanto, con una aplicación de ultrasonido se lleva a cabo la separación de estas capas oxidadas. Posteriormente a esto en 1957 fueron hechas algunas modificaciones por W. S. Hummers y R. E. Offeman los cuales lograron sintetizar este material de manera más eficiente y en tiempos más cortos, los resultados fueron que después del proceso oxidativo se encontraron una estructura laminar muy similar a la del grafito, pero los planos basales que constituyen dicha estructura son efectivamente hojas de óxido de grafeno, estas hojas se encontraron de una manera saturada por diversas

²² C. Schafhaeutl, On the combinations of carbon with silicon and iron, and other metals, forming the different species of cast iron, steel, and malleable, The Lond. and Edin. Phil. Mag., 16, 104, 1840.

²³ B. Brodie, On the atomic weight of graphite, Philos. Trans. R. Soc. London, 149, 1859. B. Brodie, XXIII.- Researches on the atomic weight of graphite, J. Chem. Soc., 12, 1860.

funcionalidades ricas en oxígeno, de esta manera estos grupos funcionales hacen que las hojas se vuelvan hidrofílicas debilitando así las fuerzas de Van der Waals que mantienen unidas las capas, permitiendo la entrada de moléculas de agua entre estas, gracias a esto se puede obtener una exfoliación más profunda del grafito oxidado por medio de la aplicación de energía externa tal como la vibración ultrasónica, y obtener capas individuales de óxido de grafeno o por lo menos paquetes de capas con un número mínimo de estas.²⁴

Estructura del óxido de grafeno: Como se vio anteriormente, el óxido de grafeno varía en la manera en cómo se realice la oxidación del grafito y también en la clase de grafito que se emplee, pero en general este óxido se describe como una monocapa que posee hibridación sp^2 y sp^3 , donde la base o esqueleto como lo llaman los diferentes autores, está conformado por una lámina de grafeno donde esta se encuentra interrumpida por diversas funcionalidades oxidativas sobre el plano basal e incluyendo los bordes de la capa, a causa de que estas funcionalizaciones oxidantes aún no están estudiadas lo suficiente y esto contribuye en gran medida a que la estructura global del óxido de grafeno sea difícilmente establecida.

Hasta el momento se han realizado bastantes estudios para establecerle una estructura al óxido de grafeno, aunque se han encontrado con contrariedades y dificultades para ello, debido a que por lo general se presentan variaciones a las muestras estudiadas, a la higroscopicidad y a su naturaleza no estequiométrica. Diversos modelos han sido propuestos por diferentes investigadores, sin embargo el modelo estructural para este compuesto que más se asemeja a lo que puede ser la realidad de su estructura es el de Lerf – Klinowski²⁵, este modelo presenta al óxido de grafeno como un material constituido por segmentos aromáticos sin oxidar,

²⁴ Hummers, W. S.; Offeman, R. E. Preparation of graphitic oxide. Contribution from the broid division, national lead company 1958.

²⁵ Lerf A, He H, Riedl T, Forster M and Klinowski J 1997 Solid State Ion. 857, 101–103

de tamaños variables, el modelo define dos regiones distintas en la estructura del óxido de grafeno, una región es donde los átomos de carbono están ligeramente funcionalizados y en ellos predomina la hibridación sp^2 , es decir, la zona de grafeno; la segunda región es una zona de átomos altamente oxigenados donde se presenta una hibridación sp^3 , el investigador de este modelo propone que existen grupos funcionales hidroxilos y epóxidos en el plano basal que se segregan en las regiones del grafeno ligeramente oxidadas, por otra parte propone que los ácidos carboxílicos o carboxilatos se encuentran presentes en los bordes de las hojas. El óxido de grafeno se comporta eléctricamente como un aislante a diferencia del grafeno, esto es debido a que la presencia de los grupos funcionales oxigenados provoca una ruptura en la malla gráfrica, sin embargo, este fenómeno se reestablece para favorecer la conductividad reduciendo el carácter oxidante de estas hojas, dando lugar así al óxido de grafeno reducido y así no opacar esa propiedad que es característica en el grafeno.²⁶

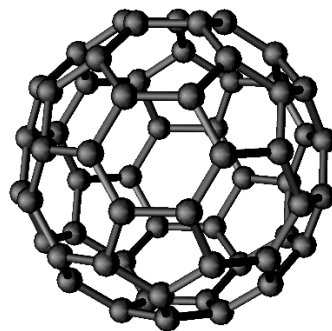
2.3.4 Fullerenos. Los fullerenos son considerados otra de las formas alotrópicas del carbono, es la tercera forma más estable tras el diamante y el grafito, este se presenta de una manera en que los átomos de carbono unidos entre sí por medio de fuertes enlaces covalentes forman una molécula hueca de baja densidad, esta es la razón de que esta especie puede tener forma esférica y se le asemeja con un balón de fútbol, este compuesto se descubrió en 1985 tras irradiar un disco de grafito con láser y mezclar el vapor de carbono resultante mediante una corriente de helio, después de analizar el residuo en forma cristalina de observaron moléculas con 60 átomos de carbono²⁷ en forma de esfera (**Figura 11**), con el pasar de los años en la investigación se han descubierto otra serie de moléculas las cuales tienen tanto menor como mayor número de carbonos constituyendo al fullereno como una familia de moléculas.

²⁶ He, H.; Klinowski, J.; Forster, M.; Lerf, A. A new structural model for graphite oxide. *Chemical Physics Letters* 1998, 287, 53-56.

²⁷ H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O'Brien, R. F. Curl, R. E. Smalley. C60: Buckminsterfullerene. *Nature*. 1985, 318, 162-163.

Las propiedades de este material fueron fuertemente estudiadas a comienzos del siglo XXI y fue hasta el 2003 que se avanzó notablemente el estudio de su potencial en el área de la salud, pues se descubrió cierta capacidad que permitía fijar antibióticos específicos con el fin de atacar ciertas células cancerígenas tales como el melanoma, otra gran propiedad que tiene este material es que posee una gran resistencia a altas compresiones físicas, pues estos se deforman y posterior a retirar el esfuerzo estos tienden a volver a su estado inicial por lo que se ha utilizado como refuerzo a algunos materiales poliméricos, en teoría los fullerenos aunque se encuentran de forma natural en el medio también se pueden fabricar de forma sintética, sin embargo en ambos casos se puede interpretar de manera simple al fullereno como una esfera formada por una lámina de grafeno, aunque este material se puede encontrar en variedad de tamaño según el número de carbonos que posea se conoce que la mayoría de estos se forman con 60 carbonos y que su tamaño puede ser de alrededor de 2 nanómetros.²⁸

Figura 11. Estructura de la molécula del fullereno.



Fuente: Imagen tomada de: www.emaze.com/@AIWFCFCF/Formas-alotrópicas

2.3.5 Nanotubos de carbono. Los nanotubos de carbonos pueden definirse como una lámina de grafeno enrollada en sí misma como se puede apreciar en la **Figura**

²⁸ Herráez A. Las Asombrosas Estructuras del Carbono: fullerenos, grafenos y nanotubos; Apuntes de Ciencias, Universidad de Alcalá, diciembre 2011.

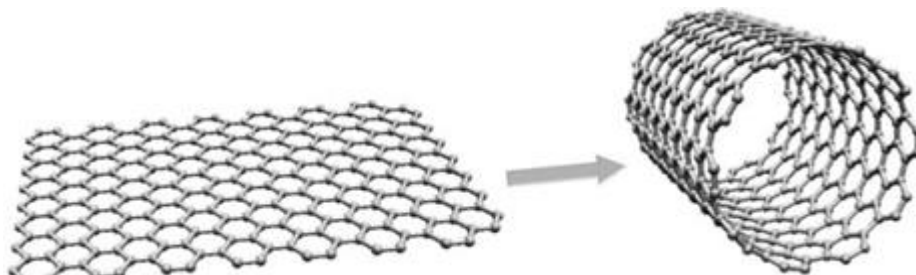
12 de manera que sus bordes se unan por medio de los mismos enlaces que constituyen el cuerpo de la misma inicialmente, después del descubrimiento de los fullerenos y de la manera de sintetizarlos se descubrió en 1991²⁹ estas estructuras con forma de agujas pues se descubrieron casualmente mientras se intentaba fabricar fullerenos de manera sintética, inicialmente se observaron estos materiales que llegaron a medir hasta un milímetro de longitud y que estaba constituido por varias láminas enrolladas de manera concéntrica de un material similar al constituido por el del grafito pero con la particularidad de que se encontraban en una posición curvada, es lo que hoy se conoce como nanotubos de pared múltiples, dos años después en 1993 se encontró la forma de poder aislar esas nanocapas enrolladas de manera que se pudiera obtener una sola y con ella estudiar las propiedades que consigo traía, cuando inicialmente los primeros nanotubos se formularon eran de múltiples paredes con hasta 20 capas concéntricas que llegaban a ocupar entre 20 y 30 nanómetros, mientras que una capa independiente la cual su estructura en forma de cilindro ocupa un diámetro de entre 1 a 2 nanómetros.

Una particularidad que tiene la producción sintética de nanotubos de carbono es que al momento de obtener el producto se consiguen una gran heterogeneidad, es decir, se encuentran varios tamaños, además se encuentra una clasificación según la forma en que se cierran las capas de grafeno cuando estas se enrollan, una de ellas es “En sillón” que es cuando la capa se cierra por los vértices de los hexágonos que forma el grafeno en su estructura, en este caso la línea axial del cilindro pasa por un lado de cada hexágono sucesivo; el segundo tipo es “En zig-zag” en este caso la capa se cierra por los lados de los hexágonos alternos; por último el tipo “Quiral” entre las formas de los nanotubos esta es la más común, presenta una inclinación, una menor simetría, en este caso la línea axial forma un ángulo con cualquier línea que una sucesivos átomos equivalentes en los hexágonos; entre sus propiedades se encuentra la gran resistencia a la compresión de este nanomaterial

²⁹ S. Iijima. Helical microtubules of graphitic Carbon. Nature. 354, 56-58.

y su conducción térmica y eléctrica, tiene gran aplicabilidad en la rama de la electrónica, óptica, ciencia de los materiales y en diferentes ramas de la nanotecnología, aunque para la ciencia una de las cosas más difíciles hasta el momento es clasificar en gran número de estas unidades por igualdad de tamaños y tipos.³⁰

Figura 12. Nanotubo de carbono.



Fuente: <https://lidiakonlaquimica.wordpress.com/tag/nanotubos-de-carbono/>

2.3.6 Grafano. El grafano es un material relativamente joven pues fue descubierto en el año 2010 por la universidad de Manchester, en teoría el grafano es muy similar al grafeno con la diferencia de que en la estructura de su monocapa aparte de que los átomos de carbono se encuentran enlazados entre sí también lo hacen con un átomo de hidrógeno³¹ en ambos lados de la capa, una de las diferencias entre el grafeno y el grafano es que este último no conduce la electricidad ya que los enlaces con el hidrógeno amarran de cierta manera los electrones encargados de conducirla, convirtiendo al grafano en un aislante, sin embargo este conserva la mayoría de sus propiedades como lo son una alta resistencia mecánica, una alta densidad y elasticidad, además al calentar lo suficiente el grafano se eliminan los hidrógenos devolviéndole al material el carácter de grafeno junto con sus propiedades; con esto el principal objetivo de los investigadores es poder llegar a controlar la eliminación individual de los átomos de hidrógeno en la capa del grafano

³⁰ Herráez A. Op cit.

³¹ González Arias A. et al. El año de la química y su influencia en la física y otras ciencias. Elemento 84 (2011) 47-51.

y poder constituir aplicaciones en las cuales se llegue a tener un comportamiento tanto aislante como conductor según se requiera.

Aplicaciones del grafeno y el óxido de grafeno en fluidos de perforación

Las principales aplicaciones que se han realizado a lodos de perforación ya sea con láminas de grafeno o de óxido de grafeno se han hecho para evaluar el efecto que estas tienen en las propiedades reológicas y en las propiedades del filtrado, esta última se aplica especialmente en investigaciones para inhibir lutitas y evitar sus fracturas.

Propiedades reológicas: Debido a que las capas de grafeno y óxido de grafeno tienen una gran relación entre su área superficial y el volumen que las contiene, estas favorecen el aumento en la reología de los lodos de perforación debido a que se aumenta el contacto entre capas dentro del fluido con estas láminas, provocando de esta manera un aumento en los esfuerzos de corte que a su vez provocan un aumento en la viscosidad del fluido.

Propiedades del filtrado: A pesar que las capas de grafeno y su derivado el óxido de grafeno poseen una alta resistencia, también cuentan con propiedades elásticas que le permiten cambiar su morfología permitiendo de esta manera acomodarse entre los poros nanométricos de la formación sellándolos con mejor eficiencia en comparación a las partículas de los lodos tradicionales, adicionalmente debido a estas propiedades entra de manera fácil en los contornos de las microfracturas que poseen las lutitas y formaciones similares, favoreciendo el mecanismo de inhibición de las arcillas.

2.4 ÓXIDO DE SILICIO

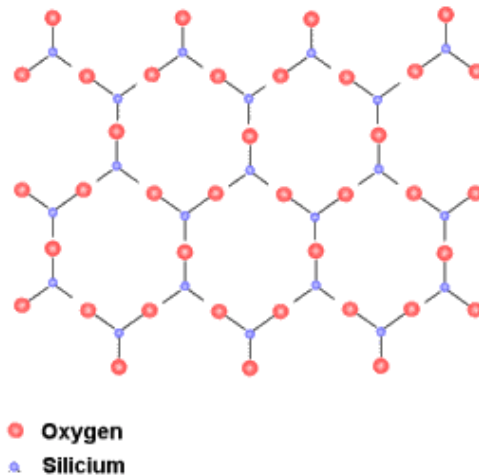
El Óxido de Silicio o Dióxido de Silicio (SiO_2) es un compuesto conformado por silicio y oxígeno, llamado comúnmente sílice³². Se encuentra en la naturaleza,

³² Moreno P. Análisis de óxido de silicio y estructuras multicapa para aplicaciones electrónicas. Universidad de Barcelona, Septiembre de 2000.

siendo un componente que se haya presente en la arena, como depósitos cristalinos, también una de las formas en las que aparece en la naturaleza es el cuarzo, el cual se encuentra en diversas formas. El óxido de silicio al ordenarse espacialmente en una red tridimensional es cuando se cristaliza en forma de cuarzo.

Tipos de enlace presentes en el óxido de silicio: La sílice u óxido de silicio se presenta como un sólido covalente, con hibridación sp^3 en el átomo central, es decir, en el silicio (**Figura 13**), de esta manera se forma una red tridimensional (cuarzo), esta se encuentra formando parte de una gran red o lo que se denomina como cristal covalente, formados por enlaces covalentes continuos, el óxido de silicio es insoluble en todos los disolventes, debido a que se necesitaría romper una gran cantidad de enlaces covalentes para separar las partículas, adicionalmente por esta razón también se le considera un mal conductor.

Figura 13. Estructura del óxido de silicio.

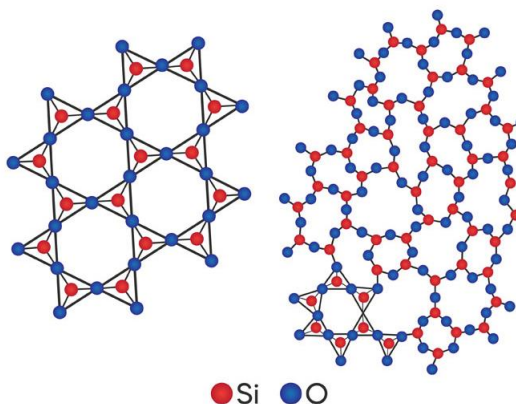


Fuente: <http://www.solgel.com/articles/april01/aerog1.htm>

2.4.1 Formas en las que se presenta el óxido de Silicio³³

2.4.1.1 Óxido de silicio cristalino. La sílice u óxido de silicio cristalino como se observa en la parte izquierda de la **Figura 14** presenta una forma en su estado elemental la cual presenta en su molécula un átomo de silicio rodeado por 4 átomos de oxígeno formando un tetraedro en el que los vértices son ocupados por los mismos átomos de oxígeno, este es un componente natural el cual es encontrado de manera abundante en las rocas, en el suelo y de manera muy abundante en la arena. El óxido de silicio o la sílice cristalina se puede encontrar de varias formas en la naturaleza, la más común de estas es el cuarzo, también se encuentran arenas cuarzosas, grava cuarzosa, arenisca cuarzosa, la pegmatita, la cuarcita entre otras.

Figura 14. Estructuras del Óxido de silicio cristalino y amorfo.



Fuente: <http://cienciasdejoseleg.blogspot.com>

2.4.1.2 Óxido de silicio amorfo. El óxido de silicio amorfo también como se observa también en la **Figura 14** se presenta en la naturaleza en forma del mineraloide ópalo o como vidrio volcánico, y con ellos llega la diatomita y la toba volcánica entre otras. Además, puede ser fabricado en forma de polvo parduzco o como geles, que son empleados en diversas industrias.

³³ Prieto K. "Evaluación de la viabilidad técnico- financiera de las nanopartículas de sílice como aditivo para el control del filtrado en el fluido de perforación base agua a nivel laboratorio", UIS, tesis de pregrado, Bucaramanga, 2017.

2.4.1.3 Óxido de silicio nanométrico. Adicionalmente a las propiedades y aplicaciones que encontramos en el óxido de silicio, también encontramos una serie de propiedades y aplicaciones del mismo material cuando se lleva a un tamaño del orden nanométrico, a continuación, algunas de estas propiedades y aplicaciones en la industria en general. La nanosílice, son nanopartículas de SiO₂ amorfas e insolubles en el agua que se presenta regularmente en forma líquida mezclada con otros compuestos para facilitar su transporte y manejo, al diluirla en agua se denomina sílice coloidal.³⁴

Entre las aplicaciones de la nanosílice, se encuentra que principalmente está enfocado en la formulación para mejorar las características de los diferentes morteros en el área de la construcción, aunque también se encuentran algunas aplicaciones relevantes en la industria de los hidrocarburos, en las diferentes áreas tales como la exploración, la perforación y la producción.

2.4.2 Aplicación en la industria de los hidrocarburos. A diferencia de la sílice micrométrica que viene en una presentación en polvo, la sílice nanométrica viene como un nanofluido, es decir, su presentación es en dispersiones coloidales estables, estos Nanofluidos se han presentado de manera diversa en la industria de los hidrocarburos, aunque generalmente solo a nivel de laboratorio, en muchas ocasiones para mejorar las cualidades del fluido de perforación respecto a diferentes fines como por ejemplo la disminución de la pérdida del filtrado del fluido, disminución en el grosor de la torta y también como aditivo para disminuir la permeabilidad de las arcillas. Para el caso de las cementaciones de pozos petroleros la nanosílice se le adiciona al cemento para disminuir la porosidad y para aumentar su resistencia a la compresión y brindarles mejores propiedades mecánicas a las diversas lechadas. La nanosílice actualmente es utilizada en la industria de la construcción, y alrededor de las nanopartículas en general se ha

³⁴ O. Barón, Y. Mercado. "Efectos de la sílice coloidal en las propiedades en estado fresco y endurecido del mortero y concreto hidráulico". Tesis de Maestría; Universidad Pontificia Javeriana; página 9; 2012.

abierto un amplio panorama de investigación y aplicaciones, lo mismo ocurre en la industria del petróleo.³⁵

2.4.3 Algunas ventajas de la nanosílice³⁶

- Estabilidad en pozos horizontales en formaciones arcillosas, perforados con lodo base agua; esto se debe a que las Nanopartículas de sílice taponan las fracturas y poros de tamaños manométricos impidiendo que la fase líquida reaccione con la formación.
- El fluido de perforación basado en nanopartículas de sílice ofrece excelentes propiedades reológicas que se mantienen en el tiempo.
- Las nanopartículas de sílice son un material biodegradable, no son tóxicas, son fácilmente sintetizables, aportan estabilidad térmica y lubricidad al lodo de perforación.
- Para la recuperación de hidrocarburo las nanopartículas de sílice están clasificadas como el material que obtiene un mayor porcentaje de recobro de petróleo residual a nivel de simulación y laboratorio.
- El fluido de perforación basado en nanopartículas de sílice reduce la abrasión gracias a sus propiedades lubricante.

2.4.4 Óxido de silicio como agente controlador de filtrado. A medida que aumenta la profundidad de una perforación, aumenta el peso de la columna de lodo y a su vez este aumento de peso abre cada vez más la posibilidad de que haya una migración del fluido de perforación desde el pozo hacia la formación, provocando muchas veces incluso la fractura de esta, lo que es conocido como pérdida de filtrado, actualmente existen diversos aditivos para controlar esa pérdida como por ejemplo los lignitos y los polímeros. En muchas ocasiones a medida que se aumenta la profundidad del pozo en ejecución, se van encontrando estratos de roca que contienen tamaños de poros muy pequeños, del orden micrométrico e incluso

³⁵ Prieto K. "Op.Cit. p. 63.

³⁶ Prieto K. "Op.Cit. p. 63.

nanométrico, es ahí donde la inclusión de un material nanoparticulado como lo es el óxido de silicio nanométrico entra a jugar un importante papel a la hora de realizar las correspondientes pruebas de filtrado, dado que estas partículas por ser tan pequeñas se logran posicionar en lugares donde otros componentes ordinarios de un lodo convencional no lo logran; estas nanopartículas de sílice son unas excelentes candidatas para entrar a sitios que otros materiales no logran entrar dado que aparte de su nanométrico tamaño, también tienen la ventaja de tener una forma esférica muy bien definida, lo que facilita su incrustación en zonas de la cara de la formación, donde otro material no llegaría, consiguiendo con esto que se forme una torta más delgada y por su puesto permitiendo un mejor control de filtrado.

2.4.5 Óxido de silicio como aditivo para lechadas de cementación. Al igual que en la industria de la construcción, los cementos requeridos para la cementación de un pozo petrolero, necesita de algunas características lo mayormente definidas, como, por ejemplo, la compactación de la lechada para que esta no quede con poros, la durabilidad del cemento una vez haya fraguado, la resistencia de este a la compresión, etc.

Como bien es sabido, las nanopartículas de óxido de silicio por su pequeño tamaño permiten que estas se alojen en aquellos poros que pudieran quedar dentro del cemento una vez se haya mezclado, esto le permite al mismo tener una mejor consistencia y mejor compactación a la hora de posicionarse en el lugar correspondiente dentro del pozo.

Estas partículas por tener una gran área superficial por unidad de volumen, teniendo de esta manera un aumento en la conductividad en relación con una lechada convencional, ayuda a que se maximice la transferencia de calor permitiendo un fraguado más rápido y eficiente, de igual manera este material nanoestructurado por su orientación y distribución dentro de la mezcla, le brinda a la lechada mejores propiedades mecánicas que lo posicionan en mejor estado frente a una eventualidad futura que tenga el pozo una vez esté concluido y en operación.

2.5 NANOCOMPOSITOS

Los materiales compuestos se constituyen por la unión de dos o más materiales diferentes, el fin de esto es conseguir con la combinación nuevas propiedades que no se consiguen con los materiales involucrados de manera individual³⁷, como por ejemplo propiedades mecánicas o de conducción eléctrica y térmica entre otras.

Actualmente con el avance de la ciencia se requieren otras propiedades que los materiales tradicionales no pueden adquirir y es ahí donde se opta por los materiales nanocompuestos o nanocompositos, estos nanocompositos son materiales en los que por lo menos una de las tres dimensiones de sus componentes está dentro de la escala del nanómetro y gracias a este diminuto tamaño logra ofrecer aquellas funciones adicionales. La razón principal es que al existir partículas tan pequeñas interactuando entre ellas se consigue una muy alta relación entre el área superficial de esta y su volumen, por lo que esta alta relación aporta una mayor interacción entre ellas brindando la mejoría de algunas de sus propiedades. Usualmente en este sistema compuesto uno de los materiales involucrados se denomina matriz y es el que alberga al otro que se denomina refuerzo, es imprescindible que estos dos materiales no sean miscibles entre ellos, en esta unión la morfología es de importancia al obtener de ellos las diferentes propiedades pues la forma de los refuerzos de los nanocompositos influye mucho en la manera como estos interactúan con la matriz que lo contiene.

Actualmente existe una sencilla clasificación de los nanocompositos que consiste en el número de dimensiones a escala nanométrica que sus componentes posean³⁸, estos son unidimensionales cuando una sola dimensión tiene esta escala, bidimensional cuando cuenta con dos dimensiones con esta escala y tridimensional

³⁷ Pulickel, M.A.S., L.S.; Braun, P.V, Nanocomposite Science and Technology. 2006. 239.

³⁸ Pokropivny, V.V. and V.V. Skorokhod, Classification of nanostructures by dimensionality and concept of surface forms engineering in nanomaterial science. Materials Science and Engineering: C, 2007. 27: p. 990-993.

cuando las tres dimensiones del material se encuentran en una escala nanométrica. Adicionalmente a eso también es importante la matriz que conforma el material compuesto pues esta marca en gran medida las propiedades que tendrá dicha combinación y el tipo de interacción que tendrá con su respectivo refuerzo, estos se clasifican en nano compositos de matriz polimérica que son los más comunes, de matriz cerámica y de matriz metálica, a continuación, sus descripciones.

2.5.1 Nanocompositos de matriz polimérica. Un nanocomposito de matriz polimérica es un material que está compuesto por una mezcla entre un polímero el cual cumple la función de albergar dentro de sí a otro material que es generalmente sólido y se encuentra de manera dispersa³⁹, esta mezcla se realiza para aprovechar las propiedades existentes en los polímeros como lo son su resistencia y su ligereza entre otras, y complementar con las propiedades que contenga el refuerzo que se le esté adicionando. Se encuentran diferentes tipos de refuerzos de tamaño nanométrico como los compuestos a base de carbón, nanoarcillas, partículas de vidrio, nanopartículas de óxidos e hidróxidos metálicos.

La idea de reforzar un polímero con estas nanopartículas es formar un material que posea propiedades mejoradas y quizás nuevas, las cuales no tenían de manera individual; esto siempre y cuando se obtenga una muy buena dispersión o distribución a la hora de preparar el nanomaterial compuesto.⁴⁰ Existen varias formas de fabricar estos nanocompuestos, a continuación, algunas de ellas.

- **Polimerización in situ**

El método consiste en mezclar las nanopartículas con el monómero que constituye al polímero y cuando se proceda a realizar la reacción de polimerización, el crecimiento de las cadenas poliméricas dispersa y distribuye a estas nanopartículas por toda la matriz polimérica.

³⁹ Josmin, P.J.S., K. M.; Sabu, T.; Kuruvilla, J.; Koichi, G.; Meyyarappallil, S. S, Polymer composites. 2012. 1: p. 727.

⁴⁰ Garzón A. Materiales compuestos de matriz polimérica usados para el blindaje de interferencia electromagnética, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, 2017.

- **Mezclado en fundido**

Este método consiste en fundir el polímero y posteriormente introducirle las nanopartículas cuando esté en estado fundido, para llevar a cabo este procedimiento se requieren de equipos que proporcionen los esfuerzos de corte necesarios para obtener una distribución o dispersión homogénea, para esto se utilizan generalmente extrusores.

- **Mezclado en solución**

Este método consiste en disolver el polímero en algún disolvente, posteriormente se agregan las nanopartículas y se mezcla, finalmente se elimina dicho disolvente y esto conlleva a que las cadenas poliméricas queden intercaladas entre las nanopartículas y así es como se obtiene el nanocompuesto polimérico.⁴¹

2.5.2 Nanocomposito de matriz cerámica. Estos tipos de nanocompositos utilizan una matriz cerámica con el fin de aprovechar las propiedades que tiene este material, las principales matrices están compuestas por materiales como la alúmina, carburo de silicio y nitruro de silicio, estas matrices ofrecen muy buenas propiedades como una gran resistencia a los esfuerzos mecánicos, y sobre todo una muy buena resistencia a las altas temperaturas sin embargo tienen una baja tenacidad y muy baja conductividad eléctrica y térmica, también estas matrices presentan una alta resistencia a la compresión pero no a la tracción, por esta razón en muchas aplicaciones se entrecruza con esfuerzos que le ayuden al soporte de esta propiedad, usualmente se usan partículas en forma de fibras que le brinden alta resistencia a la tracción.

2.5.3 Nanocompositos de matriz metálica. Estos materiales que conforman una matriz metálica han sido ampliamente estudiados aunque principalmente a nivel

⁴¹ Cabrera E. Estudio de nanocompuestos a base de polietileno con hidróxido de magnesio e hidrotalcita como retardante de flama. Efecto de agentes de acoplamiento y de compatibilización, Tesis Doctoral en Polímeros, Centro de investigación en química aplicada, Huila 2014.

macroscópico y sin embargo desde que se estableció la nanotecnología como rama fundamental para la ciencia esta se ha centrado bastante en estos materiales, este tipo de compuesto se puede clasificar como materiales reforzados continuos y no continuos; una de las grandes necesidades de las industrias es obtener una alta resistencia en sus materiales, un muy buen ejemplo de nanocomposito de matriz metálica son aquellos nanocompositos reforzados con nanotubos de carbono, pues estos nanotubos aportan a la matriz gran resistencia y una alta conductividad eléctrica, estos nanocompuestos tienen una principal aplicación en el automovilismo, en componentes aeroespaciales, en motores de automoción entre otros, estos compuestos incorporan una amplia variedad de combinaciones tanto en de refuerzos como de matrices, por ejemplo el magnesio reforzado con grafeno que se utiliza en la construcción de estructuras satelitales, el aluminio reforzado con carburo de silicio que se utiliza para partes de motores de combustión interna y cobre reforzado con grafeno aplicado a contactos eléctricos.⁴²

⁴² Hernández J. & García J. Revista Ciencia y Desarrollo, Artículo Materiales de Matriz Metálica, México 2010.

3. APLICACIÓN DE ÓXIDO DE GRAFENO Y ÓXIDO DE SILICIO EN FLUIDOS DE PERFORACIÓN

El óxido de silicio (O.S) tiene diversas funciones en diferentes áreas de la industria, ahora se citarán algunas de las investigaciones relevantes que se han hecho tanto a nivel nacional como internacional acerca de las propiedades de este nanomaterial y sus aportes a mejorar funciones de algunos sistemas como es el caso de los lodos de perforación, de manera similar se hará con aquellas investigaciones donde se utilizó como principal material bien sea al óxido de grafeno (O.G) o algún material grafenítico (**Ver Tabla 1**), pues de estas dos composiciones resultará el material final con el que se llevó a cabo el presente trabajo investigativo.

1. En primera instancia se tiene una investigación de la FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMERICAS por parte de una entonces aspirante a título de ingeniero de petróleos llamada KATERIN MARITZA PRIETO REY, la investigación tiene por nombre EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD TÉCNICO-FINANCIERA DE LAS NANOPARTÍCULAS DE SÍLICE COMO ADITIVO PARA EL CONTROL DEL FILTRADO EN EL FLUIDO DE PERFORACIÓN BASE AGUA A NIVEL LABORATORIO, en el año 2017.

En la mencionada investigación⁴³ la autora tuvo como objetivo evaluar el desempeño que tiene la nanosílice en los fluidos de perforación base agua, más exactamente enfatizando en las pruebas de filtrado, para esto inicialmente se realizaron 3 diseños de diferentes de lodos, por cada diseño se prepararon varios lodos con una pequeña diferencia en su composición y adicionalmente a cada uno se le agregó una concentración variada de nanosílice, excepto a uno de ellos (El número 1 en los 3 casos) para tener como referencia a la hora de evaluar y comparar el comportamiento de aquellos fluidos a los que se les había introducido el material

⁴³ Prieto Rey, Op. Cit.

nanoparticulado. Se realizaron varias pruebas entre las que se encontraba la prueba de filtrado y en segunda instancia la viscosidad plástica, punto cedente, alcalinidad, cantidad de cloruros y cantidad de calcio.

- En las pruebas químicas no se encontró influencia en los diferentes lodos de los 3 respectivos diseños, dado que la partícula de nanosílice no le aportó ni cloruros, ni calcio, ni alcalinidad a los diferentes lodos.
 - En las pruebas de reología no se encontró mayor variación de un lodo a otro, por el contrario, con el aumento de la concentración de nanosílice, en varias ocasiones la tendencia de la V_p fue a no cambiar o bajar.
 - Para los 3 lodos, no hubo una reducción substancial en la pérdida del filtrado, por lo que la autora decidió formular un cuarto diseño de fluido de perforación y hacerle las respectivas pruebas, pero con la diferencia de que la prueba de filtrado la realizó a alta presión y alta temperatura (HTHP) pues se esperaba según la literatura que la nanosílice se activara más fácilmente a alta temperatura.
 - Los resultados de la prueba de filtrado a alta presión y alta temperatura indicaron que las nanopartículas de sílice a una concentración de 8 lpb reduce el filtrado en un 34%, porcentaje significativo teniendo en cuenta que las nanopartículas de sílice no afectan las propiedades reológicas, ni las propiedades químicas, además su homogenización con los aditivos es mucho más rápida por su estado coloidal.
 - Adicionalmente concluyó mediante un análisis financiero que, en un periodo de un año, era rentable reemplazar un lodo convencional con un lodo que tuviera incluidas las nanopartículas de sílice, ya que representaba un ahorro del 19% en relación con un lodo convencional.
2. Un trabajo que fue presentado en la exposición internacional de petróleos de Abu Dhabi y en la conferencia que se llevó a cabo en ese mismo país entre los días 7 a 10 de noviembre del 2016, por la SPE, DESARROLLO DE NUEVOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN INTELIGENTES UTILIZANDO

NANOMATERIALES PARA YACIMIENTOS NO CONVENCIONALES, sus autores, Shulian Li, Samuel Osisanya, y Mohammed Haroun, The Petroleum Institute.

Los autores utilizaron como principal justificación para la elaboración de este trabajo investigativo⁴⁴, el hecho de que los fluidos de perforación necesitan un nuevo enfoque para los yacimientos no convencionales, ya que los fluidos clásicos no pueden llegar a nivel de microporo convirtiéndose en no tan efectivos cuando se enfrentan a este tipo de escenarios. Lo que se hizo en esta investigación fue, por medio de pruebas de reología seleccionar dos formulaciones de lodo de entre un grupo numeroso de combinaciones, para obtener así los dos mejores lodos base para enfocar las pruebas con los nanomateriales a los que los investigadores denominaron fluido base 1 (DF1) y fluido base 2 (DF2), una vez obtenidos estos dos lodos mediante el proceso de selección descrito anteriormente, se procedió a hacer una matriz en la cual se combinaban diferentes concentraciones de tres diferentes nanomateriales con los dos fluidos seleccionados, esto con el fin de estudiar su reología y compararla con la misma de los fluidos sin ninguna concentración de nanomaterial, y de esta manera determinar las posibles mejoras de estos materiales a los fluidos base, una vez hecho esto se seleccionaron los mejores resultados de cada uno de los nanomateriales en cada fluido base, obteniendo así los mejores 6 resultados para proceder a realizar pruebas de filtrado, pH y densidad a estos lodos base agua.

En cuanto a los materiales y preparación de los diferentes lodos, los tres nanomateriales utilizados para las prácticas fueron nano-cobre (nano A), nano-silicio 90 (nano B) y nano-silicio OX50 (nano C) según los autores. Cómo se mencionó anteriormente el lodo DF1 provino de la selección de una combinación en una matriz en la que se cruzaban 3 pesos diferentes de Bentonita (15, 20 y 22.5)

⁴⁴ Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, 7-10 de noviembre, Abu Dhabi, Emiratos Árabes Unidos, 2016.

gramos con 3 diferentes porcentajes en peso de bentonita, de NaOH, es decir, de estas posibles 9 combinaciones se seleccionó el lodo con mejores propiedades reológicas (DF1). Para obtener el fluido DF2 se hizo lo mismo, cruzando 3 diferentes porcentajes en peso de bentonita del fluido 1, de goma xantan (0,15%; 0,10% y 0,05%) con 5 diferentes porcentajes en peso de bentonita del fluido 1, de KCl (3%, 2%, 1%, 0,5% y 0,25%), de estas posibles 15 combinaciones se escogió la que mejor reología aportaba dando como resultado el DF2.

Posteriormente a la obtención de los dos fluidos base con los que se probarían los 3 nanomateriales, se procede a realizar pruebas de reología con el fin de obtener los 6 candidatos a evaluar en las pruebas de filtrado y demás, esto se hizo de la siguiente manera: Con DF1 se formularon 4 diferentes lodos a 4 concentraciones (0,1; 0,2; 0,3 y 0,4) gramos de nano A, lo mismo se hizo con el nano B y el nano C, manteniendo los mismos 4 valores de concentración, obteniendo así 12 lodos con concentraciones variables de nanomateriales. Con DF2 se hizo exactamente lo mismo, obteniendo otros 12 lodos con concentraciones variables de los mismos nanomateriales, obteniendo finalmente 24 posibles combinaciones a las cuales les hicieron las respectivas pruebas de reología.

- Para el primer fluido base (DF1), en el caso de la viscosidad plástica no hubo mejoría dado que el fluido base la tenía en 9 cP y los fluidos con los tres nanomateriales en todos los casos fue de 8 cP. Para el caso del esfuerzo de corte, éste tuvo la tendencia a bajar con respecto al fluido base, excepto el nano C que mantuvo esta propiedad igual. Para el caso del esfuerzo de gel a 10 segundos y a 10 minutos si se compara con el fluido base en los dos la tendencia fue a bajar para los tres nanomateriales. Para el caso del pH si se compara con el fluido base solo el nano B lo subió mientras que los demás permanecieron igual. Por último, en el caso de la densidad si se compara con el fluido base en los tres casos permaneció igual.

- Para el segundo fluido base (DF2), en el caso de la viscosidad plástica los tres nanomateriales tendieron a subirla, dado que el fluido base la tenía en 6cP y nano A, nano B y nano C la subieron a 12cP, 9cP y 8cP respectivamente. Para el caso del esfuerzo de corte si se compara con el fluido base en los tres casos la tendencia fue a bajar. Para el caso del esfuerzo de gel a 10 segundos la tendencia fue a bajar excepto con el nano A y en el de 10 minutos en los tres casos la tendencia fue a subirlo. Para el caso del pH nano A y nano B lo subieron mientras que nano C lo bajó. Para el caso de la densidad los tres nanomateriales no surtieron algún efecto pues siempre se mantuvo constante en 8,7 lb/gal.
- Posteriormente a la selección de los anteriores mejores 6 resultados repartidos entre los dos fluidos base y los tres nanomateriales se procedió a hacer las pruebas de filtrado según la norma API, estas arrojaron los siguientes resultados:
- El primer fluido base (DF1) tuvo una pérdida de filtrado de 14,6 ml y un espesor de la torta de 3/32 in, mientras con el nano A se obtuvo una pérdida de filtrado de 14,0 ml y un espesor de la torta de 2/32 in, con el nano B se obtuvo una pérdida de filtrado de 14,4 ml y un espesor de la torta de 1/32 in y finalmente con el nano C se obtuvo una pérdida de filtrado de 12,6 ml y un espesor de la torta de 2/32 in, dando como conclusión que para la primer formulación de lodo base los tres nanomateriales tuvieron un efecto positivo en la reducción de la pérdida de filtrado y en el espesor de la torta formada, a continuación los resultados para el segundo fluido base.
- El segundo fluido base (DF2) tuvo una pérdida de filtrado de 13 ml y un espesor de la torta de 3/32 in, mientras que con el nano A se obtuvo una pérdida de filtrado de 12,8 ml y un espesor de la torta de 2/32 in. Con el nano B se obtuvo una pérdida de filtrado de 13 ml y un espesor de la torta de 1/32 in y finalmente con el nano C se obtuvo una pérdida de filtrado de 13,6 ml y un espesor de la torta de 1/32 in, dando como conclusión que a diferencia del primer fluido base este no arrojó tan buenos resultados con excepción del fluido que contenía nano A, dado que fue el único que obtuvo mejorías en la pérdida de filtrado.

3. El trabajo realizado en la Universidad Nacional de Colombia con sede en Medellín, a cargo STEFANÍA BETANCUR MARQUEZ, fue “MEJORAMIENTO DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN USANDO NANOPARTÍCULAS FUNCIONALIZADAS: EDUCIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE FILTRADO Y DEL ESPESOR DE LA RETORTA” en el año 2014.

La autora tuvo como objetivo la evaluación del uso de nanopartículas funcionalizadas en los fluidos de perforación base agua que permita reducir las pérdidas de filtrado y el espesor de la torta⁴⁵, se usaron para la evaluación dos nanopartículas diferentes, sílice comercial y alúmina comercial, para esto se probaron de manera individual cada partícula y adicionalmente se modificaron superficialmente impregnándolas con diferentes materiales con el método de impregnación incipiente, para el caso de la sílice se usaron porcentajes de 10%, 20% y 30% en masa de CarboximetilCelulosa y de asfáltenos como materiales de impregnación, también se usó un porcentaje de 10% en masa de residuo de refinería el cual su composición es desconocida. Para el caso de la Alúmina se usó una concentración del 15% de níquel como material impregnante y una de 10% de CarboximetilCelulosa. Cabe mencionar que se usó un lodo de perforación base, compuesto por agua y bentonita (Baroid, EE. UU.)

Dado lo anterior se dispuso a realizar las siguientes pruebas; pruebas de viscosidad donde se determinó que el comportamiento del fluido de perforación correspondía al modelo reológico no newtoniano de “Plástico de Bingham” adicionalmente se encontraron los valores de la viscosidad plástica con 7 cp, el punto cedente con 8 lbf/100ft² y la viscosidad aparente con 5 cp. Se realizaron las pruebas de pH y de densidad, siendo estas constantes con las diferentes pruebas, ya que no se agregó ningún material densificante ni de control de pH.

⁴⁵ Betancur M. Op. Cit.

En cuanto a las principales pruebas que fueron las de filtrado y espesor de la torta se obtuvo que:

- Según los resultados obtenidos se encontró que las nanopartículas de alúmina cuando se encuentran solas, es decir, sin ninguno de los recubrimientos de los materiales impregnantes presentó la mayor reducción de pérdida de filtrado siendo esta de un 33.33% estando por encima de las nanopartículas de sílice y sílice impregnada. Sin embargo, la sílice obtuvo mejores resultados en cuanto al espesor de la torta pues la alúmina obtuvo solo una reducción del 46.34%, este bajo desempeño se dio debido a que en el proceso de impregnación las nanopartículas de alúmina no adsorben de manera eficiente la solución acuosa de CMC ni de níquel, debido a su naturaleza hidrofóbica.
 - En el caso de los resultados de la sílice se tiene que esta presenta los mejores resultados en conjunto tanto de pérdida de filtrado como de disminución en el espesor de la torta, cuando la concentración de la impregnación de CMC en las nanopartículas es del 10% y preferiblemente con una concentración de sílice en el lodo de perforación del 0,05%, estos valores de reducción de ambos parámetros son de 23.08% y 70% respectivamente, esto se presentó debido a que las nanopartículas de sílice disminuyeron su capacidad adsortiva a mayores concentraciones de CMC, para este caso las de 20% y 30%, se observó que para esas concentraciones disminuyó la capacidad de flujo de la torta, y por consiguiente, se presentó un mayor espesor de ésta en comparación con menores concentraciones de CMC como lo fue para el caso de 10% de esta última.
4. La investigación realizada por los autores Katherine Price Hoelscher, Guido De Stefano, Meghan Riley, Steve Young, M-I SWACO. Que lleva por título APLICACIÓN DE LA NANOTECNOLOGÍA EN FLUIDOS DE PERFORACIÓN realizada en el año 2012, este trabajo cuenta con la particularidad de que se realizó aplicándose a dos importantes y reconocidos campos como lo son la

formación Marcellus y Mancos que por sus características y similitudes geológicas brindaron la oportunidad de ver el desempeño de las nanopartículas utilizadas a la hora de sellar aquellas zonas donde los poros son de tamaño nanométrico.

El enfoque que tomaron los investigadores para realizar el siguiente trabajo⁴⁶ fue el hecho de que en ese entonces se tenían muchos problemas de estabilidad de pozo en los yacimientos de lutitas con los fluidos que se utilizaban convencionalmente, pues en el caso de lodos base agua dulce causaban la interacción del agua con las arcillas que componían la formación y de esta manera esta se hinchaba y causaba la microfractura de la roca, lo que causaba pérdidas de fluido y profundización de la interacción entre dicha humedad y la formación, aunque los lodos base aceite son una opción que no implica el hinchamiento de las arcillas debido a la mínima interacción de este con la formación, se ve limitado por temas como la contaminación y tratamiento de sus desechos, en esta investigación se buscó la aplicación con confianza de fluidos de perforación base agua en formaciones de lutitas, para ello se utilizaron nanopartículas de silicio que buscan por su pequeño tamaño tapar los poros nanométricos existentes y minimizar en gran medida la interacción de la roca arcillosa con los fluidos mencionados, de esta forma se buscó una mayor estabilidad del pozo. La primera prueba que los investigadores realizaron fue para determinar cuánto afectaba a la estabilidad del pozo el agua dulce, para esto introdujeron una muestra de un núcleo de la formación Marcellus en agua de esta característica por 12 días a 150 °F, observaron la muestra antes, a los 6 días y a los 12 días de sumergida, posteriormente al observar nuevamente se encontraron fracturas de entre 5 a 45 micrómetros, con características similares, este fue el punto de partida para querer innovar o cambiar el enfoque que se tenía con los lodos convencionales que usaban agua dulce.

⁴⁶ SPE International Oilfield Nanotechnology Conference and Exhibition, 12-14 June, Noordwijk, The Netherlands 2012.

Posteriormente se realizan algunas pruebas para determinar la compatibilidad y estabilidad entre algunos materiales conformados por nanosílice comercial, soluciones de sal que están presentes muchas veces en los fluidos de perforación y en la formación, este rango de sales incluyeron cationes de calcio, sodio y potasio, junto con carbonatos, hidróxidos y aniones de cloruro, esto se hizo con tamaños de nanomaterial entre 5 a 100nanómetros, donde se pudo seleccionar a los mejores materiales nanoparticulados. Los candidatos exitosos fueron luego sometidos a una prueba de pérdida de filtrado API modificada utilizando una membrana filtrante hidrofílica con tamaño de poros de 100 nanómetros siendo ese el más pequeño disponible comercialmente. Las pruebas de pérdida de filtrado se realizaron de la siguiente forma: Se separaron las nanopartículas agrupándolas según su diámetro de manera que las partículas más pequeñas de menos de 10 nanómetros quedaran en un grupo, las partículas entre 10 y 30 nanómetros quedaran en otro grupo, las partículas de entre 40 y 50 nanómetros quedaran en otro grupo y finalmente las partículas de 70 nanómetros en adelante, constituyendo así 4 grupos de nanosílice.

Una vez realizadas las pruebas de pérdidas de filtrado se observó que con las nanopartículas del primer grupo (menores a 10 nm) se realizaron 6 pruebas las cuales 3 de ellas arrojaron una lectura de 50 ml de fluido perdido mientras que solo en las otras tres los resultados fueron variables entre 4 ml y 14ml. Con las nanopartículas del segundo grupo (entre 10 nm a 30 nm) se realizaron 8 pruebas donde 3 de estas no arrojaron buenos resultados dando lecturas alrededor de 50 ml, pero en las otras 5 se observó que la pérdida estuvo mayormente en 4 ml. Con las nanopartículas del tercer grupo (entre 40 nm a 50 nm) se realizaron 4 pruebas en las cuales los valores de la lectura estuvieron entre 9 y 17 ml arrojando buenos resultados. Por último, con el grupo en donde se encontraban las nanopartículas con un tamaño mayor a 70 nanómetros se realizaron 5 pruebas donde 2 de ellas llegaban a los 50 ml mientras que las otras 3 arrojaron lecturas entre 16 ml y 23 ml.

Aunque el en tercer grupo se observaron resultados prometedores debido a la homogeneidad de las lecturas, los investigadores concluyeron que es el segundo grupo el que mejor desempeño mostró, dado que fue donde se vio la más baja pérdida de filtrado (4ml) en tres oportunidades, siendo de manera indiferente a las 2 lecturas que mostraban una pérdida de 50 ml, en conclusión las nanopartículas de sílice que estaban entre 10 nm a 30 nm fueron las que más aportaron a taponar la membrana que se utilizó en las diferentes pruebas de filtrado API.

5. A continuación, una investigación realizada en el 2016 por la Universidad de SUEZ que lleva por nombre DISEÑO INNOVADOR DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN CON NANOMATERIALES, su autor, Ph. D. Adel Salem, en ella se muestran diversas investigaciones con relación al trabajo que se realizó el cual le arrojó diversas señales para trabajar las nanopartículas de sílice en pro de la optimización de los fluidos de perforación, siendo la reología, la pérdida de filtrado, los principales parámetros estudiados en este trabajo.

Para la realización experimental de este trabajo⁴⁷ se empezó con un diseño en el que se propuso la composición de 9 diferentes lodos con los cuales se llevaron a cabo las diferentes comparaciones y análisis, estos lodos fueron enumerados del 1 al 9 para su fácil identificación y separados en tres grupos.

En el primer grupo se encuentra el lodo # 1 y el lodo # 2, el primero es el lodo el cual se consideró como base para hacer todas las comparaciones y de las demás formulaciones en las cuales solo era necesario agregar a este lodo base los diferentes aditivos incluyendo las diferentes concentraciones de nanopartículas, esta formulación base se constituyó de principales materiales como Soda Cáustica, KCl, un reductor de pérdida de fluido polimérico, goma xantan, entre otros, lo particular de este lodo es que no contenía bentonita, esto con el fin de estudiar

⁴⁷ Ph. D. Adel Salem. Innovative design of perforated fluid with nanomaterials. Suez University. 2016.

adicionalmente la adición de esta arcilla y su influencia en los diferentes parámetros descritos anteriormente.

El segundo lodo es básicamente la inclusión dentro de la investigación del estudio del PAC, aunque el documento no especifica cuál fue el utilizado, pues este se le adicionó al lodo base con el fin de poder comparar más adelante el desempeño de las nanopartículas tanto con el lodo # 1 como con el lodo # 2.

Dentro del segundo grupo de fluidos de perforación se tiene la base principal del estudio de las nanopartículas de sílice, pues es en este dónde se agregan las diversas concentraciones de nanosílice, conformado por el lodo # 3, lodo # 4, lodo # 5 y el lodo # 6, esto con el fin de realizar las diferentes comparaciones con los dos lodos anteriores y observar el desempeño de los nanomateriales. Teniendo en cuenta cuales fueran los resultados de las pruebas en los lodos anteriores se procedería a la creación del tercer grupo que estaría conformado por el lodo # 7, lodo # 8 y finalmente por el lodo # 9, con estos últimos tres lodos se estudió la respuesta que tuvo la adición de bentonita tanto al lodo base, como al lodo el cual constituía una concentración de PAC y a los diferentes lodos que incluyeron nanomateriales. Posteriormente a la presentación del diseño expuesto por el autor de la investigación se procede a describir los resultados junto con sus respectivos análisis y conclusiones.

Una vez realizadas las pruebas al lodo # 1 perteneciente al primer grupo, este arrojó en sus datos de reología una viscosidad plástica (VP) de 10,5 cP y una pérdida de filtrado a 30 minutos de 13,5 ml, adicionalmente a esto un espesor de la torta de 1/32 in, estos como resultados principales, aunque también se obtuvo un pH de 11,5 y una densidad cercana a 8,7 libras por galón. Posterior a esto se realizó el segundo ensayo con el lodo # 2, el objetivo como se describió anteriormente es visualizar el desempeño de este agente en cuanto a la reología y a la pérdida de filtrado, este arrojó una viscosidad plástica de 13 cP y una pérdida de filtrado de 9 ml a los mismos 30 minutos.

Estudiada y concluida la práctica con el primer grupo se pudo concluir que el PAC utilizado contribuyó en gran parte con el rendimiento del lodo # 2 en comparación con el lodo base, pues para el caso de la lectura del dial para el segundo lodo es casi el doble que para el primero y en la pérdida del filtrado la reducción constituye un 32%, adicionalmente la densidad de este aumentó a 8,8 libras por galón y el pH aumentó a 11,9.

Se realizaron las pruebas con los lodos que constituyen al grupo 2, el primero de ellos, el lodo # 3 estuvo compuesto por la formulación del lodo base, pero con una concentración de 0,14% en peso, de nanosílice, el segundo de este grupo, el lodo # 4 constituye un 0,5% en peso de nanosílice, el tercero, lodo # 5 constituye un 1% en peso, de nanosílice y por último el cuarto de este grupo, el lodo # 6 que constituye un 1,5% en peso de nanosílice.

Resumiendo, los resultados de reología de este grupo en comparación con el lodo base se tiene que todos los lodos tienen un aumento respecto al de comparación, el comportamiento reológico de los lodos # 3, # 5 y # 6 aunque son mayores que el del lodo base no están muy alejadas sus lecturas en el dial, sin embargo, el lodo # 4 es el único que se aleja bastante de los resultados del lodo # 1, es decir, del lodo base.

Para el caso de la pérdida de filtrado se obtuvo que para los cuatro casos hubo una disminución en el volumen de filtrado, sin embargo el lodo # 4 fue el que menos filtrado dejó perder con una reducción del 44,7%, seguida del lodo # 5 con una reducción del 34,09%, lo que concluyó que a la hora de comparar los 4 lodos del segundo grupo con el lodo de referencia se encuentra que a una concentración de 0,5% en peso de nanosílice se obtienen los mejores resultados de reología y de pérdidas de filtrado.

Adicionalmente el autor propuso hacer la misma comparación entre los cuatro lodos que contienen nanopartículas con el lodo # 2, es decir, el lodo que contiene el PAC, esto mostró que en el caso de la reología el lodo que contiene el PAC tiene por lejos

una mucho mejor reología que los demás, y en el caso de la pérdida de filtrado sucedió lo contrario, pues los cuatro lodos con nanopartículas arrojaron mejores resultados que el lodo # 2. Lo que también nos permite concluir que la nanosílice se enfoca más que todo en taponar los poros de la formación y permitir una menor pérdida del fluido de perforación pero que no es un gran competidor a la hora de buscar alzas en la viscosidad de estos fluidos.

Finalmente se tuvieron las pruebas realizadas a los lodos del tercer grupo quien lo conforman el lodo # 7, que se hizo agregando bentonita al lodo base, el lodo # 8 que se formó agregando bentonita al lodo # 2 y por último el lodo # 9 que consistió en agregar bentonita a un nuevo lodo nanoparticulado con 0,7% en peso, de nanosílice, los resultados de las pruebas de reología muestran que los lodos # 7 y # 9 tienen un comportamiento similar pero no muy representativo, por el contrario el lodo # 8 que es el lodo que en su composición contiene el PAC muestra un comportamiento mucho más alto y prácticamente duplica las lecturas del dial en comparación con los otros dos representantes del grupo 3, adicionalmente se muestra que independiente de las comparaciones, la bentonita tuvo un efecto positivo en las viscosidades de los tres fluidos lo que se ve como algo normal si se tienen en cuenta las características de la bentonita.

Por el lado de las pérdidas de filtrado se encontró que el lodo # 7 que es el que está asociado al lodo base fue el que peor desempeño tuvo en esta prueba, el lodo # 8 aunque tuvo el mejor desempeño en reología no obtuvo tan buenos resultados a la hora de medir este parámetro pues fue el lodo # 9 quien estaba asociado a las nanopartículas el que se desempeñó de la mejor manera obteniendo una lectura de casi 7 ml muy diferente a la de 10 ml y 12,5 ml que obtuvieron los otros dos fluidos participantes.

6. Una investigación que fue expuesta en la cuarta conferencia internacional sobre ingeniería de procesos y materiales avanzados fue nombrada **COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE NANO-CAPAS DE GRAFENO EN**

FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASE-ACEITE HIDROGENADO, proveniente de Malasia en el año 2016.

En esta investigación⁴⁸ los autores estudiaron el efecto en la reología, más exactamente el estudio de la viscosidad y el esfuerzo de corte de un lodo de perforación base aceite hidrogenado, cuando a este se le adicionan diferentes concentraciones de láminas de grafeno. Para preparar los diferentes fluidos los autores utilizan el mecanismo de cavitación hidrodinámica y un baño en ultrasonido por tres horas para la dispersión de los materiales nanoparticulados en cada uno de los fluidos a probar, las concentraciones en peso de las nanopartículas utilizadas para estos experimentos fueron de 25 ppm, 50ppm y 100 ppm.

En cuanto a materiales para este experimento los autores utilizaron monocapas de átomos de carbono empaquetados fuertemente en una estructura bidimensional, esta fue observada con un microscopio electrónico de transmisión (TEM), y analizada bajo espectroscopia infrarroja con la cual detectaron grupos OH en su estructura al igual que la presencia de algunos alquinos y la presencia de enlaces entre átomos de Carbono con Nitrógeno, esto último se dio a que quedó presencia de este elemento cuando se estaba llevando a cabo la exfoliación del grafeno con ácido nítrico. Por parte del aceite hidrogenado que se utilizó se determinó que este contenía alcanos entre C15 a C18 siendo estos de manera lineales y ramificados, este tenía una densidad de 780kg/mc medida a 15 °C, el aceite hidrogenado no contenía propiedades oxidantes y era insoluble en agua.

Una vez obtenidos los materiales se preparó el fluido a base de aceite hidrogenado pasándolo con las nanocapas de grafeno por la bomba de cavitación utilizada durante 15 minutos y posteriormente al equipo que le brindó el ultrasonido para la

⁴⁸ Chai Yee Ho, Suzana Yusup, Chok Vui Soon, Mohamad Taufiq Arpin, Rheological Behaviour of Graphene Nano-sheets in Hydrogenated Oil-based Drilling Fluid, Procedia Engineering, Volume 148, 2016, Pages 49-56.

dispersión homogénea de estas capas, posteriormente se procedió a realizar las pruebas para el estudio de su reología.

La viscosidad de este fluido se determinó con un reómetro Malvern Bohlin Gemini II, el cual fue conectado a una placa de calentamiento para variar la temperatura en un rango de 30 °C a 50 °C, los datos recolectados incluyeron viscosidad, esfuerzo de corte y velocidad de corte a una temperatura dada.

Los autores estudian los modelos reológicos del modelo de Plástico de Bingham y Ley de Potencia dado que estos dependen de la viscosidad en relación con la velocidad de corte, ellos seleccionan estos modelos dado que los lodos de perforación son descritos generalmente con modelos reológicos como estos.

Una vez hechos los estudios de reología se obtuvieron los siguientes resultados y conclusiones teniendo en cuenta que estos se hicieron en el rango de 0 a 140 s⁻¹ y a las condiciones de temperatura descritas anteriormente, utilizando un mismo fluido sin las nanopartículas en cuestión, como base de comparación:

- Lo primero que los autores describieron fue la determinación del esfuerzo de corte a diferentes concentraciones y temperaturas con el fin de establecer el modelo reológico que rige al fluido, la respuesta de este según los datos experimentales que obtuvieron es que se ajustan muy bien a los dos modelos planteados anteriormente, teniendo respuesta entre 20s⁻¹ hasta los 140s⁻¹ sin embargo, a altas tasas de cizallamiento el modelo de ley de potencias se desajusta un poco.

Los datos arrojados por las mediciones mostraron que en general al aumentar la concentración de placas de óxido de grafeno aumentaba la viscosidad cuando se trabajaba a una temperatura de 30 °C, pues comparando con el fluido base que se tenía, en el caso de la concentración de 25 ppm se obtuvo un incremento del 16% de viscosidad, posteriormente con una concentración de 50 ppm se obtuvo un incremento del 39% y finalmente con una concentración de 100 ppm

se alcanzó un incremento en la viscosidad del 50% dando como conclusión que con el incremento de la concentración también aumentaba la viscosidad.

- Por otro lado entre los experimentos, los investigadores también estudiaron la caída de la viscosidad del fluido en las concentraciones descritas con el aumento de la tasa de corte y observaron que, manteniendo la premisa de que a mayor carga de nanopartículas mayor la viscosidad, a medida que se iba aumentando la tasa de corte estas viscosidades iban cayendo exponencialmente, tanto en el fluido base como en los que contenían las nanocapas, es decir, desde $0,01s^{-1}$ hasta $0,1s^{-1}$ las viscosidades de los 4 fluidos estudiados caían regularmente, pero desde $0,1s^{-1}$ hasta $140s^{-1}$ por el hecho de que éstas eran exponencial las viscosidades llegaron a ser muy similares en todo los fluidos, es decir, en palabras más claras, a medida que se aumentaba la tasa de corte sin importar la concentración de grafeno, las diferentes viscosidades se iban pareciendo cada vez más pero con la premisa de que siempre estas iban a decrecer.
7. En la Universidad de Rice en Houston Texas, se realizó la investigación MATERIAL A BASE DE GRAFENO UTILIZADO EN LA ESTABILIZACIÓN DE SHALES Y SU USO realizada por sus autores Jennifer L, Nancy J y Steven J. en esta investigación se estudia el desempeño del grafeno y algunos de sus derivados como el óxido de grafeno en la estabilización de shales.

En la investigación⁴⁹ se llevaron a cabo diferentes métodos para el estudio de cada uno de los compuestos para ser usados en la formación, que incluyen el uso de material a base de grafeno, los materiales usados fueron el grafeno, óxido de grafeno, grafeno convertido químicamente y óxido de grafito derivatizado los cuales fueron descritos y caracterizados por los investigadores llegando a la conclusión

⁴⁹ Jennifer L, Nancy J y Steven J. Graphene-based material for shale stabilization and method of use. Rice University. Houston.

que podrían servir para cumplir los objetivos planteados. También en otra sección el óxido de grafeno lo complementan con otros materiales aprovechando la facilidad que estos tienen para relacionarse con otros por medio de sus grupos oxigenados, estos fueron el óxido de grafeno metilado (MeGO), el óxido de grafeno butilado (BuGO) y combinación con algunas aminas orgánicas.

En resumen, se obtuvo que todos los materiales a base de grafeno incluyendo el grafeno solo redujeron el filtrado cuando se realizaron las pruebas en comparación con el lodo base que se estaba usando, en algunos casos dependiendo del método usado para la medición de estos parámetros se produjo una reducción del daño a la permeabilidad permitiendo la estabilización de los shales, las pruebas realizadas con las láminas de grafeno solas tuvieron la mejor tendencia a no dejar pasar el fluido a través de la zona permeable de muy baja permeabilidad, esto se debió al pequeño tamaño de estas láminas, precisamente a su forma de capa plana las cuales de acuerdo al método usado, estas cuando adquieren un ordenamiento especial se pueden acomodar de manera que las capas planas sellen con mayor eficiencia los nanoporos que cuando son sellados con alguno de los derivados de este dado que en esos casos se pierde un poco y en otros casos mucho el carácter laminar lo cual le dificulta el ordenamiento en forma de barrera frente a la cara de los poros de los shales.

- 8.** La investigación ALTA EFECTIVIDAD DE UN AGENTE TAPONADOR DE SHALES BASADO EN EL USO DE GRAFENO QUIMICAMENTE MODIFICADO⁵⁰, realizada por un grupo de investigadores que pretendieron como idea principal comparar la eficiencia de las láminas de grafeno como agente taponador de shales con las mismas láminas cuando estas fueron modificadas, este trabajo fue expuesto en Revista de Ciencia e Ingeniería del Gas Natural, Volumen 32 del año 2016.

⁵⁰ An. Yuxiu, Jiang, Guancheng. In Journal of Natural Gas Science and Engineering; 2016, 32; 347-355.

El equipo investigativo realizó el procedimiento en laboratorio que generalmente se sigue cuando se prueba una nanopartícula, en el primer caso se realizó con láminas de grafeno para comprobar su desempeño y eficiencia a la hora de taponar nanoporos encontrados en las zonas de shales cuando se perforan estas formaciones, en resumen la respuesta de estas partículas en el taponamiento de los poros fue positiva, permitiendo menormente el paso del filtrado y con ello logrando una menor hinchazón de las arcillas cuando se comparaba con el lodo solo con los aditivos tradicionales. En la segunda parte de la investigación se comprendieron los mismos procedimientos estándares utilizados en la primera, en esta parte las láminas de grafeno se modificaron con Etilendiamina a lo cual los autores colocaron el nombre de EDA-G. En la realización posterior de las pruebas en laboratorio estas partículas tuvieron una mejor efectividad para sellar los nanoporos, además comparándolo con otros materiales nanoparticulados esta adición de EDA-G en los lodos de perforación resultó en la menor pérdida de filtrado en algunas condiciones específicas pues en general esta lámina modificada químicamente fue absorbida por los shales y formó una muy delgada capa junto con los demás aditivos del lodo usado, a su vez esta delgada capa impidió la invasión de agua a la formación del shale. Lo que se hizo fue desarrollar un tipo de agente taponador derivado del grafeno capaz de sellar aquellos poros de diámetro nanométrico presentes en la formación de shale, cuando se realizaron las comparaciones se encontró que el EDA-G presentó mejores resultados en el taponamiento e inhibición de la hidratación de los shales que los que el grafeno había presentado inicialmente, adicionalmente para esto se utilizaron corazones artificiales con muy baja permeabilidad para medir la eficiencia de las membranas utilizadas a lo largo de las pruebas.

Tabla 1. Resumen investigaciones O.G y O.S en fluidos de perforación.

AUTOR	NANOPARTÍCULA UTILIZADA	PROPIEDADES TRATADAS	RESULTADOS OBTENIDOS
PRIETO K.	Óxido de silicio	Reología y Control de filtrado	El óxido de silicio no tuvo cambio en la reología, tuvo una reducción del 34% en la pérdida de filtrado a una concentración de 8 lpb solo cuando las pruebas se realizaron a condiciones HTHP.
Shulian Li, Samuel Osisanya y Mohammed Haroun	Nano-cobre, Nanosílice 90, Nanosílice OX50	Reología y Control de filtrado	El nanocobre tuvo el mejor desempeño reológico duplicando la VP, también fue la nanopartícula que mejor trabajó en la pérdida de filtrado
Betancur S.	Sílice Comercial y Alúmina Comercial	Pérdida de Filtrado y Espesor de la Torta	La alúmina tuvo la mayor reducción de filtrado con 33% mientras que la sílice tuvo la mayor disminución del espesor siendo de un 70%
Hoelscher, De Stefano, Riley y Young	Nanosílice	Pérdida de Filtrado	Las nanopartículas entre 10 y 30 nanómetros fueron las que mejor se desempeñaron
Salem A.	Sílice	Reología y Control de filtrado	Con un 0,5% en peso de Sílice se obtuvieron los mejores resultados en reología y con un 0,7% en peso los mejores en filtrado.
Conferencia Internacional de Ingeniería de Procesos, 2016	Grafeno	Viscosidad	La viscosidad aumentó un 16% con partículas de 25 nm, 39% con partículas de 50 nm y un 50% con partículas de 100 nm
Jennifer L. Nancy J. y Steven J.	Grafeno y Óxido de Grafeno	Pérdida de Filtrado	Las láminas de grafeno cuando están solas tienen mayor eficiencia a la hora de taponar los nanoporos de los shales
Revista de Ciencia e Ingeniería del Gas Natural, 2016	Láminas de grafeno químicamente modificadas	Pérdida de filtrado	Las nanocapas de grafeno obtuvieron un mejor desempeño cuando fueron recubiertas con Etilendiamina

3.1 ANÁLISIS DE LA VISCOSIDAD Y FILTRADO EN LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Según el manual del ingeniero del Instituto Americano del Petróleo (API) algunas de las maneras de incrementar la viscosidad de un lodo de perforación, es aumentar la cantidad de sólidos que componen el fluido, tal es el caso de una adición de bentonita al mismo que da como resultado entre otros el aumento de su viscosidad; otra forma de aumentar la viscosidad de un lodo es cuando se disminuye el tamaño de sus componentes sólidos pues estos comprenden un área superficial mayor, y a su vez este aumento representa una mayor interacción electrostática entre las diferentes partículas; otra forma de aumentar la viscosidad de un lodo de perforación está en la forma de las partículas sólidas que lo componen, pues es de saberse que una forma plana o laminar tiene una mayor área superficial por unidad de masa que en el caso de una partícula de forma esférica o similar; finalmente se puede encontrar el aumento de la viscosidad de un fluido de perforación con la combinación de las anteriores posibilidades, bien sea la adición de sólidos, la disminución del tamaño de las partículas o la forma de estas.

Como se ha visto anteriormente en las investigaciones expuestas en este trabajo, se deja al descubierto las propiedades que tienen las nanopartículas de óxido de grafeno a la hora de aumentar dichas interacciones y de esta manera propiciar el aumento de la tensión de corte cuando se le aplica un esfuerzo al lodo que previamente las contiene, así aumentando la viscosidad plástica, el punto cedente y los esfuerzos de gel a los diferentes tiempos en los cuales fueron medidos, en estos casos es innegable que tanto el diminuto tamaño del óxido de grafeno utilizado junto con su forma laminar donde permite una muy alta relación entre el área de superficie y el volumen de material fueron los que permitieron ese aumento en las fuerzas electrostáticas entre las partículas que componían a dichos fluidos utilizados.

En el caso de las investigaciones que se enfocaron a evaluar los comportamientos de los lodos en cuanto a las pruebas de pérdidas de filtrado y al análisis de la torta se tiene que el principal compuesto para este fin con muy buenos resultados fue el óxido de silicio con un tamaño nanométrico, en estas investigaciones se pusieron a prueba la capacidad que tiene este compuesto para sellar la cara de las formaciones y formar una torta más eficiente con mejores características y por su puesto permitiendo lo menos posible la pérdida de fluido para la formación de esta.

La principal característica que presenta el óxido de silicio como agente taponador es su tamaño nanométrico que en muchas ocasiones varía entre 5 a 100 nanómetros, pues este minúsculo tamaño ayuda considerablemente a sellar los poros que existen en diversas formaciones y que están de igual manera a una escala nano, generalmente es el material bentonítico el encargado de formar la torta en la pared del pozo, sin embargo, debido a su tamaño quedan muchas partes que no sella con eficiencia.

Adicionalmente con el uso de estos nanomateriales, se tendrá un buen complemento en aquellas zonas donde las partículas de bentonita no alcanzan a sellar, también se tiene una noción positiva acerca de este fenómeno en cuanto a la variedad de tamaño de las mismas partículas de sílice, es decir, en la misma cara de la formación que se esté perforando no se va a tener un solo tamaño de poro por muy nanométrico que sean estos, por lo que es muy conveniente que a la hora de sintetizar estas partículas se pueda contar con una variedad de tamaño para que cuando se forme la torta por medio de la presión diferencial requerida para tal accionar, esta se forme aprovechando los beneficios que le puede brindar cada una de las partículas por individual encajando en alguno de sus poros con los que se forme el emparejamiento para sellar cada uno de ellos.

3.2 APLICACIÓN DEL ÓXIDO DE GRAFENO Y ÓXIDO DE SILICIO EN UN NANOCOMPOSITO

Teniendo en cuenta la revisión bibliográfica anterior acerca de las propiedades para aumentar la reología en los lodos de perforación, del óxido de grafeno por sus características físicas y químicas, y las del óxido de silicio por su capacidad de sellar las diferentes caras de las formaciones donde los demás componentes del lodo tradicional no pueden llegar; la presente investigación propone formular un nanocomposito constituido por estos dos compuestos los cuales interactuarán en un medio acuoso por medio de fuerzas electrostáticas débiles como las de Van der Waals, y adicionarlo a un lodo de perforación base, formulado previamente, esto con el fin de observar y estudiar el comportamiento principalmente de la reología y de las pérdidas de filtrado . El objetivo es aprovechar las propiedades que cada uno tiene, como se ha descrito anteriormente y evaluar las propiedades en comparación con las que presentan los componentes por separados.

Dado que no se tiene mayor información acerca de resultados de investigaciones en donde se han utilizado de manera conjunta estos materiales y se hayan estudiado los rendimientos y comportamientos de algún nanocompuesto en fluidos de perforación y menos donde se pueda tener una idea más clara de cómo podría ser la interacción entre estos dos compuestos en particular, se espera que el comportamiento del lodo cuando contenga al nanocomposito conserve las propiedades que estos mostraron cuando se evaluaron individualmente o que estas propiedades mejoren cuando las dos nanopartículas entren en contacto y empiecen a interactuar entre ellas.

4. DISEÑO EXPERIMENTAL

El hombre siempre ha mostrado un interés en qué pasa con él y el medio que lo rodea, y es por eso la búsqueda constante a sus interrogantes que lo ha hecho crear métodos para tal fin. Entre estos tenemos los experimentos, cuya finalidad es el descubrir algo acerca de un sistema o proceso. Su pionero fue Sir Ronald A. Fisher en los años 1920 y principios de la década de 1930, donde se percató que las fallas en experimentos en su trabajo (Estación Agrícola Experimental de Rothamsted en Londres, Inglaterra) dificultaban el posterior análisis de los datos obtenidos; llevándolo a incorporar el pensamiento y principios estadísticos en el diseño de investigaciones experimentales. Además, desarrolló la idea que lo condujo a crear los tres principios fundamentales en investigación: Realización de réplicas, aleatorización y formar bloques.

En los 30 años siguientes se desarrollaron nuevas técnicas de diseño en la industria química y de procesos, sobre todo en los trabajos de investigación y desarrollo; todo esto liderado por George Box. En la década de 1970 conocida como la tercera era del diseño estadístico, por Genichi Taguchi, donde propugnaba por el uso de experimentos diseñados para lo que denominó el diseño paramétrico robusto; el cual trataba de hacer procesos insensibles a factores de difícil control, como los ambientales y del entorno de trabajo, haciendo más eficiente un proceso o sistema. Todo esto llevando a la definición de un experimento como una prueba o serie de pruebas en las que se hacen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema para identificar las razones de los cambios que pudieran observarse en la respuesta de salida.⁵¹

Lo cual es considerado como base del aprendizaje, donde de forma ordenada se llega a conjeturas sobre cualquier proceso, seguido de experimentos que generen

⁵¹ Diseño de experimentos de Montgomery.

una serie de datos que lleven a nuevas conjeturas con aras de realizar nuevos experimentos que refinen la calidad de los datos y aumenten el porcentaje de éxito en la investigación, además de mejorar el rendimiento del proceso, tiempos y costos asociados. En la ingeniería es muy importante un buen diseño experimental, para así garantizar la eficiencia de los procesos a los que haya lugar, ayudando a afrontar los desafíos que a diario un ingeniero debe resolver, en otras ocasiones optimizar procesos, diseño de nuevos productos o desarrollo de procesos de manufactura; donde ir cambiando variables dependiendo del resultado obtenido y de cual se quiere obtener, hasta llegar a un buen resultado hace una de las mejores herramientas que posee un profesional a la hora de enfrentar desafíos.

4.1 SÍNTESIS DEL ÓXIDO DE GRAFENO

El óxido de grafeno requerido para llevar a cabo las pruebas para la formación del nanocomposito fue sintetizado por parte de los autores en el laboratorio de investigación LEAM del parque tecnológico UIS Guatiguará, utilizando el método de Hummers que se encuentra descrito en el trabajo de grado SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE GRAFENO QUÍMICAMENTE REDUCIDO (CRG), EMPLEANDO TÉCNICAS ESPECTROSCÓPICAS Y MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO, realizado en el año 2012.

4.2 CARACTERIZACIÓN DEL O.G SINTETIZADO

Una vez se sintetizó la cantidad suficiente de óxido de grafeno en el laboratorio, se precedió a caracterizarlo mediante DRX y RAMAN con el fin de conocer sus propiedades.

4.3 DEFINICIÓN DE VARIABLES

En la **Tabla 2** se presentan las diferentes variables de respuesta (dependientes e independientes) tenidas en cuenta durante la realización de la investigación.

Tabla 2. Identificación y Definición de variables.

VARIABLE	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN
Independiente	2	Concentración Oxido de Silicio (O.S) Concentración Oxido de Grafeno (O.G)
Dependientes	7	YP, VP, VA, Filtrado API, Torta, pH, Densidad

4.4 PRUEBAS PRELIMINARES CON O.G Y O.S

Se quiere probar un Nanocomposito el cual consta de mezclar partículas nanométricas como lo son óxido de grafeno (O.G) y óxido de silicio (O.S) en un fluido de perforación base agua. Como premisa se prevé que cada una de las nanopartículas aporte las características que presentarían por separado al ser agregadas a un fluido de perforación. Se realizó un estudio preliminar de cada una de las nanopartículas que conforman la mezcla final.

Como primer paso se definió trabajar un lodo base agua con solo bentonita, encargada de dar cuerpo al fluido; esto es con el fin de observar con mayor facilidad que aportes hay en el estudio de las propiedades del lodo de perforación; ya que, si se tiene otros aditivos encargados de modificar estos parámetros, se podría tener interferencia en la exactitud de toma de datos. Se definieron varias concentraciones de las nanopartículas a usar (O.G y O.S), además de datos que se tomaron en estas pruebas (**Tablas 3 y 4**), para después realizar el estudio en el fluido de perforación con cada una. Para el caso del O.G que se encuentra en suspensión acuosa con una concentración de 11000 ppm; primero se definieron las cantidades a usar en unidades estándar para aditivos en esta área [Lb/Bbl], y después ser llevados a [ppm], para en seguida poder calcular que volumen de O.G equivale en cada caso para agregar a cada lodo, dependiendo la concentración planteada.

En el caso del O.S, este se encuentra en estado sólido y solo fue definir las cantidades a usar, las concentraciones también fueron llevadas a ppm para poder tener una referencia en comparación al O.G.

Tabla 3. Concentraciones O.G y datos a obtener en laboratorio.

Bentonita [Lb/bbl]	Concentración O.G		Lectura del dial de Reómetro			
	[ppm]	[Lb/bbl]	⊖ 300	⊖ 600	Gel 10 Segundos	Gel 10 Minutos
25	0	0				
25	100	0,035				
25	200	0,07				
25	571	0,2				
25	1142	0,4				
25	3714	1,3				

Tabla 4. Concentraciones O.S y datos a obtener en laboratorio.

Bentonita [Lb/bbl]	Concentración O.S		Lectura del dial de Reómetro			
	[ppm]	[Lb/bbl]	⊖ 300	⊖ 600	Gel 10 Segundos	Gel 10 Minutos
25	0	0				
25	50	0,0175				
25	100	0,035				
25	150	0,0525				
25	500	0,175				
25	1000	0,35				
25	2500	0,875				
25	5000	1,75				

También se obtuvieron datos de la prueba de filtrado y posteriormente registrados en la **Tabla 5**, como lo son los [ml] de filtrado y propiedades de la torta o cake, que fueron dadas en 1/32 de pulgada. Pudiendo tener más parámetros de evaluación en el estudio realizado.

Tabla 5. Concentraciones nanomaterial y toma de datos prueba de filtrado.

Concentración		Volumen de Filtrado (ml)	Análisis de la Torta		
Lb/Bbl	ppm		Consistencia	Rigidez	Espesor [1/32 in]

Seguido a realizadas las pruebas y obtenidos los datos, se pueden procesar con el fin de saber valores como viscosidad plástica (VP), viscosidad aparente (VA) y punto cedente (YP), llevando un control con la ayuda de las **Tablas 6 y 7** así pudiendo interpretar los resultados en aras de visualizar un panorama más claro en la investigación.

Tabla 6. Concentraciones O.G y datos obtenidos con resultados de laboratorio.

Bentonita [Lb/bbl]	Concentración O.G		VP [cP]	VA [cP]	YP [lb/100 ft ²]
	[ppm]	[Lb/bbl]			
25	0	0			
25	100	0,035			
25	200	0,07			
25	571,43	0,2			
25	1142,86	0,4			
25	3714,3	1,3			

Tabla 7. Concentraciones O.S y datos obtenidos con resultados de laboratorio.

Bentonita [Lb/bbl]	Concentración O.S		VP [cP]	VA [cP]	YP [lb/100 ft ²]
	[ppm]	[Lb/bbl]			
25	0	0			
25	50	0,0175			
25	100	0,035			
25	150	0,0525			
25	500	0,175			
25	1000	0,35			
25	2500	0,875			
25	5000	1,75			

4.5 PRUEBAS NANOCOMPOSITO

4.5.1 Pruebas de Compatibilidad. Para ello se evaluaron los dos nanofluidos individualmente y como mezcla (Nanocomposito) en un lodo de perforación base agua con diferentes aditivos comúnmente usados, por lo tanto, se realizaron estas pruebas de compatibilidad con cada uno de estos aditivos. En esta oportunidad para cada caso se trabajará una muestra de 100 ml de agua fresca, más el aditivo a probar y una cantidad fija del compositos (0,4 gramos/350 ml de O.G y 0,053/350 ml de O.S, escalado a 100 ml) estas dosificaciones son obtenidas tras buenos resultados en pruebas preliminares con cada uno por separado. En la **tabla 8** se muestra las diferentes combinaciones a realizar para estas pruebas.

Tabla 8. Pruebas de compatibilidad.

1	Composito + Agua
2	Composito + Bentonita + Agua
3	Composito + PAC-L + Agua
4	Composito + Soda Caustica + Agua
5	Composito + PAC-R + Agua
6	Composito + Barita + Agua
7	Óxido de Silicio + Agua
8	Óxido de Silicio + Bentonita + Agua
9	Óxido de Silicio + PAC-L + Agua
10	Óxido de Silicio + Soda Caustica + Agua
11	Óxido de Silicio + PAC-R + Agua
12	Óxido de Silicio + Barita + Agua
13	Óxido de Grafeno + Agua
14	Óxido de Grafeno + Bentonita + Agua
15	Óxido de Grafeno + PAC-L + Agua
16	Óxido de Grafeno + Soda Caustica + Agua
17	Óxido de Grafeno + PAC-R + Agua
18	Óxido de Grafeno + Barita + Agua

Las observaciones se realizaron a:

- Al momento de mezclado
- Un (1) día después
- Cinco (3) días después
- Diez (10) días después

- Quince (15) días después
- Treinta (30) días después

Aditivos que probar:

- Bentonita
- PAC-L
- PAC-R
- Hidróxido de Sodio (NaOH)
- Carbonato de Calcio (CaCO₃)

En las **Tablas 9 y 10**, se muestran los aditivos, nanomateriales y sus respectivas cantidades a utilizar en la realización de las pruebas.

Tabla 9. Cantidad de aditivo usado en pruebas de compatibilidad.

ADITIVO	CANTIDAD ADITIVO	
	LIBRAS/BBL	GRAMOS/100 ML
Bentonita	25	7,143
PAC-L	0,5	0,143
PAC-R	0,5	0,143
NaOH	0,5	0,143
CaCO ₃	3,5	1

Tabla 10. Cantidad de nanocomposito usado en pruebas de compatibilidad.

COMPOSITO [O.G + O.S]	CANTIDAD		
	GRAMOS/BBL	GRAMOS/100 ML	PPM
O.G	0,35	0,100	1000
O.S	0,0525	0,015	150

Además, en la **Tabla 11** se puede llevar un registro de las observaciones que se den con el transcurso del tiempo, y así poder realizar un control estricto de las características de las diferentes mezclas y de los cambios a que haya lugar durante la realización de las observaciones.

Tabla 11. Formato para observaciones de pruebas de compatibilidad.

MUESTRA			Concentración Composito	Concentración otros Aditivos
Agua + composito + Un aditivo			O.G : [Gramos y ppm] O.S : [Gramos y ppm]	[Gramos y ppm]
FECHA			PH	OBSERVACIONES
DIA	MES	AÑO		
			Toma Inicial	1
				2
				3
				4
FECHA			PH	OBSERVACIONES
DIA	MES	AÑO		
			Toma a 1 Hora	1
				2
				3
				4
FECHA			PH	OBSERVACIONES
DIA	MES	AÑO		
			Toma a 1 Día	1
				2
				3
				4
FECHA			PH	OBSERVACIONES
DIA	MES	AÑO		
			Toma a 5 Días	1
				2
				3
				4
FECHA			PH	OBSERVACIONES
DIA	MES	AÑO		
			Toma a 10 Días	1
				2
				3
				4
FECHA			PH	OBSERVACIONES
DIA	MES	AÑO		
			Toma a 15 Días	1
				2
				3
				4

Fuente: Tomado de FAJARDO, A., RODRÍGUEZ, C., 2009.

Entre las observaciones tenidas en cuenta:

1. Color
2. Presencia de espuma o burbujas
3. Presencia de precipitados
4. Otras observaciones

4.5.2 Pruebas de reología y filtrado con Nanocompositos. Después de obtenidos y analizados los resultados de pruebas preliminares realizadas con cada uno de los nanomateriales a conformar el nanocomposito, se llegó a la conclusión de trabajar una concentración adecuada de 0,35 lb/bbl de O.G y 0,0525 lb/bbl de O.S. La formulación del lodo se puede observar en la **Tabla 12**, donde las cantidades definidas son en base a consultas de valores normalmente usados en un lodo sencillo base bentonita, además de consultar el valor de rendimiento de la arcilla a usar en este caso, el cual está entre 20 y 30 Lb/Bbl. Por limitaciones en el material se propone una matriz en forma de cruz (**Figura 15**), donde se mantuvo fija una concentración mientras la otra variaba, así tomando datos superiores e inferiores a la concentración adecuada que corresponda a cada nanomaterial. En la **Tabla 13** se presenta las diferentes concentraciones para la prueba, definidas en base a pruebas preliminares. Además, en las **Tablas 14 y 15** se llevó el registro de los datos obtenidos en las pruebas de reología y de filtrado.

Tabla 12. Formulación de lodo para prueba con Nanocomposito.

Aditivo	Cantidad [Lb/Bbl]
Bentonita	25
Pac-I	0,5
Soda Caustica	Agregar hasta llevar a un pH de 9

Se decidió asignar una identificación a cada una de las combinaciones a realizar en laboratorio (ID prueba), con el fin de tener mayor facilidad cuando al rotular las muestras y realización de análisis gráfico.

Tabla 13. Pruebas que realizar con Nanocomposito.

ID Prueba	O.G [ppm]	O.S [ppm]	O.G [Lb/Bbl]	O.S [Lb/Bbl]
1	1000	150	0,35	0,0525
2	1000	500	0,35	0,175
3	1000	1000	0,35	0,35
4	1000	100	0,35	0,035
5	1500	150	0,525	0,0525
6	2000	150	0,7	0,0525
7	500	150	0,175	0,0525
8	3000	150	1,05	0,0525
9	1000	1500	0,35	0,525
TOTAL			4,2	1,3475

Figura 15. Matriz en cruz para pruebas con Nanocompositos.

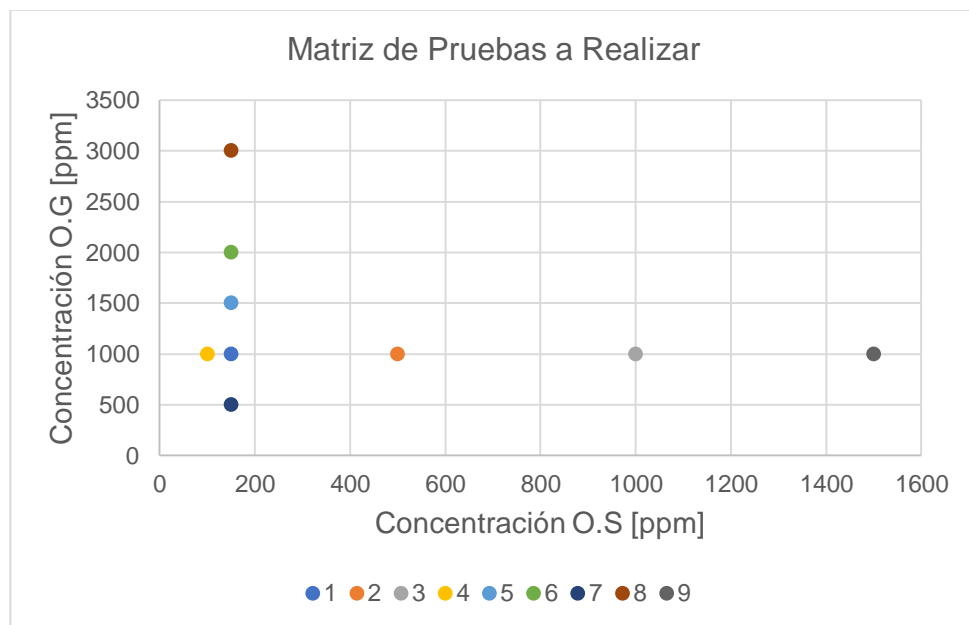


Tabla 14. Registro y control propiedades reológicas para fluido con nanocomposito.

Bentonita [Lb/bbl]	Concentración [Lb/Bbl]		Esfuerzo de gel										
	O.G	O.S	⊖ 600	⊖ 300	⊖ 200	⊖ 100	⊖ 6	⊖ 3	10 Seg	10 Min	Yp	VP [cP]	VA [cP]
25													
25													
25													
25													
25													
25													
25													
25													
25													
25													

Tabla 15. Registro propiedades filtrado para fluido con nanocomposito.

Concentración [Lb/Bbl]		Densidad [Lb/Gal]	pH	Volumen de Filtrado (ml) @ 30 minutos	Análisis de la Torta		
O.G	O.S				Consistencia	Rigidez	Espesor

4.5.3 Reología con el paso del tiempo (Envejecimiento de lodo). Se hizo una prueba de envejecimiento del lodo, planteando como concentración del nanocomposito las mencionadas como las adecuadas en las pruebas preliminares. Las cuales fueron 0,35 Lb/Bbl de O.G y 0,0525 Lb/Bbl de O.S. Es de aclarar que la cantidad de aditivos para construir el lodo será la misma que se trabajó a la hora de probar todas las concentraciones del Nanocomposito (**Tabla 12**) en la realización de pruebas de filtrado y reología. Se prepararon dos lodos, uno se probó sin material nanométrico que sirvió para comparar el otro lodo de iguales características, pero con el Nanocomposito. A estos lodos les fueron evaluadas sus propiedades reológicas durante lapsos de tiempo diferentes (**Tabla 16**). Con ello se quiso saber qué sucedió a lo largo que el tiempo pasó, si las propiedades permanecieron igual

o sufrieron cambio significativo el cual alteró las propiedades del fluido de perforación.

Tabla 16. Registro y control propiedades reológicas para fluido envejecido con nanocomposito.

Tiempo envejecimiento	Densidad [Lb/Gal]	pH	Velocidad de Corte [RPM]					Esfuerzo de gel		Yp	VP [cP]	VA [cP]
			∅ 600	∅ 300	∅ 200	∅ 100	∅ 6	∅ 3	10 Seg			
Mezclado												
5 Horas después												
1 día después												
5 días después												
6 días después												
7 días después												

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 SÍNTESIS DEL ÓXIDO DE GRAFENO

- **Selección y exfoliación inicial del O.G**

Como se indicó en el primer capítulo, las propiedades del óxido de grafeno difieren levemente en el tipo de grafito que se utilice para su síntesis, en este caso se utilizó grafito en hojuelas (*flakes*) el cual fue pulverizado y tamizado en una malla de acero de 40 micrones obteniendo así cristales de grafito con una alta similitud de tamaño como se puede observar en la **figura 16**. Posteriormente a la obtención de estos cristales de grafito se procedió a hacer una exfoliación previa a la oxidación de este. Este proceso consistió en someter los cristales a ultrasonido para la dispersión y mayor exfoliación del grafito previamente oxidado.

Figura 16. Grafito tamizado en malla de 40 micrones.



Este procedimiento empezó con la mezcla de 1.5 gramo del grafito tamizado en 37,5 ml de ácido fórmico (HCOOH) a 98% de pureza y esta misma cantidad de ácido fosfórico (H_3PO_4) a 85% de pureza, esta mezcla fue homogenizada utilizando un agitador magnético y posterior a esto se sonicó en un baño de ultrasonido durante

dos horas en un equipo Bransonic, modelo 3510. Después de obtener cristales de menor tamaño de grafito estos fueron filtrados al vacío empleando un embudo Buchner y se lavaron con suficiente agua destilada hasta tener obtener un pH neutro en el agua de lavado. Finalmente, el grafito exfoliado y lavado se transfirió a una caja Petri y se secó en un horno a 100 °C durante 5 horas.

- **Oxidación en fase líquida del grafito exfoliado**

Después de obtener cristales más pequeños de grafito mediante su exfoliación y recordando que el grafito está constituido por la unión débil de láminas de grafeno, se concluye que estos pequeños cristales son paquetes de capas de grafeno que aún están juntas, por lo que la incorporación de agentes oxidantes a estos cristales van a ayudar a la separación de las capas que constituyen el material, obteniéndose como resultado paquetes más pequeños de láminas con la característica de que estas a su vez van a incluir diferentes grupos oxigenados principalmente en sus bordes para el caso de las que están ubicadas en la parte intermedia. Este procedimiento consistió en adicionar en un vaso de precipitado de 100 ml 1 gramo de grafito previamente exfoliado junto con 120 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y 14 ml de ácido fosfórico (H_3PO_4), esta mezcla fue agitada a 1000 rpm en un agitador magnético manteniendo la temperatura alrededor de los 50 °C durante 15 minutos; después de haber homogenizado la mezcla anterior se le adicionó lentamente para que la temperatura de reacción no sobrepasara los 55 °C 6 gramos de permanganato de potasio ($KMnO_4$) aproximadamente a una tasa de 0,1 gramos por minuto; por último este sistema se mantuvo a las mismas condiciones de calentamiento y agitación por un periodo de 12 horas, pasado este tiempo la mezcla se dejó reposar hasta alcanzar la temperatura ambiente obteniéndose como resultado una mezcla viscosa de coloración marrón oscuro como se puede apreciar en la **Figura 17**.

Purificación del Óxido de Grafito y Conversión en Óxido de Grafeno. Una vez obtenido el grafito oxidado fue necesario reducir el agente oxidante que se utilizó

(KMnO_4) el cual quedó de manera residual, para esto se pasó la mezcla a un beaker de 500 ml; se colocó de nuevo en agitación a 500 rpm y posteriormente agregando 10 ml gota a gota de peróxido de hidrógeno al 30%, se consiguió reducir por completo el agente oxidante que hubiera estado aún presente en la mezcla.

Figura 17. Grafito oxidado a 12 horas.



Como indicativo de la total reducción se observó que la coloración marrón oscura que tenía la mezcla inicialmente pasó a ser un verde pálido muy claro como lo muestra la **Figura 18** posteriormente se adicionaron 300 ml de agua fría ($\sim 5\text{ }^\circ\text{C}$) cambiando la coloración de verde a una anaranjada (**Figura 19**); por último, la suspensión acuosa con el óxido de grafito se dejó en reposo durante un día para su decantación, luego se removió la mayor cantidad de líquido sobrenadante evitando extraer la parte sólida.

La mezcla con el producto se transfirió equitativamente a 6 tubos de centrífuga adicionando agua a cada tubo hasta completar 45 ml, se realizaron en promedio 10 centrifugaciones sucesivas por periodos de 30 minutos cada una a 6000 rpm y a una temperatura de $5\text{ }^\circ\text{C}$, donde las primeras 7 centrifugadas el sólido se lavó con agua destilada y las últimas 3 con agua desionizada; para este proceso se utilizó una centrífuga HERMLE Z326K. Una vez terminado el proceso de centrifugación se transfirió el producto contenido en los tubos a un beaker de 250 ml que se llevó a un equipo de ultrasonido (Sonic Vibra-Cell. Modelo VCX 750) en el cual la dispersión

Figura 18. Efecto del peróxido de hidrógeno en el óxido de grafito.



Figura 19. Efecto del agua fría en el óxido de grafito.



Figura 20. Óxido de grafeno.



acuosa de óxido de grafito fue sonicada 12 veces en intervalos de 10 minutos sonicando y 10 minutos enfriando; de esta manera se provocó la conversión de óxido de grafito en óxido de grafeno volviendo a tener una tonalidad bastante oscura (**Figura 20**).

- **Determinación de la cantidad de óxido de grafeno obtenido**

Una vez se obtuvo el óxido de grafeno en una dispersión acuosa se procedió a determinar su concentración, para esto se sacó una muestra de 15 ml del producto y se transfirió a un crisol y posteriormente pesando este con la muestra dentro se selló la entrada con una membrana sencilla de papel para la posterior liofilización donde se evaporó por completó la fase líquida obteniéndose solo la parte sólida del óxido de grafeno, una vez evaporado el líquido se volvió a pesar el crisol con el material sólido y de esta manera y por medio de cálculos sencillos se logró determinar la concentración de la totalidad del óxido de grafeno que se había obtenido siendo esta de 11.000 partes por millón (ppm) constituidas en 10.5 gramos de sólido dispersado.

Este dato de concentración a su vez fue el punto de partida para realizar los diferentes cálculos que permitieron la realización de las pruebas futuras donde se formularían diferentes lodos de perforación con múltiples concentraciones de estos nanomateriales.

Procedimiento para la síntesis del óxido de grafeno siguiendo la metodología del trabajo de grado para optar al título de Químico de IVÁN DARÍO GÓMEZ ROBAYO, el cual lleva por nombre SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE GRAFENO QUÍMICAMENTE REDUCIDO (CRG), EMPLEANDO TÉCNICAS ESPECTROSCÓPICAS Y MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO, realizado en la Universidad Industrial de Santander, en el año 2012.⁵²

⁵² Gómez I. Síntesis y caracterización de grafeno químicamente reducido (crg), empleando técnicas espectroscópicas y microscopía electrónica de barrido, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 2012.

5.2 CARACTERIZACIÓN DEL ÓXIDO DE GRAFENO

- **Caracterización**

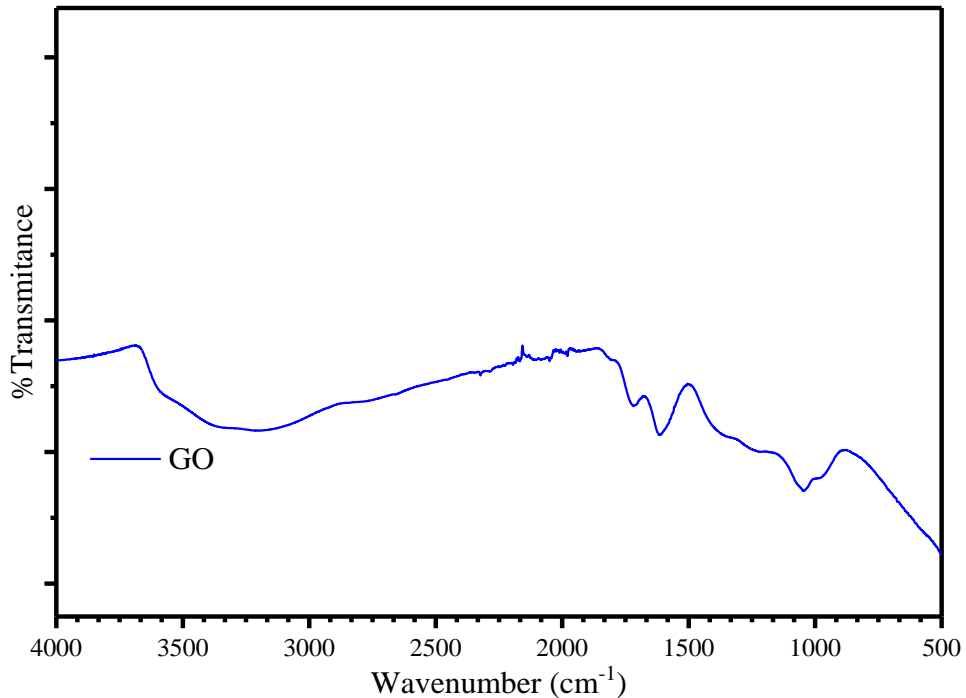
Los espectros FTIR se obtuvieron mediante un espectrómetro FTIR Nicolet empalmar (Thermo Fischer Scientific) equipado con una reflexión total atenuada (ATR) con cristal de diamante y un detector de DTGS. Los espectros FTIR-ATR se registraron de 4000 a 500 cm^{-1} , a una resolución de 4 cm^{-1} y 32. Se utilizaron todas las muestras pulverizadas sin preparación previa. Los espectros Raman de las muestras se registraron con un microscopio Raman-espectrómetro LabRAM HR Evolution (HORIBA, Ltd), equipado con tres objetivos de microscopio (10x, 50X y 100x) y con tres fuentes láser (473, 532 y 675 nm). En este trabajo, utilizamos el láser de 532 nanómetros como fuente de la excitación. La difracción de la radiografía de las muestras fue obtenida usando un difractómetro de la radiografía del polvo (Bruker, D8) con la geometría de DaVinci, exploración del paso de 0,02 ° sobre una gama del θ a partir del 5 a 30°. Para el microscopio electrónico de la exploración del puf grafeno-basado fue empleado una microscopía electrónica de la exploración de la emisión del campo (Quanta, FEG 650). Además, con este instrumento se obtuvieron espectros dispersivos de energía (eds) de la muestra. Por último, para determinar los Estados químicos de los elementos en marcha, la espectroscopia de fotoelectrones de rayos x se llevó a cabo en un espectrómetro de rayos x de fotoelectrones, specs, XPS/ISS/UPS.

- **Caracterización de la espectroscopia**

La **Figura 21** muestra los espectros FTIR de O.G, en OGR el pico más amplio a 3300 cm^{-1} correspondiendo a un modo vibratorio de estiramiento del grupo funcional del oxhidrilo, O-H. Estas estructuras aromáticas se asocian principalmente al sistema O.G. En la región espectral entre 2980 y 2855 cm^{-1} aparecen simétricos y asimétricos que estiran el modo vibratorio del enlace alifático de C-H. La banda fuerte alrededor de 1670 cm^{-1} se puede asignar a C = O estirar el modo vibracional. En consecuencia, a frecuencias bajas se observan bandas a 1530, 1230, 1010 y

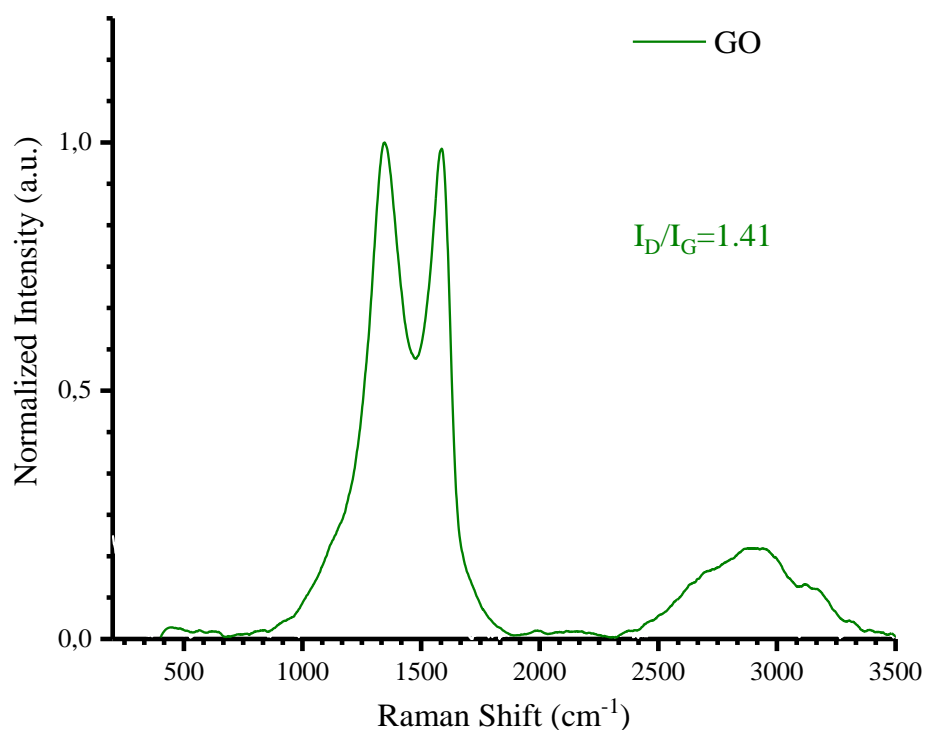
815 cm^{-1} , correspondiente al modo vibratorio de flexión de los enlaces C = C, C-C, C-O y C = O, respectivamente.

Figura 21. Espectros FTIR de O.G.



La **Figura 22** muestra espectros Raman de O.G, como se puede observar, pico Raman típico a 1340 y 1575 cm^{-1} aparecen en muestras de O.G. Estos picos generalmente se denominan bandas D y G, respectivamente. La banda D se asigna al modo vibratorio del Sp^3 -carbonos en estructuras carbonosas. Además, la banda D está relacionada con defectos y desorden en las hojas de óxido de grafeno o grafeno. Mientras que, la venda de G corresponde al modo vibratorio del Sp^2 carbono y se asocia con el orden en grafeno u hoja de óxido de grafeno. Cuando el grafito se oxida o se transforma, la disminución de la venda de G y el aumento de la venda de D debido a la conversión el Sp^2 -Carbonos a Sp^3 carbonos. Se observa que la relación de intensidad (I_D/I_G) el valor disminuye para la conversión de ir a RGO.

Figura 22. Espectro Raman.



En la **Figura 23** se presenta el patrón DRX de grafito y, el grafito exhibe una alta cristalinidad corroborado por un pico fuerte y sostenido a 26,5 ° correspondiente al espaciado típico intercalar (002) de 0,36 nm.

La espectroscopia del fotoelectrón de la radiografía proporcionó la evidencia de los lazos químicos de elementos en IR. La **Figura 24** muestra espectros de fotoelectrón de rayos X de baja resolución (XPS) de O.G. Dos picos se observan a la energía de enlace de alrededor de 285 eV, 532 eV correspondiente a C1s, O1s de O.G. El XPS de alta resolución de O.G para los picos de C1s se muestra en la **Figura 24** presenta cinco picos desenrollados de Gauss asociados a los enlaces de carbono C-C/C = C, C-C, C-C = O y π - π^* de transición a 284,8, 286,3, 287,8, 289,3 y 291,0 eV, respectivamente.

Figura 23. Patrones de DRX de grafito, O.G, grafito.

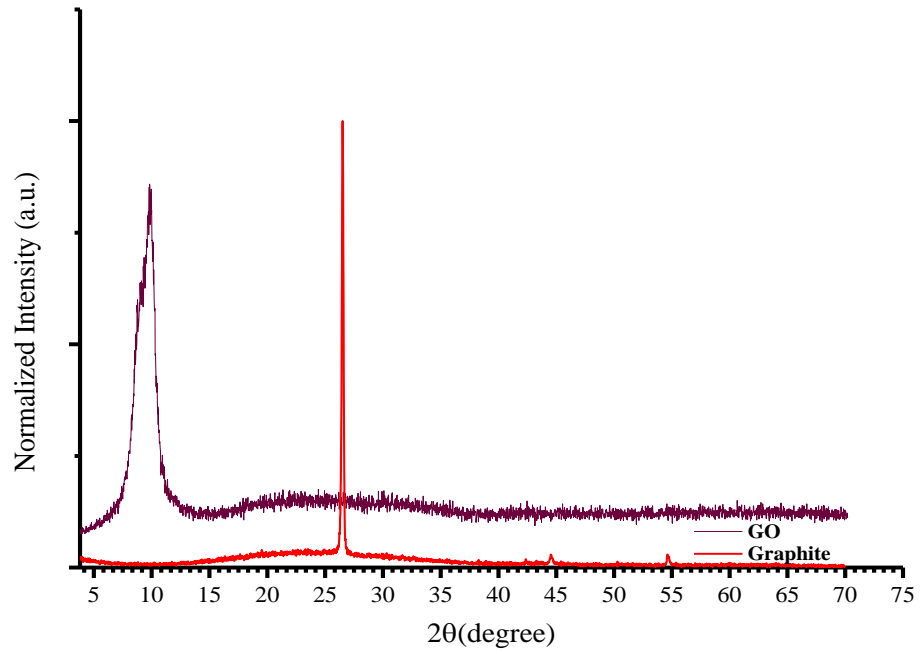
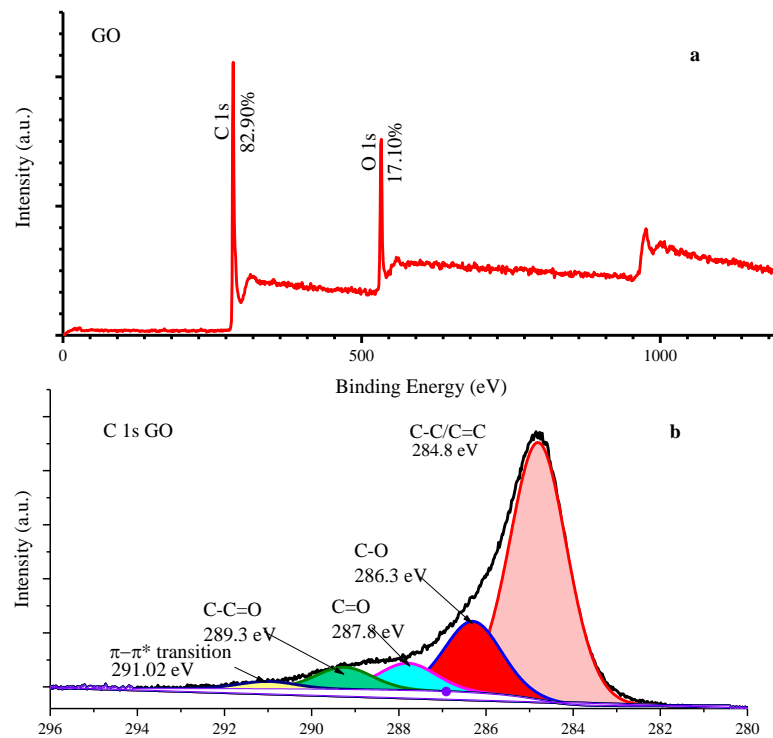


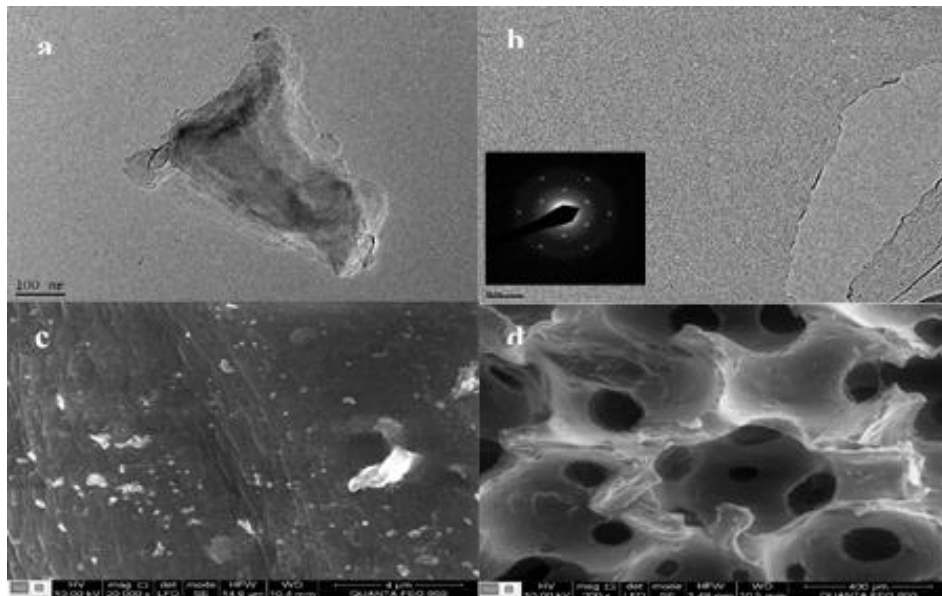
Figura 24. La exploración ancha de XPS de RGO y de G-PUF; c y d) XPS de alta resolución de C1S y N1s de RGO y G-PUF, respectivamente.



- **Caracterización morfológica**

La **Figura 25** muestra la micrografía TEM de algunas capas de nanoláminas ultrafinas de ir arrugadas y solapadas con un tamaño aproximado de 400 nm. En la **Figura 25. a** se muestra probablemente dos capas de O.G que han recuperado su estructura gráfica. Esto se corrobora para la imagen en la inserción de la **Figura 25. b**, correspondiente al patrón de difracción de electrones del área seleccionada (Saed). La estructura cristalina de O.G es verificada por la simetría hexagonal de los puntos de difracción observados en la inserción de la **Figura 25. c**. Finalmente la **Figura 25. d** muestra la estructura típica de la espuma de la alta porosidad con los macro-poros de algunos centenares de micrones en diámetro.

Figura 25. a, b, c y d. Micrografías TEM de O.G.



Caracterización del óxido de grafeno a cargo del codirector de la presente investigación Ph. D. Enrique Mejía Ospino realizada en las instalaciones del parque tecnológico Guatiguará.

Para el caso del óxido de silicio se utilizó un producto comercial amorfo con 99.5% de pureza, hidrofílico y con un tamaño aproximadamente de 15 nanómetros el cual contiene una relación de área superficial de 650 m² por cada gramo de producto.

5.3 Pruebas de Compatibilidad. En esta parte de la investigación se realizaron 18 muestras de 100 ml; 6 con óxido de silicio, 6 con óxido de grafeno y 6 con el nanocomposito, siguiendo las mezclas y formatos para llevar las observaciones los cuales fueron definidos con anterioridad en la construcción del diseño experimental. En el **Anexo A** se pueden observar los resultados de estas pruebas de compatibilidad.

Después de realizadas estas observaciones en cada una de las muestras, se llega a la conclusión de que cada uno de los nanomateriales estudiados son compatibles con los aditivos de construcción del lodo, donde se pudo observar que, en las mezclas realizadas para el óxido de silicio, no hubo cambios significativos con paso del tiempo, la tendencia fue a conservar sus características.

La presencia de precipitados fue una de las características más fácil de evidenciar, quedando de tonalidad cristalina durante la mayor parte del tiempo, con diferencia de la tonalidad blanco tenue, instantes después de mezclado. En cuanto a las mezclas realizadas que contiene el óxido de grafeno, no se observó incompatibilidad pues no hubo cambios significativos a simple vista, donde una de las características de más fácil observación fue la tonalidad de las muestras, que con el pasar de los días tuvieron tendencia a volverse más oscuras de su tonalidad al inicio de la prueba; esto como respuesta a la aglomeración de las partículas, que al juntarse unas con otras tienen la tendencia de pasar de un café brillante a uno más opaco.

Con respecto a las demás características a observar, como la presencia de espumas, por ejemplo, la única ocasión que presento espuma fue al momento de mezclar y después se mantuvo constante el no presentar burbujas de ahí en adelante. En cuanto a precipitados en el O.S fue algo evidente, mientras que en el Nanocomposito no fue de fácil observación por su tonalidad oscura. Otro parámetro que medir fue el pH, que en algunas ocasiones vario poco, subiendo o bajando y quedando constante hasta acabar esta prueba.

5.4 PRUEBAS PRELIMINARES

Estas pruebas fueron realizadas en el laboratorio de lodos y cementos de la escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander, contando con varias cesiones de 3 horas para tal fin.

5.4.1 Óxido de Grafeno (O.G). Los resultados de las pruebas realizadas con óxido de grafeno se encuentran a continuación en las **Tablas 17 y 18.**

Tabla 17. Datos de reología obtenidos en laboratorio para O.G.

Bentonita [Lb/bbl]	Concentración O.G		ϕ 300	ϕ 600	Gel 10 Segundos	Gel 10 Minutos
	[ppm]	[Lb/bbl]				
25	0	0	25	39	1,5	7,5
25	100	0,035	13,2	22	2,5	11
25	200	0,07	17	26	---	---
25	571,43	0,2	13	21	3	---
25	1142,86	0,4	14	23	2,5	10,8
25	3714,3	1,3	37	54	---	37

Tabla 18. Datos de pruebas de laboratorio procesados para O.G.

Bentonita [Lb/bbl]	Concentración O.G		VP [cP]	VA [cP]	YP [lb/100 ft ²]
	[ppm]	[Lb/bbl]			
25	0	0	8,8	11	4,5
25	100	0,035	8	10,5	5
25	200	0,07	9	11,5	5
25	571,43	0,2	9,5	12,75	6,5
25	1142,86	0,4	12,2	16,7	9,1
25	3714,3	1,3	17	27	20

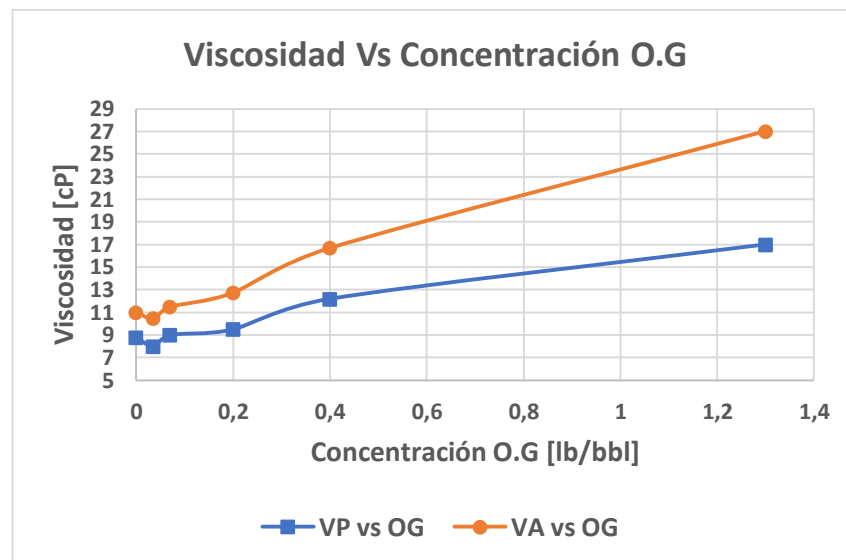
- **Análisis de Datos**

Después de realizados los experimentos y cálculos, se grafican para más fácil interpretación de los datos de estudio.

En la **Figura 26** se ve un incremento significativo en la viscosidad del fluido en comparación al fluido base (concentración de O.G es cero lb/bbl), donde el aumento

en la viscosidad plástica se debe a las partículas de tamaño nanométrico, así la relación de área de contacto vs volumen de material sólido aumenta significativamente las interacciones entre los diferentes componentes sólidos del lodo y a su vez aumentando la tensión de corte con el aumento de la concentración de las nanopartículas a las velocidades determinadas de 300 y 600 rpm. También se descarta la presencia de otro material sólido aparte de la bentonita que cause este aumento, lo que es reflejado en un incremento de viscosidad.

Figura 26. Viscosidad en función de la concentración de O.G.



Todo lo anterior es positivo ya que la viscosidad es la encargada del arrastre de sólidos y de la limpieza del agujero, y por el tamaño del material nanométrico no es muy significativo el porcentaje de material adicional; que es bueno puesto que esta viscosidad es un parámetro de la cantidad de sólidos retenidos en el fluido y así saber si el lodo está arrastrando la cantidad de recortes para el cual se diseñó (capacidad de carga de sólidos del lodo) o si está perdiendo eficiencia en el proceso de limpieza del pozo. En últimas se ve un aumento con una cantidad pequeña de sólidos agregados, la cual no restará a la capacidad de carga de sólidos del lodo. En la **Tabla 19** se puede apreciar la diferencia en la viscosidad plástica entre el lodo

base y los lodos que contenían las diferentes concentraciones de nanopartículas, como tal se aprecia que existe un aumento progresivo en la viscosidad a medida que se incrementa dicha concentración, si se observan los puntos donde existen mayores porcentajes de aumento son en las concentraciones de 1142 ppm y de 3714 ppm siendo estos de 39% y 93% respectivamente.

Tabla 19. Porcentaje de la variación de VP y YP para el O.G.

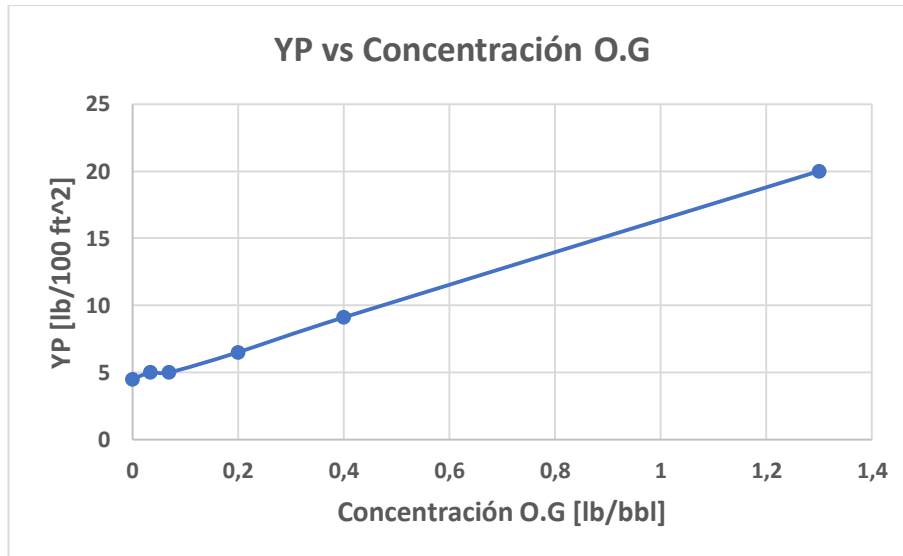
Porcentaje de variación de VP y YP con respecto a lodo base para O.G				
Concentración [ppm] O.G	PV [cP]	YP [lb/100 ft ²]	% de aumento	
			PV	YP
0	8,8	4,5	0,0%	0,0%
100	8	5	-9,1%	11,1%
200	9	5	2,3%	11,1%
571	9,5	6,5	8,0%	44,4%
1142	12,2	9	38,6%	100,0%
3714	17	20	93,2%	344,4%

Se presumiría que el segundo es un buen punto para la continuación de la investigación pero se debe tener en cuenta que este buen resultado se debe a la excesiva cantidad de sólidos y no a la eficiencia del material junto con el hecho de que el O.G es bastante complejo de sintetizar y así no se hace viable la aplicación de esta cantidad, por lo que se opta por tener en cuenta para posteriores pruebas el primer punto, pues la concentración no es demasiada y relativamente arroja resultados positivos. Finalmente se hacen los mismos análisis y conclusiones para las variaciones del punto cedente.

En la **Figura 27** también se puede observar un incremento en yield point o punto cedente, lo que quiere decir que hay una interacción de cargas entre partículas nanométrica con los aditivos del lodo y por ende un aumento en las fuerzas electrostáticas que favorecen este parámetro, esto beneficia en las operaciones ya que el yield point también ayuda a la suspensión de recortes en el lodo durante la circulación, para su posterior descarga en superficie. Además, ayudará a aumentar

la suspensión de material densificante, para control de presiones en fondo con la columna hidrostática. El fluido tiende a hacerse más eficiente con la interacción de una poca cantidad de nanomaterial, ya que genera un alto porcentaje en el aumento de la propiedad bajo estudio.

Figura 27. Yield Point en función de la concentración de O.G.



5.4.2 Óxido de Silicio (O.S). Los resultados de las pruebas realizadas con óxido de silicio se encuentran a continuación en las **Tablas 20 y 21**.

Tabla 20. Datos obtenidos en laboratorio para O.S.

Bentonita [Lb/bbl]	Concentración O.S		ϕ 300	ϕ 600	Gel 10 Segundos	Gel 10 Minutos
	[ppm]	[Lb/bbl]				
25	0	0	17	28	2	18
25	50	0,0175	11	20	2	13
25	100	0,035	15	26	2	13
25	150	0,0525	13	23	2	9
25	500	0,175	14	23	1,5	14
25	1000	0,35	14	24	2	11
25	2500	0,875	13	22	---	---
25	5000	1,75	13	23	1	5

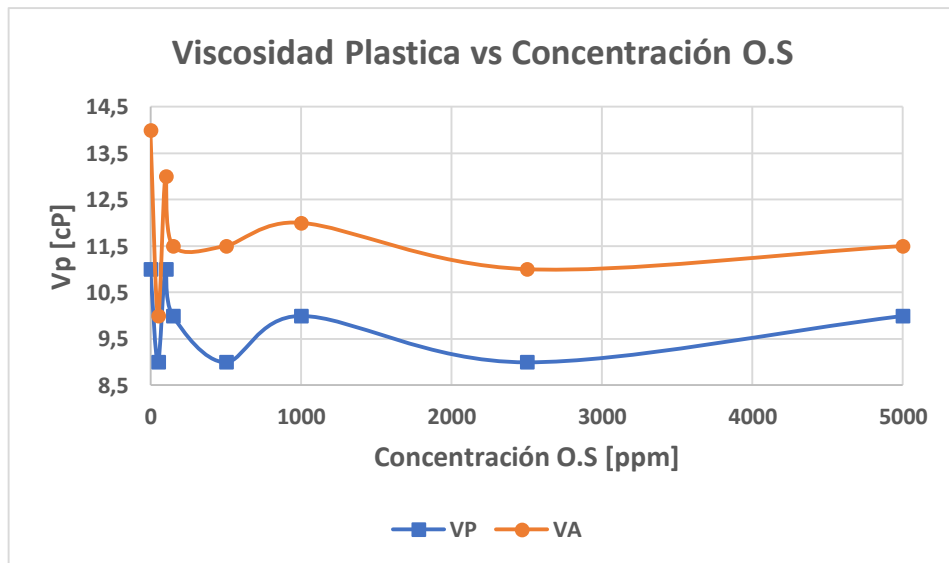
Tabla 21. Datos obtenidos para O.S con resultados de laboratorio.

Bentonita [Lb/bbl]	Concentración O.S		VP [cP]	VA [cP]	YP [lb/100 ft ²]
	[ppm]	[Lb/bbl]			
25	0	0	11	14	6
25	50	0,0175	9	10	2
25	100	0,035	11	13	4
25	150	0,0525	10	11,5	3
25	500	0,175	9	11,5	5
25	1000	0,35	10	12	4
25	2500	0,875	9	11	4
25	5000	1,75	10	11,5	3

- **Análisis de Datos**

Después de realizados los experimentos y cálculos, se grafican para más fácil interpretación de los datos de estudio.

Figura 28. Viscosidad en función de la concentración de O.S.

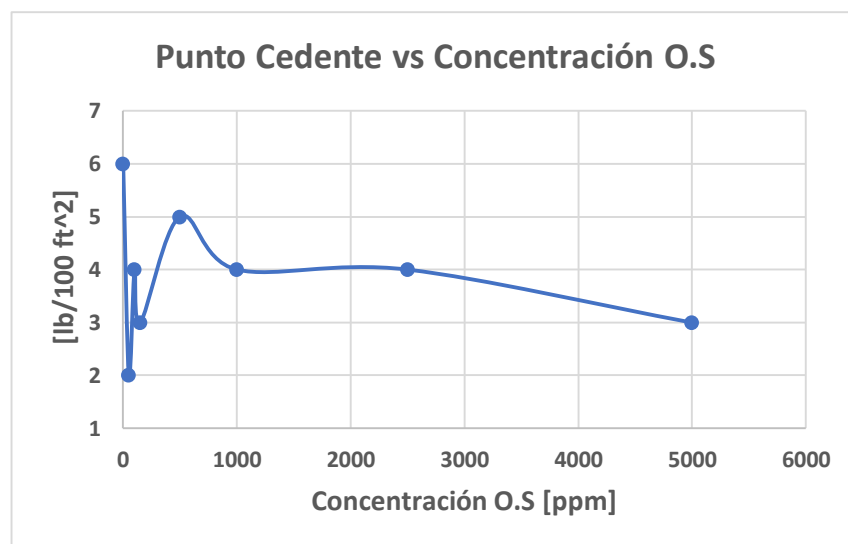


En las pruebas realizadas con el O.S se aprecia un efecto no tan positivo al aumento de las propiedades reológicas, dado por una reducción del esfuerzo de corte si se compara con el lodo cuando este no contiene la presencia de las nanopartículas

evaluadas. Un ejemplo de ello son los datos observados en la viscosidad, que se pueden apreciar en la **Figura 28** donde la tendencia es a bajarla en comparación a las propiedades del fluido base (concentración cero lb/bbl). Parece evidente que las nanopartículas de O.S reducen las interacciones electrostáticas naturales entre las capas de la bentonita. Estas observaciones están de acuerdo con otros estudios en los que se resalta el hecho de que el O.S tiende a disminuir las propiedades reológicas y su mayor uso se da en la parte de filtrado del lodo de perforación.

Otra de las propiedades estudiadas fue el punto cedente, el cual se muestra en la **Figura 29**, que al igual que la viscosidad, se observa una tendencia a la disminución. Donde probablemente las nanopartículas de O.S producen una separación entre las cargas de la superficie de la bentonita llevando a una disminución en la magnitud de la interacción entre capas ocasionando una disminución en el punto cedente, el cual alcanza un valor máximo, con el reforzamiento, de 5 lb/100ft² en comparación con las 6 lb/100 ft² alcanzada por el lodo de referencia.

Figura 29. Punto Cedente en función de la concentración de O.S.



En la **Tabla 22** se observa de mejor manera el porcentaje de variación que se obtuvo en la VP y en el YP, en todas las concentraciones de óxido de silicio se aprecia una reducción de los dos parámetros estudiados, PV y YP.

Tabla 22. Porcentaje de la variación de VP y YP para el O.S.

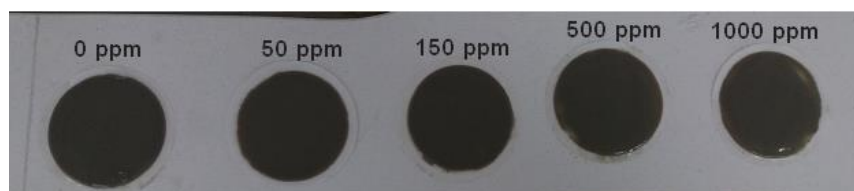
Porcentaje de variación de VP y YP con respecto a lodo base para O.S				
Concentración [ppm] O.S	PV [cP]	YP [lb/100 ft ²]	% de reducción	
			PV	YP
0	11	6	0,0%	0,0%
50	9	2	18,2%	66,7%
100	11	4	0,0%	33,3%
150	10	3	9,1%	50,0%
500	9	5	18,2%	16,7%
1000	10	4	9,1%	33,3%
2500	9	4	18,2%	33,3%
5000	10	3	9,1%	50,0%

También se realizaron pruebas de filtrado. Los resultados obtenidos de las pruebas de filtrado API se presentan a continuación en la **Tabla 23**, así como su respectivo análisis para una comprensión de lo arrojado en laboratorio.

Tabla 23. Concentración O.S y datos de prueba de filtrado.

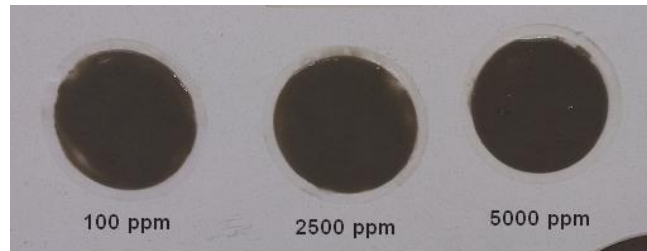
Concentración		Volumen de Filtrado (ml)	Análisis de la Torta		
Lb/Bbl	Ppm		Consistencia	Rigidez	Espesor [1/32 in]
0	0	29	Buena	Buena	1/32"
0,0175	50	24,5	Buena	Buena	< 1/32"
0,035	100	25	Buena	Buena	< 1/32"
0,0525	150	14	Buena	Buena	< 1/32"
0,175	500	38	Buena	Buena	1/32"
0,35	1000	35	Buena	Buena	1/32"
0,875	2500	29	Buena	Buena	1/32"
1,75	5000	23	Buena	Buena	< 1/32"

Figura 30. Tortas del filtrado con O.S a diversas concentraciones.



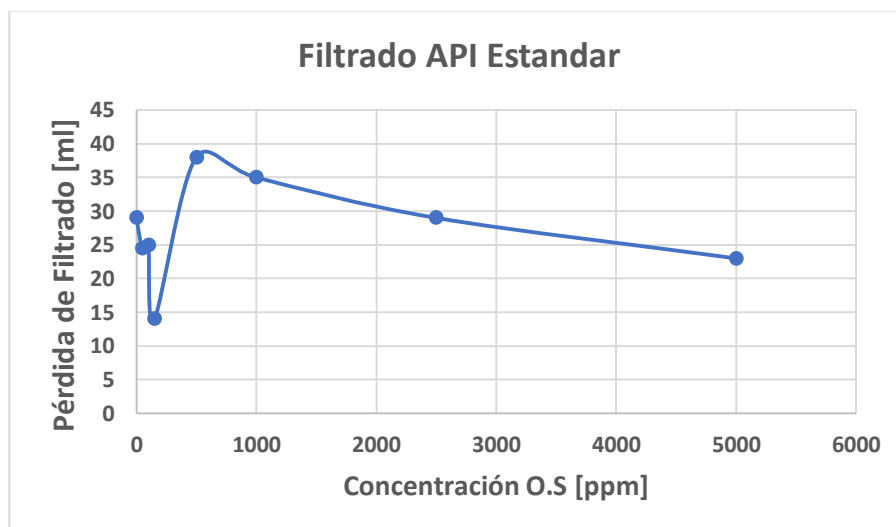
La **Figura 30 y 31** muestran las tortas obtenidas de las pruebas de filtrado a las diferentes concentraciones junto con la del lodo base utilizado para la referencia.

Figura 31. Tortas del filtrado con O.S a diversas concentraciones.



En lo que respecta a las propiedades de la torta o revoque, se obtuvieron buenos resultados, mejorando significativamente las condiciones finales de éste en varios casos, en comparación con el lodo de referencia. Es importante destacar que la adición de nano-partículas de O.S podría ser utilizada para evitar la pérdida excesiva del fluido y mejorar las condiciones de las paredes mientras la tubería de revestimiento es instalada. La **Figura 32** muestra el comportamiento de esta pérdida según la variación de la concentración O.S.

Figura 32. Pérdida de filtrado en función de la concentración de O.S.



Lo que se observa a primera vista es que a bajas concentraciones el óxido de silicio tiene un buen desempeño en las propiedades taponantes y de sellado, esto no es de extrañarse pues concuerda con la teoría consultada en la cual los resultados positivos de este material a la hora de formar el sello para evitar la pérdida de filtrado se presentaron en bajas concentraciones.

Posteriormente con el aumento de la concentración de la nanopartículas se ve una disminución en este desempeño el cual se debe probablemente a la aglomeración de estas partículas, pues estas se relacionan y unen, formando un cuerpo más grande al cual se le será más difícil taponar los poros de menor tamaño presentes, sin embargo después de que se sigue aumentando la concentración se presenta una tendencia a bajar el filtrado nuevamente, esto ya no es eficiente dado que esta disminución aparece ya por simple saturación de sólidos en el medio permeable y no por eficiencia de las nanopartículas como lo fue en el caso en que se usaron 150 ppm, el cual comparado con el lodo base arrojó una reducción de la pérdida de filtrado del 51,8%. En la **Tabla 24** se aprecia de mejor manera el porcentaje de reducción y la diferencia de filtrado que se obtuvo con el O.S.

Tabla 24. Porcentaje de reducción de pérdidas de filtrado con O.S.

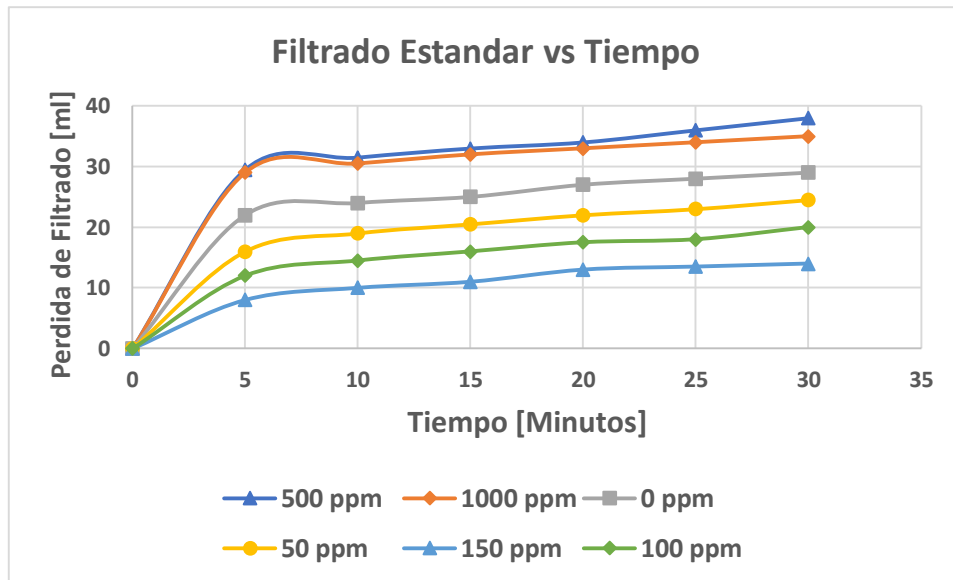
Reducción en ml y % de la pérdida de filtrado para el O.S				
Concentración [ppm]	ml	Diferencia ml	Diferencia	%
0	29	0	0,0	
50	24,5	4,5	15,5	
100	25	4	13,8	
150	14	15	51,7	
500	38	-9	-31,0	
1000	35	-6	-20,7	
2500	29	0	0,0	
5000	23	6	20,7	

Además, se realizó un seguimiento a la cantidad de filtrado que se iba acumulando con el paso del tiempo (**Tabla 25**) hasta completar los 30 minutos que tarda en realizarse la prueba. Esto con el fin de graficar estos datos y poder visualizar de una manera más fácil (**Figura 33**) la reducción en la pérdida de filtrado.

Tabla 25. Seguimiento a diferentes tiempos de prueba filtrado API para O.S.

Concentración Minutos	500 ppm	1000 ppm	0 ppm	50 ppm	100 ppm	150 ppm
0	0	0	0	0	0	0
5	29,5	29	22	16	12	8
10	31,5	30,5	24	19	14,5	10
15	33	32	25	20,5	16	11
20	34	33	27	22	17,5	13
25	36	34	28	23	18	13,5
30	38	35	29	24,5	20	14

Figura 33. Control prueba de filtrado durante sus 30 Minutos.



Después de analizar los datos visualizados en la **Figura 33**, se puede llegar a concluir que el uso de O.S a bajas concentraciones tiene un efecto bastante bueno en cuanto a la reducción de pérdida de filtrado en comparación al lodo base (cero lb/bbl de concentración), de la misma manera ya que las concentraciones altas tienen un efecto contrario, naturalmente no se recomendaría su implementación tanto por los resultados como por el aumento de costos en el material.

5.5 PRUEBAS CON NANOCOMPOSITO

Después de tener definidas las pruebas a realizar, las cuales se formularon en el diseño experimental, se llevan a cabo en los laboratorios de lodos y cementos del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) en la ciudad de Bucaramanga. Los resultados obtenidos en las pruebas relacionadas con las propiedades reológicas son registrados para su posterior análisis (**Tabla 26**). Las pruebas de reología fueron realizadas a una temperatura de 120 °F.

La formulación de lodo dada en el diseño experimental se mantendrá fija, la cual será 25 lb/bbl de bentonita, 0,5 lb/bbl de Pac-L y agregar soda cáustica hasta llegar a un pH de 9.

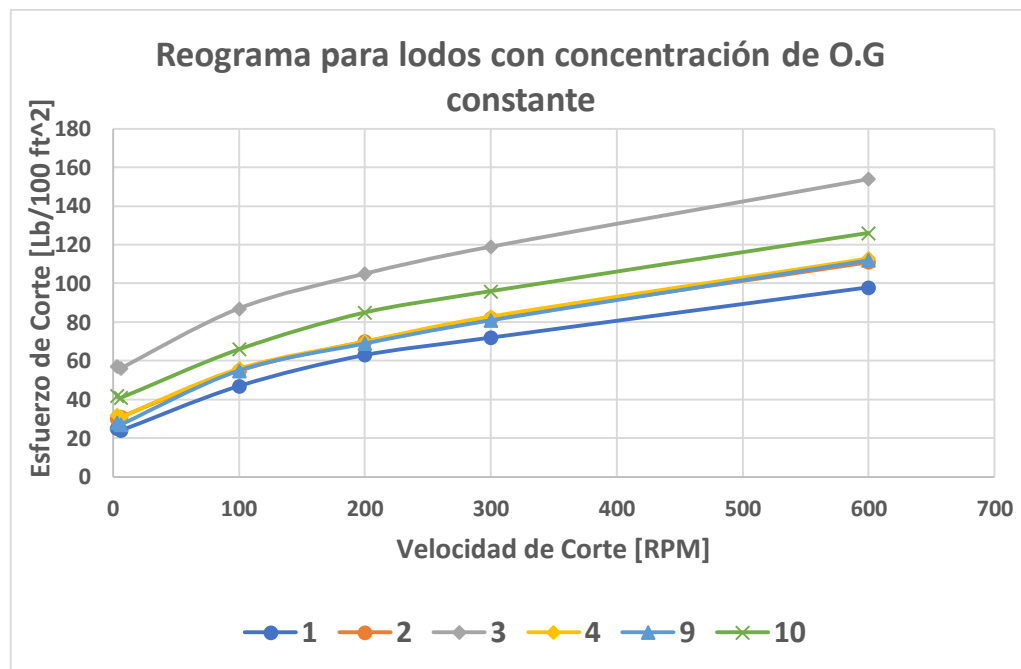
Tabla 26. Resultados Reología Pruebas con Nanocomposito.

ID Prueba	Bentonita [Lb/bbl]	Concentración [Lb/Bbl]		Lectura del viscosímetro [Lb/100 ft ²]						Esfuerzo de gel		Yp [Lb/100 ft ²]	VP [cP]	VA [cP]
		O.G	O.S	Ø 600	Ø 300	Ø 200	Ø 100	Ø 6	Ø 3	10 Seg	10 min			
1	25	0,35	0,0525	98	72	63	47	24	25	17	42	46	26	49
2	25	0,35	0,175	111	82	70	55	31	30	20	41	53	29	55,5
3	25	0,35	0,35	154	119	105	87	56	57	41	58	84	35	77
4	25	0,35	0,035	113	83	70	56	31	32	20	46	53	30	56,5
9	25	0,35	0,525	112	81	69	55	27	28	19	44	50	31	56
10	25	0	0	126	96	85	66	41	42	25	52	66	30	63
5	25	0,525	0,0525	101	74	62	48	24	23	18	42	47	27	50,5
6	25	0,7	0,0525	98	71	60	46	20	22	14	40	44	27	49
7	25	0,175	0,0525	134	102	87	71	42	43	29	53	70	32	67
8	25	1,05	0,0525	116	87	74	58	32	33	20	52	58	29	58

5.5.1 Análisis del efecto del nanocomposito en la reología. La **Figura 34** indica la variación de los esfuerzos de corte en el lodo con el material Nanocompuesto cuando este está de manera que la concentración de O.G sea constante mientras que la de O.S varía, en el, se puede observar que tan solo uno de los lodos (el lodo

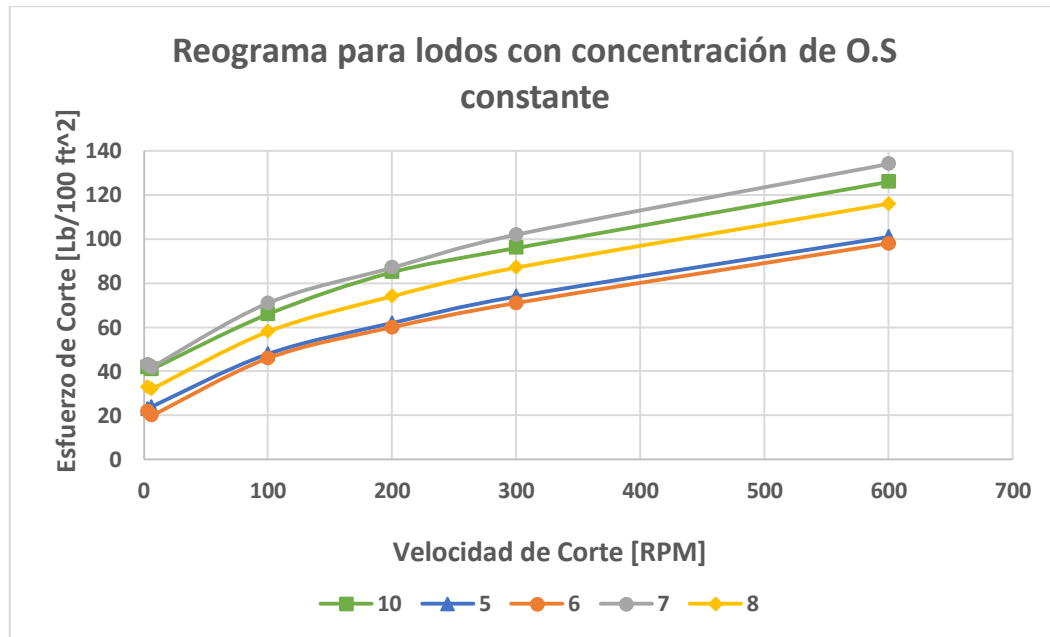
3 en gris) con la mezcla nanométrica el cual tiene una concentración de 1000 ppm en ambos componentes o lo que es equivalente a 0,35 lb/gal, presenta un aumento en los esfuerzos de corte a las determinadas velocidades mostradas en la figura 38, en comparación a los esfuerzos de corte que muestra el lodo base que se puede apreciar por la línea verde, los otros cuatro lodos que contenían las demás combinaciones presentan una reducción en los esfuerzos de corte que comprenden las interacciones entre las partes sólidas de los lodos en cuestión.

Figura 34. Variación del esfuerzo de corte con O.G constante.



Para el caso de las pruebas en que se conserva el óxido de silicio constante no se presenta una gran diferencia al caso anterior (O.G constante), en la **Figura 35** donde se aprecia también la curva verde que representa el comportamiento del esfuerzo de corte del lodo base, solo el lodo número 7 de color gris que contiene un juego de concentración de 500 ppm de O.G con 150 ppm de O.S o lo que en su equivalencia son 0,175 lb/gal y 0,0525 lb/gal de los dos óxidos respectivamente, presentó una respuesta mayor en los esfuerzos de corte que el lodo base, mientras que los demás lodos siguen teniendo un comportamiento con resultados inferiores.

Figura 35. Variación del esfuerzo de corte con O.S constante.



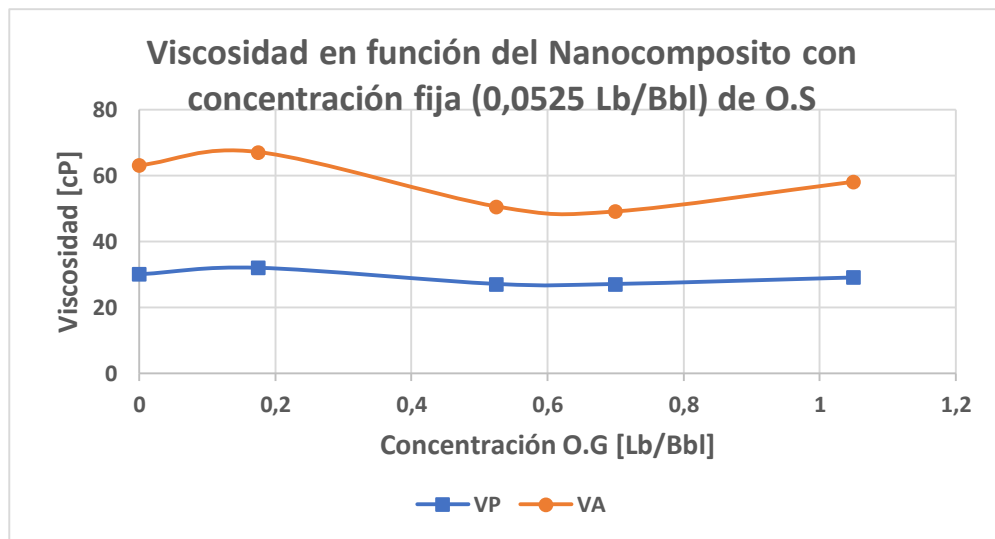
5.5.2 Resultados de las pruebas de viscosidad. Como se mencionó en el capítulo 3 el propósito de formar un material compuesto es el de aprovechar las propiedades que cada componente expone por separado y encontrar la posibilidad de que el nuevo material pudiera exponer nuevas y mejores propiedades que antes eran desconocidas, ahora se presentará el análisis de resultados donde se determinará si el nanocomposito bajo investigación conservó o no las propiedades iniciales que los hacían buenos candidatos para el trabajo o si en caso contrario estas propiedades cambiaron, si es así entonces proceder a estudiar hacia donde fueron los cambios y en lo posible determinar las causas que los generaron.

- **Viscosidad cuando la concentración de O.S es constante**

Apreciándose la **Figura 36** a diferencia de las pruebas preliminares en donde la adición de óxido de grafeno permitía un aumento de la viscosidad y esta, a su vez se incrementaba con el aumento en la concentración de la nanopartícula, en este caso esa propiedad viscosificante que trabajó muy bien cuando este se probó solo con el lodo, de una u otra manera se ve inhibida al mezclarse con el óxido de silicio

a pesar de que de las cuatro pruebas en donde se varió el O.G solo una tuvo una respuesta positiva. Adicionalmente se recuerda que cuando el O.S se trabajó solo, este tuvo la tendencia a bajar la reología por lo que en resumen se puede concluir que el O.G pierde su propiedad viscosificante cuando entra a interactuar con el O.S. Adicionalmente si se observa la gráfica anterior de viscosidad se puede apreciar que tanto el punto que está por encima como los que están por debajo del lodo base, no difieren más que solo muy poco, lo que permite entender que independientemente de la combinación entre los dos materiales no solo el O.G pierde su capacidad de aumentar la viscosidad sino que también este a su vez no le permite al O.S bajarla tanto, como si sucedería en el caso de que estuviera trabajando solo, simplemente en cuanto a la viscosidad y tal vez en casi toda la reología las dos nanopartículas actuando como un sistema compuesto tienden a perder sus efectos reológicos sobre el lodo, en comparación a cuando se probaron de manera individual, dejando sin relevancia el importante aspecto que en las pruebas preliminares tuvo el hecho de alterar y mover las concentraciones, pues las variaciones en la viscosidad fueron muy leves para poder decir que en algunas concentraciones es positivo y en otras es negativo, simplemente la viscosidad tendió a mantenerse como la del lodo base.

Figura 36. Viscosidades para concentración fija de O.S.



Para una mejor visualización de los porcentajes de variación que obtuvieron los diferentes lodos nanoparticulados con respecto al lodo base se presenta la **Tabla 27**, en ella es evidente que además de que la mayor parte de variación es negativa, estas no se alejan mucho del comportamiento del lodo base, pues el valor que más se alejó de dicho comportamiento solo lo hizo en cerca del 10% siendo el lodo que más bajó la viscosidad plástica, también se presenta el porcentaje de variación en el punto cedente, aunque estos valores si se alejan en mayor proporción de la línea del lodo base, estos pierden relevancia si se comparan con los datos de las nanopartículas cuando se evaluaron por separados, demostrando también una tendencia a la inhibición de las propiedades reológicas que presentó inicialmente el óxido grafeno.

Tabla 27. Porcentaje de variación de la VP y YP con el O.S constante.

Porcentaje de variación de VP y YP con respecto a lodo base para el Nanocomposito con concentración fija de O.S					
Concentración [Lb/Bbl]		PV [cP]	YP [lb/100 ft ²]	% de reducción	
O.G	O.S			PV	YP
0	0	30	66	-3,4%	-13,8%
0,525	0,0525	27	47	6,9%	19,0%
0,7	0,0525	27	44	6,9%	24,1%
0,175	0,0525	32	70	-10,3%	-20,7%
1,05	0,0525	29	58	0,0%	0,0%

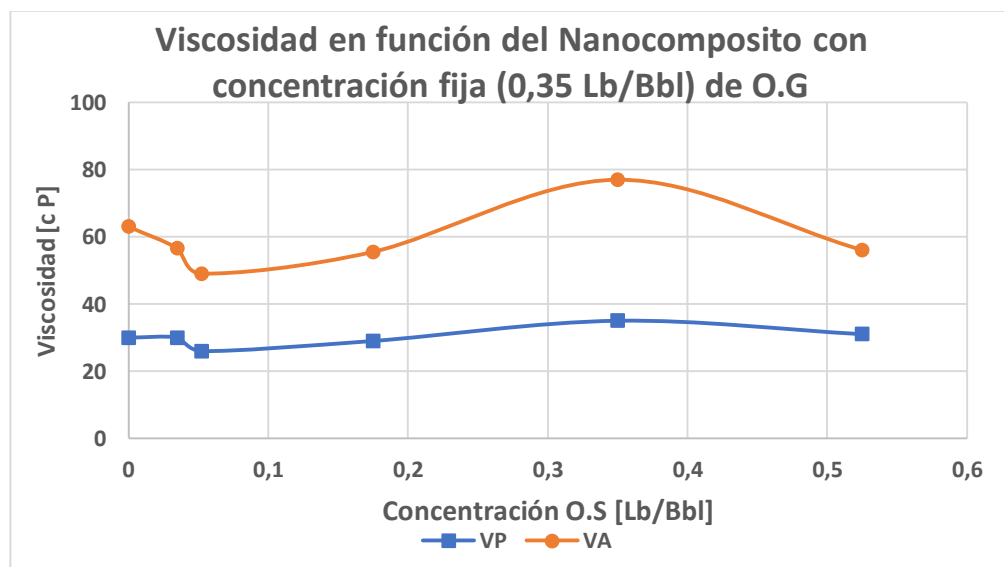
- **Viscosidad cuando la concentración de O.G es constante**

A continuación, se presenta el análisis a la posterior prueba, que consiste en la determinación de la reología del lodo cuando el nanocompuesto se encuentra de manera en que se varió la concentración del óxido de silicio mientras que la concentración de óxido de grafeno permanece constante como se había descrito anteriormente, en la **Figura 37** se puede observar como de manera similar al caso anterior (En que variaba el O.G), en este caso la viscosidad no se ve relevantemente alterada tanto de manera positiva como de manera negativa en relación al lodo base, al igual que en el caso anterior también se presenta uno de los puntos con una viscosidad mayor a la base, pero deja de ser relevante puesto que es un

incremento muy bajo y prácticamente al azar entre los puntos, contribuyendo a la conclusión de que simplemente el efecto viscosificante del O.G se ve inhibido por la presencia del O.S.

La razón por la que este fenómeno se presenta es por el carácter ácido que tiene el óxido de grafeno y debido a esto puede generar grupos OH sobre la superficie del O.S; a su vez estos grupos oxigenados tienden a atraerse y a interactuar directamente con el óxido de grafeno, dado que dicha interacción es entre la superficie esférica del O.S con los bordes de las láminas del O.G esto favorece que altas cantidades de estas capas se peguen por medio de estas interacciones al O.S y debido a esta densidad de láminas juntas convergiendo en una esfera por los bordes, es imposible que las capas de óxido de grafeno interactúen con las partículas de la bentonita y de esta manera no sea posible que haya un aumento en la tensión de corte que normalmente causaría la presencia de este nanomaterial en un lodo de perforación, es decir, las láminas de óxido de grafeno dejan de interactuar con la bentonita por interactuar con el óxido de silicio y esto evita que la reología aumente.

Figura 37. Viscosidades para concentración fija de O.G.



En la **Tabla 28** se muestra el porcentaje de la variación en la viscosidad plástica y la del punto cedente, en este caso se conserva medianamente la tendencia anterior aunque el porcentaje de variación es un poco más notable, pues como se observa en la viscosidad plástica el mayor aumento fue donde se utilizaron 1000 ppm de cada nanopartícula o lo que es igual a 0,35 lb/gal siendo este del 16% y la de mayor reducción en la viscosidad plástica siendo esta 13%, mismas tendencias un poco más remarcadas se ven en las variaciones del punto cedente, pero como se vio en el caso anterior se pierde la relevancia cuando se compara con la VP y YP de las partículas por individual siendo esas mucho más superiores cuando se compara con las propiedades del lodo base.

Tabla 28. Porcentaje de variación de la VP y YP con el O.G constante.

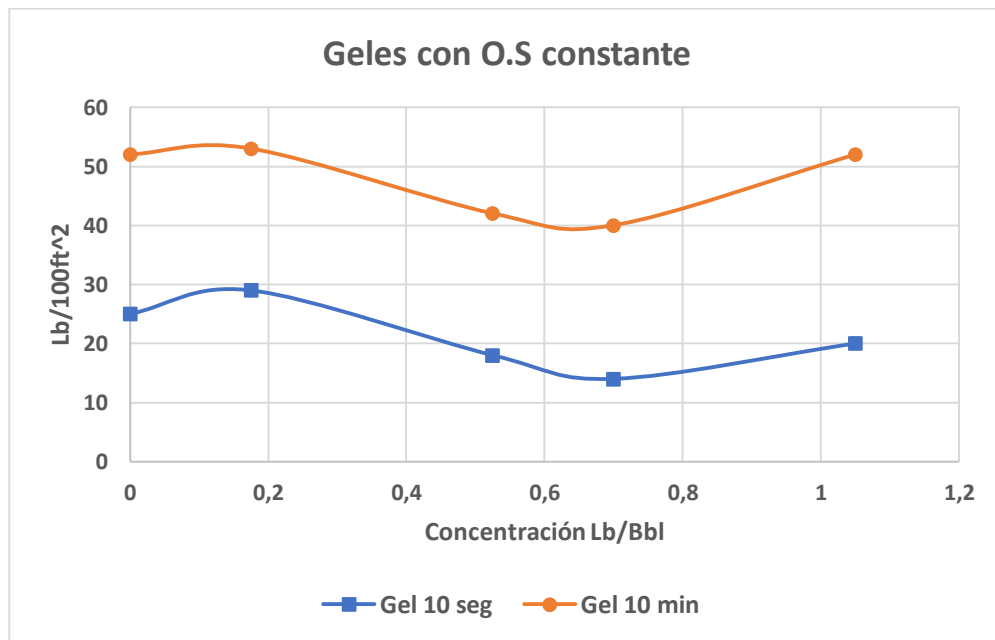
Porcentaje de variación de VP y YP con respecto a lodo base para el Nanocomposito con concentración fija de O.G					
Concentración [Lb/Bbl]		PV [cP]	YP [lb/100 ft^2]	% de reducción	
O.G	O.S			PV	YP
0,35	0,0525	26	46	13,3%	30,3%
0,35	0,175	29	53	3,3%	19,7%
0,35	0,35	35	84	-16,7%	-27,3%
0,35	0,035	30	53	0,0%	19,7%
0,35	0,525	31	50	-3,3%	24,2%
0	0	30	66	0,0%	0,0%

- **Efecto sobre el punto cedente y los geles**

En las **Figura 38 y 39** se puede observar el comportamiento de los geles a 10 segundos y 10 minutos de los lodos que contienen las nanopartículas, la primera de las gráficas se observa cuando el óxido de silicio está constante y en la segunda cuando el óxido de grafeno se encuentra constante, en estas se observa un comportamiento similar al que se ha venido viendo anteriormente con la viscosidad en cada uno de los casos, como por ejemplo que uno solo de los valores de cada grupo tenga un efecto positivo en comparación al lodo base mientras que los demás arrojan resultados por debajo, lo que permite concluir que por las razones

anteriormente expuestas es que se sigue manteniendo este comportamiento, la diferencia entre los dos sistemas de concentraciones no varía mucho aunque se observa la particularidad de que cuando el O.G aumenta su concentración los geles tienden a crecer en un bajo porcentaje, pero posteriormente con la continuidad del aumento de dicha concentración vuelve a bajar y a subir manteniendo esta progresiva tendencia a mantenerse alrededor tanto positivo como negativo de los valores del lodo base. Por el contrario, cuando la concentración de O.S es la que aumenta inicialmente los geles tienden a caer, pero con el aumento progresivo de esta concentración los valores tienden de nuevo a subir queriendo mantenerse de manera cercana al valor del lodo base.

Figura 38. Variación de los geles con O.S constante.



La **Figura 40** muestra el comportamiento que sigue la misma tendencia a normalizarse en los alrededores del valor del punto cedente del lodo base.

Figura 39. Variación de los geles con O.G constante.

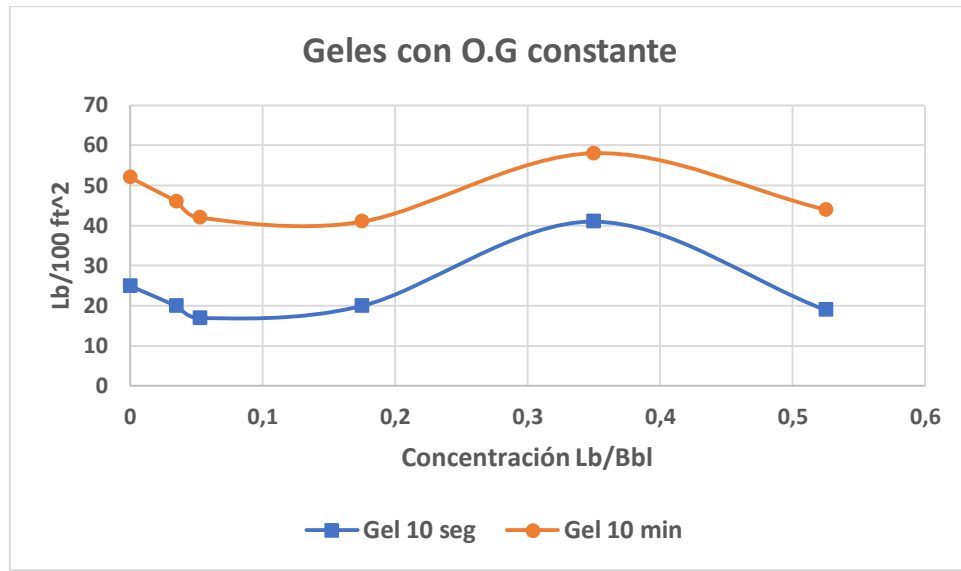
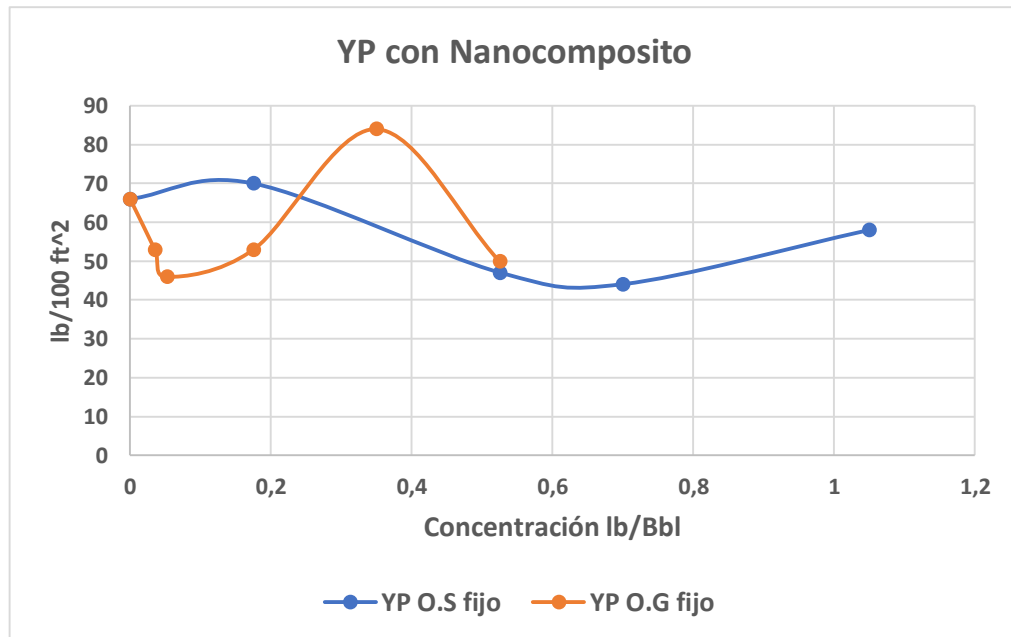


Figura 40. Variación yield point con Nanocomposito.



5.5.3 Análisis del efecto del nanocomposito en la pérdida de filtrado. En la **Tabla 29** se presentan los datos obtenidos de las pruebas de pérdida de filtrado, así como las observaciones hechas a la torta de cada una de las pruebas realizadas.

Tabla 29. Resultados prueba de filtrado con Nanocomposito.

Concentración [Lb/Bbl]		Densidad [Lb/Gal]	pH	Volumen de Filtrado (ml) @ 30 min	Análisis de la Torta		
O.G	O.S				Consistencia	Rigidez	Espesor
0,35	0,0525	8,6	9,1	8,4	Buena	Buena	= 1/32
0,35	0,175	8,53	9,14	8,1	Buena	Buena	> 1/32
0,35	0,35	8,6	9	8,1	Buena	Buena	= 1/32
0,35	0,035	8,59	9,06	8	Muy Buena	Muy Buena	< 1/32
0,525	0,0525	8,53	9,13	8,6	Muy Buena	Muy Buena	< 1/32
0,7	0,0525	8,54	9,02	7,9	Muy Buena	Muy Buena	< 1/32
0,175	0,0525	8,55	9,18	8,5	Muy Buena	Muy Buena	< 1/32
1,05	0,0525	8,53	9,12	7,4	Buena	Buena	< 1/32
0,35	0,525	8,54	8,95	8,2	Buena	Buena	< 1/32
0	0	8,53	9,15	8,9	Buena	Buena	< 1/32

Referente al análisis de la torta se puede observar que el nanocomposito es de ayuda como agente sellador de poros, pues en un 100% de las pruebas independiente de la combinación de concentraciones utilizadas hubo una reducción en la pérdida del filtrado, en la mayoría de casos también se conservó las buenas propiedades de la torta como el espesor, la rigidez y la consistencia, siendo benéfico en una eventual aplicación a la perforación pues si las anteriores condiciones no se controlan apropiadamente llevan a problemas operacionales que inducen a pérdidas de tiempo y en los peores casos hasta la pérdida completa o parcial del pozo que se perfora. La **Figura 41 y 42** muestra cómo quedaron las tortas de las 10 pruebas de filtrado según su concentración junto con la torta del lodo de referencia.

Figura 41. Tortas de la pérdida de filtrado del nanocomposito.

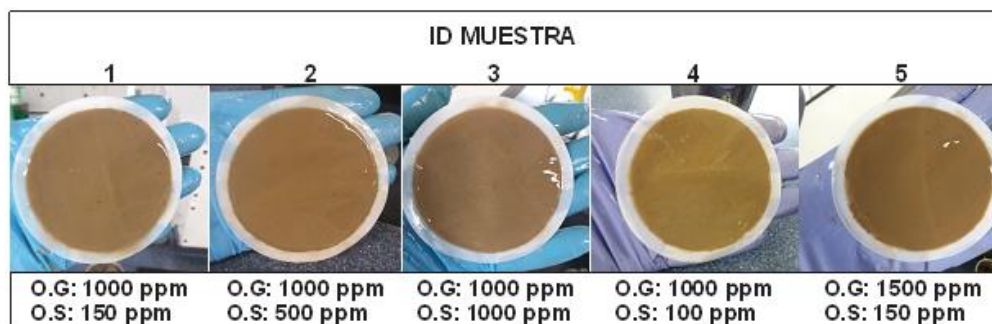
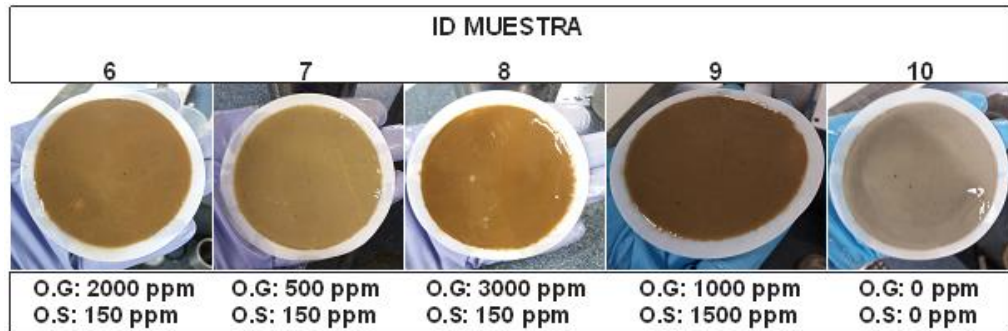


Figura 42. Tortas de la pérdida de filtrado del nanocomposito.

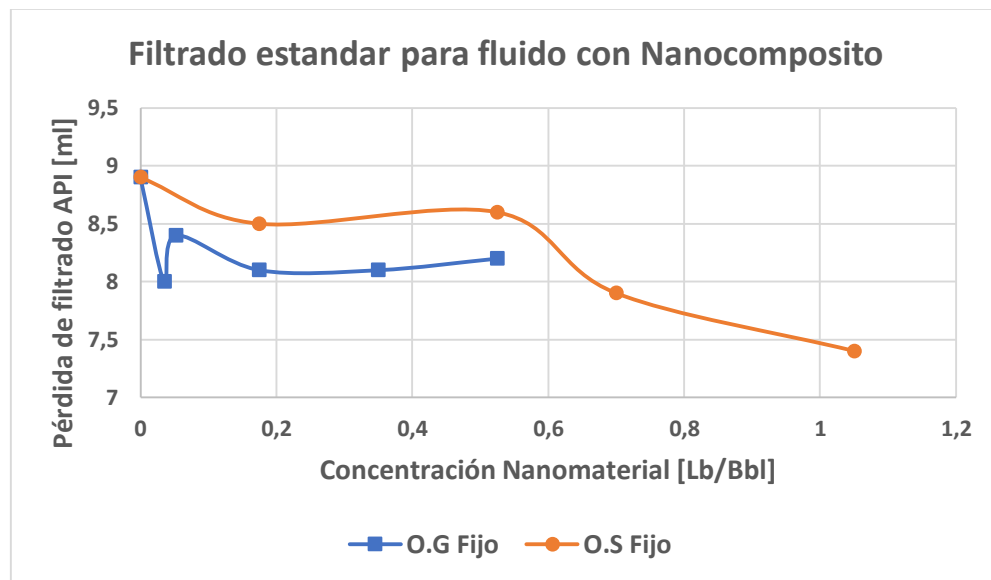


En la **Figura 43** se puede apreciar el comportamiento en la pérdida de filtrado de los dos diferentes sistemas de concentraciones ya conocidos, para el caso en que la concentración de O.G se encuentra fija y la que varía es la concentración de O.S se presenta el particular comportamiento de que a pesar que en comparación con el lodo base ocurre una reducción sustancial en la presencia de concentraciones bajas, dado que quien está en este caso variando la concentración es el óxido de silicio puede comprenderse que a estas condiciones se sigue manteniendo la característica de reducir filtrado que se presentó a bajas concentraciones cuando se evaluó de manera individual, obviamente no se desecha el hecho de que en esta ocasión está en presencia del O.G y que muy seguramente esté contribuye en cierta medida pues en el caso de la prueba individual se tuvo que a medida que la concentración aumentaba también aumentaba la pérdida de filtrado hasta llegar a una muy alta concentración la cual buscaba de nuevo bajar esta cantidad de filtrado, en este caso el aumento de la concentración de O.S después de 0.0525 lb/Bbl tiende a estabilizar el valor de la pérdida de filtrado y mantenerlo cerca a los 8,1 ml

De la misma manera en la **Figura 43** que contiene también la información de la pérdida de filtrado del nanocompuesto cuando en este se mantiene la concentración de O.S contante y se varía la del O.G , se muestra una considerable reducción general que de todos los diferentes lodos probados con estas características, como observación principal se tiene el hecho de que en este caso además de haber una

reducción desde la concentración más baja en adelante también dicha reducción tiene la tendencia a continuar en la medida que se aumente progresivamente la concentración de óxido de grafeno, a pesar que en este grupo de lodos es donde se presenta la mayor reducción de pérdida de filtrado siendo del 17% no deja de notarse que se dio con una adición bastante grande de O.G por lo que se podría presumir que esto sucedió debido a la acumulación en gran cantidad de muchas nanopartículas de O.G contribuyendo al taponamiento de los poros por cantidad de sólidos y no por eficiencia de las láminas.

Figura 43. Perdida de filtrado API vs concentración de Nanocomposito.



Recordando que anteriormente se llegó a la presunción que si el O.S se encontraba en la presencia ácida del O.G se provocaba una preferencia a que las láminas de óxido de grafeno interactúen mediante sus bordes con los grupos OH generados en el óxido de silicio por el carácter ácido del O.G, y estos a su vez dejen de hacerlo con las partículas de arcilla que conforman la bentonita utilizada. Cuando esto se presenta la partícula de O.S que es la que tiene la principal propiedad taponadora de poros, aumentan de tamaño una vez se le pegan la mayor cantidad posible de láminas, adicionalmente a esto, las capas no se le pegan de manera que lo

envuelvan, es decir, que tienda a conservar su forma esférica junto con su redondez cuando el tamaño aumenta, sino que por pegarse capas de borde o filo el aumento de tamaño uniformemente se pierde y eventualmente la eficiencia para taponar poros baja considerablemente, esa es la razón de por qué cuando el O.S se probó solo tuvo una disminución máxima del 51% mientras que cuando pasó a formar parte del material compuesto la disminución máxima de pérdida de filtrado fue tan solo de 17%.

Por otro lado en la **Figura 44 y 45** se observa cómo fue el comportamiento de los diferentes lodos evaluados a lo largo del tiempo que duró la prueba de filtrado, en la primera se puede apreciar que la mayoría de lodos con las nanopartículas presentan una menor pérdida con respecto al lodo base (línea verde) aunque los lodos con las nanopartículas arrojaron resultados positivos no se puede dejar de apreciar la mínima diferencia en comparación con el O.S puro que es el mayor precursor para la pérdida de filtrado.

Figura 44. Pérdida del filtrado con el O.G constante.

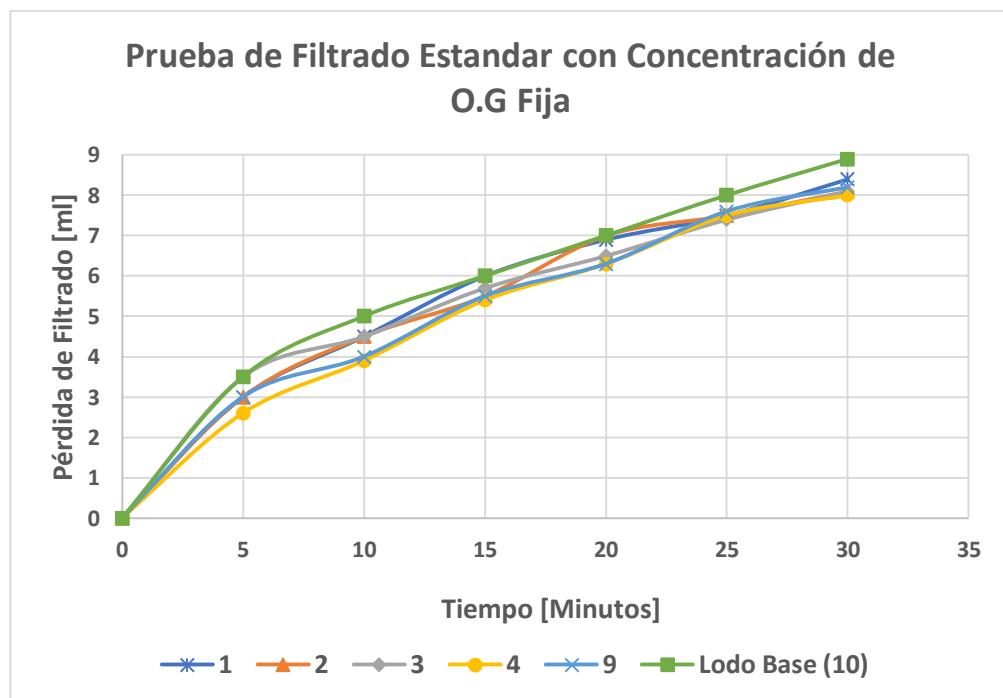
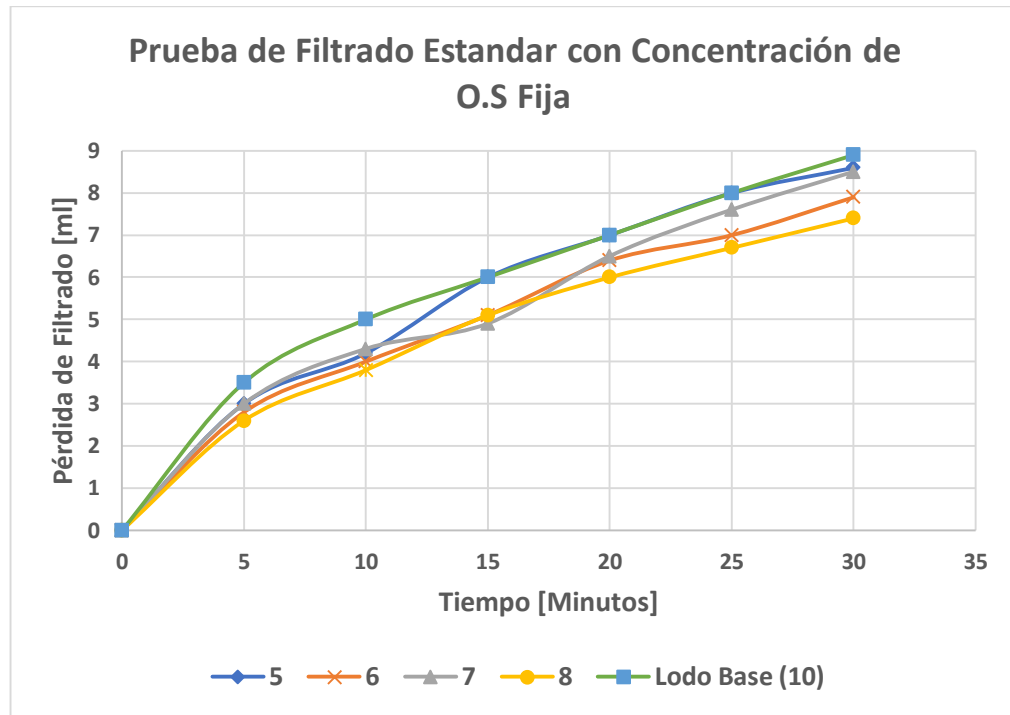


Figura 45. Pérdida de filtrado con el O.S constante.



5.5.4 Pruebas de envejecimiento. Siguiendo con lo planteado en el diseño experimental, se elaboraron los dos lodos de igual composición y agregando el Nanomaterial a uno de ellos, pues así se tendrá como parámetro el lodo base a la hora de observar y aumentan o disminuyen las propiedades.

En la **Tabla 30** se observa los datos obtenidos de reología para el lodo que posee el Nanocomposito, además el cálculo con los valores leídos del viscosímetro de viscosidad y punto cedente. En la **Tabla 31** se observa los resultados de reología y cálculos para el lodo base (cero Lb/Bbl de Nanocomposito).

Tabla 30. Resultados en reología para lodo envejecido con contenido de Nanomaterial.

Tiempo envejecimiento	Densidad [Lb/Gal]	pH	Esfuerzo de gel							10 Segundos	10 Minutos	Yp [Lb/100 ft ²]	VP	VA
			⊖ 600	⊖ 300	⊖ 200	⊖ 100	⊖ 6	⊖ 3	[cP]				[cP]	
Mezclado	8,51	10	178	140	120	97	55	54	39	79	102	38	89	
5 Horas después	8,53	10	129	91	76	58	29	28	23	44	53	38	64,5	
1 día después	8,51	10	118	84	69	52	21	20	19	40	50	34	59	
5 días después	8,5	10	115	82	68	50	21	20	19	44	49	33	57,5	
6 días después	8,51	10	110	78	65	48	20	19	18	44	46	32	55	
7 días después	8,51	9,8	114	80	66	49	19	18	15	43	46	34	57	

Tabla 31. Resultados en reología para lodo base envejecido.

Tiempo envejecimiento	Densidad [Lb/Gal]	pH	Esfuerzo de gel							10 Segundos	10 Minutos	Yp [Lb/100 ft ²]	VP	VA
			⊖ 600	⊖ 300	⊖ 200	⊖ 100	⊖ 6	⊖ 3	[cP]				[cP]	
Mezclado	8,52	10	154	117	102	84	50	51	34	61	80	37	77	
1 día después	8,51	10,2	156	121	105	86	52	51	34	64	86	35	78	
5 día después	8,51	10	159	125	109	88	52	50	31	58	91	34	79,5	
6 días después	8,5	9,9	162	123	107	86	49	48	29	64	84	39	81	
7 días después	8,51	9,7	158	121	106	85	48	47	20	63	84	37	79	

Para observar los datos obtenidos se procede a graficarlos, así ver de manera más fácil que fenómeno se dio durante los días en que se realizó la prueba.

Figura 46. Viscosidad plástica para pruebas de envejecimiento.

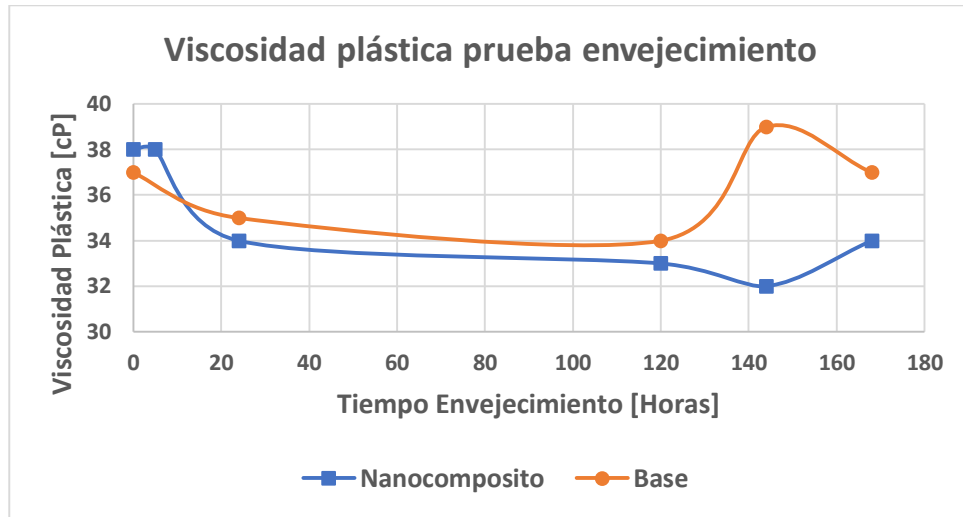
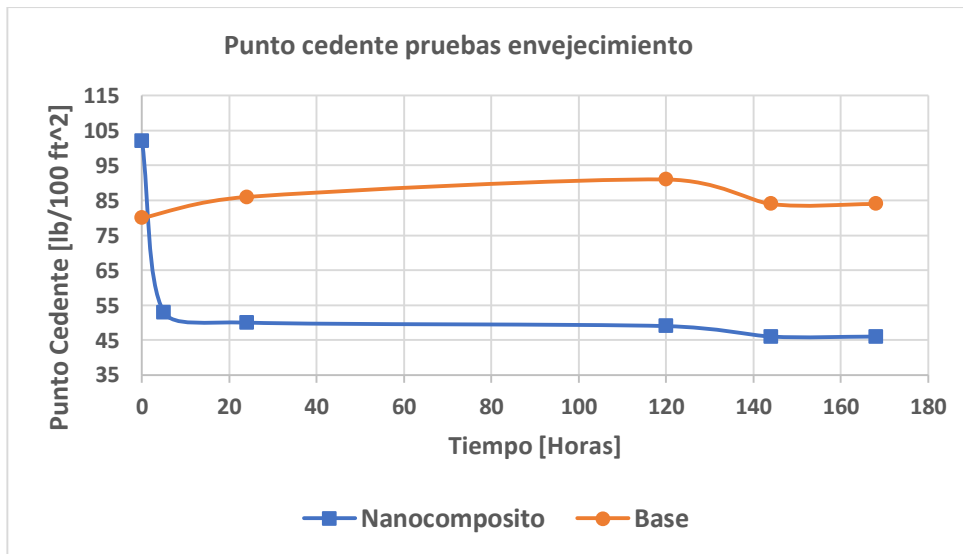


Figura 47. Punto cedente para pruebas de envejecimiento.



Con la ayuda de la gráfica de viscosidad plástica (**Figura 46**), se puede apreciar que se dio una caída mayor de la viscosidad del lodo con nanomaterial en comparación al lodo base e igualmente se da la tendencia a disminuir el punto cedente (**Figura 47**) con los nanomateriales y con el paso del tiempo. Lo anterior es reforzado con las **Figura 48 y 49**, donde en la primera que es el lodo base, se ve que la reología se mantuvo casi constante con el pasar del tiempo; además en la otra figura perteneciente al fluido con Nanomaterial la reología decayó al pasar el tiempo. Se infiere que hubo una neutralización entre las partículas de silicio y las partículas de óxido de grafeno, generando aglomeraciones dentro del fluido que poco aportaron; y más bien actuaron como un obstáculo limitando las interacciones electrostáticas que se dan generalmente entre partículas de arcilla con la que se dio cuerpo al fluido.

Figura 48. Reogramas para lodo base envejecido.

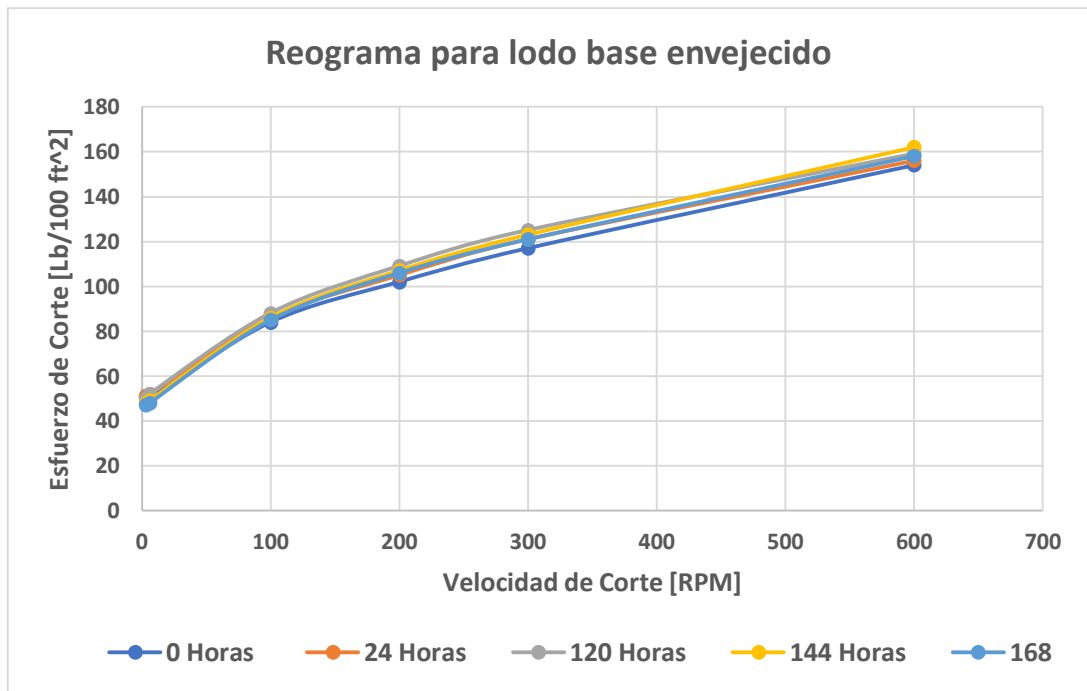
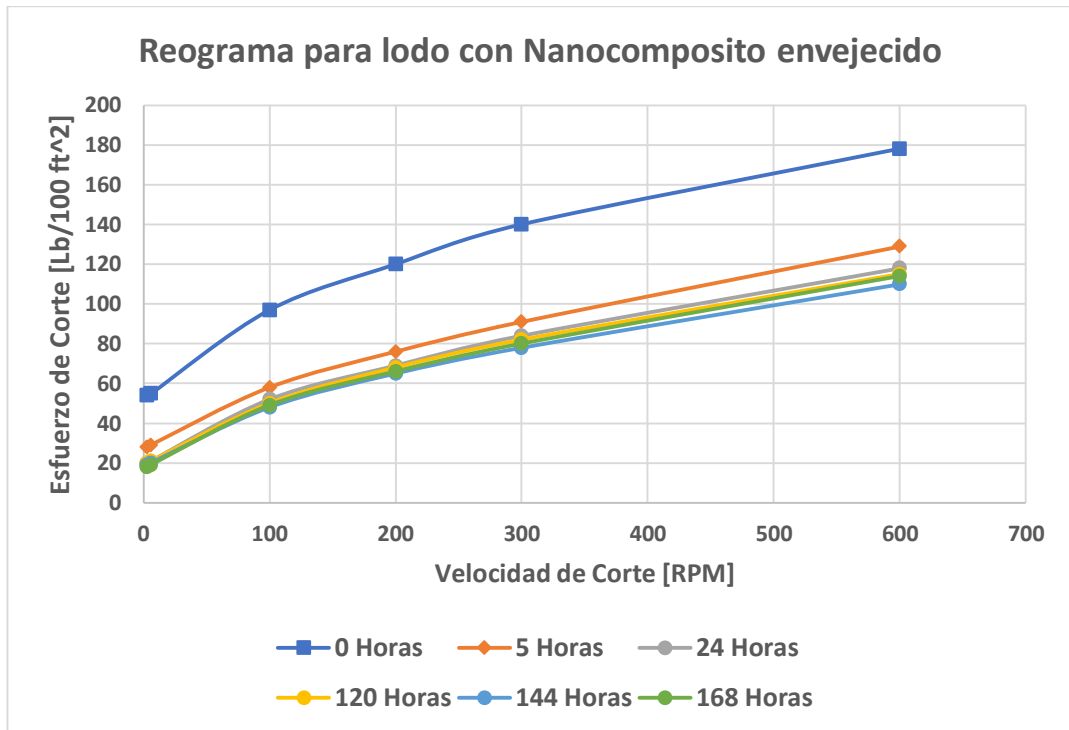


Figura 49. Reogramas para lodo con Nanocomposito envejecido.



5.6 ANÁLISIS DE COSTOS

Se realizó una estimación de los costos que se requieren para realizar este tipo de trabajo; se tuvieron en cuenta el costo de los aditivos utilizados, costo de los equipos con una vida útil estimada de 10 años, recursos humanos y otros costos asociados (**Tabla 32**). Para mayor detalle ver el **Anexo B**. Con esto se evaluaron las variables económicas que más afectan la investigación, generando un costo total de \$ 31.491.949, donde este valor puede variar dependiendo del plan que se siga en el proceso de síntesis y la variación de precios de equipos y reactivos en el mercado.

En la parte experimental se puede evidenciar que la síntesis del O.G presentó los mayores gastos, ya que se necesita mayormente de los equipos y reactivos del laboratorio de química los cuales tienen un costo elevado, además de requerir

mayores tiempos de trabajo. También es claro el mayor valor del O.G en comparación al O.S (**Tabla 33**).

Tabla 32. Costos asociados a la investigación.

Grupo de costos en la Investigación	Valor [Pesos]
Reactivos	\$ 1.586.949
Equipos de laboratorio	\$ 4.125.000
Recursos Humanos	\$ 22.080.000
Otros	\$ 3.700.000
	\$ 31.491.949

Tabla 33. Costo final de Nanomateriales.

Nanocomposito	Cantidad [gr]	Costo [Pesos]	
		Insumo Total	Gramo
O.S	20	\$ 100.000	\$ 5.000
O.G	10,5	\$ 9.268.290	\$ 882.694

El O.G al tener un complejo procedimiento para su obtención, requiere optimizar los tiempos y el proceso para que así disminuya sus costos asociados, o en últimas obtenerlo a mayores escalas. Para el caso de esta investigación el O.G generó un costo de \$ 882.694 por gramo (294 dólares/gramo) ya que se obtuvo como producto final 10,5 gramos; en el mercado son reducidas las opciones, pero hay la posibilidad de importar grandes cantidades con valores de 16 dólares/gramo para uso industrial y 100 dólares/gramo para usos en investigación, aun faltando agregarle todo lo que interviene con los gastos de importación, estos precios son menores ya que se produce a una escala mayor a la realizada en el laboratorio para esta investigación.

En la obtención de un barril las cantidades de aditivos incrementarían, lo cual también incrementa los costos, pues el equivalente de un gramo en laboratorio sería

una libra que equivale a 453,6 gramos. Para ello se estimaron los costos de un barril **(Tabla 34)** al adicionar 0,35 Lb/Bbl de O.G y 0,05 Lb/Bbl de O.S, las cuales fueron definidas en las pruebas preliminares como concentraciones óptimas. Para mayor detalle ir a **Anexo B**.

Tabla 34. Costos de obtener un barril de lodo.

Barril de lodo	Costo US/Bbl
Base	9
Nanocomposito con O.G Sintetizado	48.422
Nanocomposito con O.G comercial industrial	2.627
Nanocomposito con O.G comercial investigación	15.899

Como se pudo observar en la Tabla – los valores se alejan demasiado de lo que sería un lodo viable comercialmente, dejando una puerta abierta para seguir probando estos materiales con la finalidad de mayores rendimientos en cuanto a propiedades del fluido y además de cerrar la brecha de precios ante un lodo típico.

6. CONCLUSIONES

- Se encontró que el nanocomposito no obtuvo mejores resultados que sus componentes por separado, pues para el caso de la reología esta tuvo la tendencia a estar por debajo del lodo base en cerca del 18%, mientras que los resultados obtenidos con el O.G en las pruebas preliminares tendieron a subir, la viscosidad plástica subió un 38% y el punto cedente subió 100% cuando se agregaron 1000 ppm, siendo esa la concentración más optimista para ese caso. Para el caso de la pérdida de filtrado el nanocomposito la disminuyó en todas las concentraciones siendo la máxima de un 17%, pero esta disminución es menor que la presentada por el O.S cuando se evaluó sólo, siendo esta de 51% a 150 ppm.
- Se determinó que el O.G tiene una preferencia a interactuar con el O.S dejando a un lado las interacciones que normalmente tendría con las partículas de bentonita, permitiendo de esta forma la inhibición de la capacidad de este para subir la reología del lodo, de igual manera esta preferencia por el O.S también causó el aumento del tamaño de las partículas provocando que la eficiencia bajara a la hora de sellar los poros en las pruebas de filtrado.
- Se encontró que las nanopartículas de O.G y las del nanocomposito son compatibles con el lodo base que se utilizó y con cada uno de sus aditivos por separado, sin embargo, en el caso del O.S tras haber pasado algunos días mezclado con el lodo y sus aditivos se observó que este tuvo una muy pequeña sedimentación por lo que su compatibilidad no fue del 100%, de igual manera esto fue mientras se trabajó solo, para el caso del nanocomposito no se presentó esto.

- Se observó en las pruebas de envejecimiento, que el lodo que contenía al nanocomposito perdía con el pasar del tiempo sus propiedades reológicas, estas caían con el transcurso de los días y finalmente se estabilizaban, sin embargo, cuando esto sucedió se pudo apreciar que lo hacía en valores de reología por debajo que los valores del lodo base también sometido a la misma prueba.
- El proceso de la síntesis del óxido de grafeno es costoso debido a que se realiza en un periodo extenso y el consumo de reactivos y uso de equipos es el factor que más eleva los costos asociados, por esta razón se determinó que no es viable formular lodos para trabajo en campo que contengan este material, es decir, los gastos referentes a la obtención de este material, por el momento solo se justifican para investigación en laboratorio.
- Se determinó que el uso de las nanopartículas en los fluidos de perforación ha tenido su auge desde las últimas décadas, existiendo una variada cantidad de investigaciones, muchas de ellas ofreciendo resultados prometedores en algunas propiedades. En especial el óxido de grafeno y el óxido de silicio han sido estudiados por sus capacidades para mejorar reología y reducir filtrado respectivamente, las pruebas preliminares de esta investigación no solo brindaron una concentración para la formulación del nanocomposito, sino que al igual que lo indagado estas mejoraron sustancialmente las propiedades en cuestión, dándole un énfasis a la importancia de aplicar la nanotecnología en esta área de la perforación.

7. RECOMENDACIONES

- Realizar pruebas de reología y de filtrado para un amplio rango de relaciones de concentraciones de O.G y O.S, que permita un detallado análisis de los resultados, dado que en la presente investigación se tuvieron limitantes en la cantidad de O.G.
- Realizar una matriz sobre los puntos en los cuales dio mejores resultados el análisis de los nanocompositos, evaluando las características que un lodo debe cumplir, teniendo mayor cantidad de datos para comprender de manera más eficiente lo que sucedió en estos puntos.
- Evaluar este nanocomposito con otras formulaciones de fluidos de perforación base agua, o base aceite, evaluando la compatibilidad entre aditivos y propiedades del fluido.
- Evaluar el efecto sobre las propiedades de un fluido de perforación al agregar O.G sintetizado a diferentes tiempos de oxidación, así mismo con un nanocomposito elaborado con este mismo O.G.
- Realizar otras combinaciones entre diferentes materiales nanométricas para elaborar nanocompositos para aplicación en lodos de perforación en mejorar diferentes propiedades incluidas las de lodos contaminados.

BIBLIOGRAFIA

BAROID. Manual de fluidos. Houston, Texas. 2000.

BARÓN, Omar Alberto; MERCADO, Yamil José. Efectos de la sílice coloidal en las propiedades en estado fresco y endurecido del mortero y concreto hidráulico. Tesis de Maestría; Universidad Pontificia Javeriana; 2012.

BAUTISTA CUADROS, Andrés Fernando; FLORÉZ BARRETO, Elkin Darío. Factibilidad del uso de almidón de yuca como aditivo de lodos de perforación. Tesis de pregrado. Escuela de Ingeniería de Petróleos, Universidad Industrial de Santander, 2011.

CABRERA ALVAREZ, Edgar Nazareo. Estudio de nanocompuestos a base de polietileno con hidróxido de magnesio e hidrotalcita como retardante de flama. Efecto de agentes de acoplamiento y de compatibilización, Tesis Doctoral en Polímeros, Centro de investigación en química aplicada, Huila 2014.

COLLINS BRODIE, Sir Benjamin. On the atomic weight of graphite, Philos. Trans. R. Soc. London, 149, 1859. Researches on the atomic weight of graphite, J. Chem. Soc., 12, 1860.

FAJARDO MOLINA, Adrian Camilo; RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ, Carlos Jose. Factibilidad del uso de almidón de plátano como aditivo para lodos de perforación. Tesis de pregrado. Escuela de Ingeniería de Petróleos, Universidad Industrial de Santander, 2009.

FEYNMAN, Richard Phillips. There's Plenty of Room at the Bottom. American Physical Society at CalTech. 1959.

FLORES VIVIÁN, Ismael. Obtención de nanopartículas de SiO₂ y su efecto en las propiedades microestructurales, mecánicas y reológicas de los materiales cementantes. Universidad Autónoma de Nuevo León.

GARZÓN POSADA, Andrés Orlando. Materiales compuestos de matriz polimérica usados para el blindaje de interferencia electromagnética, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, 2017.

GONZÁLEZ ARIAS, Arnaldo; ORTA, Antonio. El año de la química y su influencia en la física y otras ciencias. Elemento 84 (2011) 47-51.

HERNÁNDEZ RIVERA, José Luis; GARCÍA ROCHA, Jorge. Revista Ciencia y Desarrollo, Materiales de Matriz Metálica, México 2010.

HERRÁEZ SÁNCHEZ, Ángel. Las Asombrosas Estructuras del Carbono: fullerenos, grafenos y nanotubos; Apuntes de Ciencias, Universidad de Alcalá, 2011.

HUMMERS JR, William; OFFEMAN, Richard. Preparation of graphitic oxide. Contribution from the broid division, national lead company 1958, 1339.

IMCO: Tecnología Aplicada de Lodos. Imco Services: Una compañía Halliburton. Houston, Texas.

LÓPEZ FERNÁNDEZ, Vicente. Nanomateriales basados en carbono, Universidad Autónoma de Madrid-Departamento de química inorgánica, Tesis Doctoral, Madrid, 2009.

LUMMUS, James., AZAR, Jamal., Drilling Fluids Optimization: A Practical Field Approach. California.: Pennwell Corporation, 1986.

MANCILLA POLANCO, Adel Alberto; QUIROGA BERDUGO, Camilo Andrés. Estudio de la factibilidad del uso de pulpa de café como aditivo en lodos de perforación. Tesis de pregrado. Escuela de Ingeniería de Petróleos, Universidad Industrial de Santander, 2012.

M-I & SWACO, 2001. Drilling Fluids Engineering Manual. Houston, Texas.

MONTGOMERY, Douglas C. Diseño y análisis de experimentos. México, D.F.: Editorial LIMUSA, 2004.

MORENO PASTOR, José Antonio. Análisis de óxido de silicio y estructuras multicapa para aplicaciones electrónicas. Universidad de Barcelona. 2000.

OCHOA LARA, Ismael Orlando, et al. Evaluación de un tratamiento químico para el control de parafinas del campo colorado. Bucaramanga.: SciELO. 2011.

PDVSA. Manual de fluidos de perforación. Centro Internacional de Educación y Desarrollo (CEID), 2002.

PRIETO REY, Katerin Maritza. Evaluación de la viabilidad técnico- financiera de las nanopartículas de sílice como aditivo para el control del filtrado en el fluido de perforación base agua a nivel laboratorio, UIS, tesis de pregrado, Bucaramanga, 2017.

RODRÍGUEZ GONZÁLEZ, Claramaría. Obtención de hojas de óxido de grafeno para el desarrollo de nanocompositos poliméricos, Universidad autónoma de Nuevo León, Tesis doctoral, San Nicolás de los Garza, N.L. 2012.

SALEM RAGAD, Adel. Innovative design of perforated fluid with nanomaterials. Suez University. 2016.

SAMITIER, Josep. Nanomed España, Plataforma Española de Nanomedicina, Instituto de Bioingeniería de Cataluña, Barcelona 2012.

SCHAFHEUTLE, C. On the combinations of carbon with silicon and iron, and other metals, forming the different species of cast iron, steel, and malleable, The Lond. and Edin. Phil. Mag., 16, 104, 1840.

SOLÍS FERNÁNDEZ, Pablo. Modificación superficial de materiales de carbono: grafito y grafeno, Universidad de Oviedo, Memoria de tesis doctoral, 2011.
SPE International Oilfield Nanotechnology Conference and Exhibition, 12-14 June, Noordwijk, The Netherlands 2012.

ANEXOS

Anexo A. Datos obtenidos de pruebas de compatibilidad.

Tabla 1. Pruebas de compatibilidad.

1	Composito + Agua
2	Composito + Bentonita + Agua
3	Composito + PAC-L + Agua
4	Composito + Soda Caustica + Agua
5	Composito + PAC-R + Agua
6	Composito + Barita + Agua
7	Óxido de Silicio + Agua
8	Óxido de Silicio + Bentonita + Agua
9	Óxido de Silicio + PAC-L + Agua
10	Óxido de Silicio + Soda Caustica + Agua
11	Óxido de Silicio + PAC-R + Agua
12	Óxido de Silicio + Barita + Agua
13	Óxido de Grafeno + Agua
14	Óxido de Grafeno + Bentonita + Agua
15	Óxido de Grafeno + PAC-L + Agua
16	Óxido de Grafeno + Soda Caustica + Agua
17	Óxido de Grafeno + PAC-R + Agua
18	Óxido de Grafeno + Barita + Agua

Tabla 2. Seguimiento para compatibilidad de Nanocomposito y Agua.

MUESTRA			Concentración Composito	Concentración otros Aditivos
Agua + Composito			O.G : 0,1 [Gramos] O.S : 0,15 [Gramos]	0 [Gramos]
FECHA			PH	OBSERVACIONES
DIA	MES	AÑO		
18	Julio	2018	2	1 Café oscuro, casi un negro
Toma Inicial				2 Ninguna
				3 Ninguna
				4 Ninguna
FECHA			PH	OBSERVACIONES
DIA	MES	AÑO		
19	Julio	2018	3	1 Café bastante intenso, casi negro
Toma a 1 Día				2 Ninguna
				3 Ninguna
				4 Bastante fluido, poca viscosidad
FECHA			PH	OBSERVACIONES
DIA	MES	AÑO		
21	julio	2018	2	1 Café bastante oscuro, casi negro
Toma a 3 Días				2 Ninguna
				3 Ninguna
				4 Viscosidad igual que al principio
FECHA			PH	OBSERVACIONES
DIA	MES	AÑO		
28	Julio	2018	2	1 Café bastante oscuro, casi negro
Toma a 10 Días				2 Ninguna
				3 Ninguna
				4 Igual de viscoso a las observaciones anteriores
FECHA			PH	OBSERVACIONES
DIA	MES	AÑO		
2	Agosto	2018	2	1 Café bastante oscuro, casi negro
Toma a 15 Días				2 Ninguna
				3 Ninguna
				4 Viscosidad igual
FECHA			PH	OBSERVACIONES
DIA	MES	AÑO		
17	Agosto	2018	2	1 Café muy oscuro, casi negro
Toma a 30 Días				2 Ninguna
				3 Fondo con unos pocos puntitos oscuros
				4 Ninguna

Tabla 3. Seguimiento para compatibilidad de Nanocomposito y Bentonita.

MUESTRA			Concentración Composito		Concentración otros Aditivos	
Agua + Composito + Bentonita			O.G : 0,1 [Gramos] O.S : 0,15 [Gramos]		Bentonita : 7,143 [Gramos]	
FECHA			PH	OBSERVACIONES		
DIA	MES	AÑO				
18	Julio	2018	6	1	Café claro, con tonalidad marrón	
Toma Inicial				2	Ninguna	
				3	Algunos puntos negros en el fondo	
				4	Ninguna	
FECHA			PH	OBSERVACIONES		
DIA	MES	AÑO				
19	Julio	2018	6	1	Tonalidad marrón oscuro	
Toma a 1 Día				2	Ninguna	
				3	Puntos negros en fondo y presencia de arena	
				4	Bastante fluido	
FECHA			PH	OBSERVACIONES		
DIA	MES	AÑO				
21	julio	2018	7	1	Marrón bastante oscuro	
Toma a 3 Días				2	Ninguna	
				3	Arena en fondo y puntos negros	
				4	Ninguna	
FECHA			PH	OBSERVACIONES		
DIA	MES	AÑO				
28	Julio	2018	7	1	Marrón bastante intenso	
Toma a 10 Días				2	Ninguna	
				3	Puntos negros en fondo	
				4	Ninguna	
FECHA			PH	OBSERVACIONES		
DIA	MES	AÑO				
2	Agosto	2018	7	1	Marrón bastante intenso	
Toma a 15 Días				2	Ninguna	
				3	Puntos negros en fondo y arena	
				4	Ninguna	
FECHA			PH	OBSERVACIONES		
DIA	MES	AÑO				
17	Agosto	2018	6	1	Marrón muy oscuro	
Toma a 30 Días				2	Ninguna	
				3	Fondo sedimentado más viscoso	
				4	Cuerpo del envase con manchas de fluido solidificado	

Tabla 4. Seguimiento para compatibilidad de Nanocomposito y Pac-L.

MUESTRA			Concentración Composito		Concentración otros Aditivos	
Agua + Composito + Pac-L			O.G : 0,1 [Gramos] O.S : 0,15 [Gramos]		Pac-L : 0,143 [Gramos]	
FECHA			PH	OBSERVACIONES		
DIA	MES	AÑO				
18	Julio	2018	3	1	Tonalidad café bastante fuerte	
Toma Inicial				2	Algunas burbujas	
				3	Ninguna	
				4	Residuos en paredes del recipiente (grumos)	
FECHA			PH	OBSERVACIONES		
DIA	MES	AÑO				
19	Julio	2018	3	1	Tonalidad café bastante fuerte, muy intenso	
Toma a 1 Día				2	Ninguna	
				3	Ninguna	
				4	Fondo viscoso que el resto del nivel de fluido	
FECHA			PH	OBSERVACIONES		
DIA	MES	AÑO				
21	julio	2018	3	1	Tonalidad café, muy intenso	
Toma a 3 Días				2	Ninguna	
				3	En fondo un poco viscoso amarillo fuerte	
				4	Paredes del recipiente con residuos viscosos	
FECHA			PH	OBSERVACIONES		
DIA	MES	AÑO				
28	Julio	2018	3	1	Tonalidad café, bastante fuerte	
Toma a 10 Días				2	Ninguna	
				3	Ninguna	
				4	Paredes del recipiente con residuos viscosos	
FECHA			PH	OBSERVACIONES		
DIA	MES	AÑO				
2	Agosto	2018	3	1	Tonalidad café, muy intenso	
Toma a 15 Días				2	Ninguna	
				3	En fondo más viscoso amarillo fuerte	
				4	Paredes del recipiente con residuos viscosos	
FECHA			PH	OBSERVACIONES		
DIA	MES	AÑO				
17	Agosto	2018	3	1	Café muy oscuro	
Toma a 30 Días				2	Ninguna	
				3	Fondo viscosos de color amarillento	
				4	Cuerpo del envase con la tonalidad del fluido	

Tabla 5. Seguimiento para compatibilidad de Nanocomposito y Pac-R.

MUESTRA			Concentración Composito	Concentración otros Aditivos
Agua + Composito + Pac-R			O.G : 0,1 [Gramos] O.S : 0,15 [Gramos]	Pac-R : 0,143 [Gramos]
FECHA			PH	OBSERVACIONES
DIA	MES	AÑO		
18	Julio	2018	3	1 Tonalidad café fuerte
Toma Inicial				2 Algunas burbujas
				3 Ninguna
				4 Pared recipiente manchada por residuos
FECHA			PH	OBSERVACIONES
DIA	MES	AÑO		
19	Julio	2018	3	1 Tonalidad café fuerte
Toma a 1 Día				2 Ninguna
				3 Fondo con algún precipitado amarillento a marrón
				4 Pared superior del recipiente con grumos
FECHA			PH	OBSERVACIONES
DIA	MES	AÑO		
21	julio	2018	3	1 Tonalidad café muy fuerte
Toma a 3 Días				2 Ninguna
				3 Fondo amarillento
				4 Residuos en las paredes del recipiente
FECHA			PH	OBSERVACIONES
DIA	MES	AÑO		
28	Julio	2018	3	1 Tonalidad café bastante oscuro
Toma a 10 Días				2 Ninguna
				3 Ninguna
				4 Paredes con residuos bastante pegados
FECHA			PH	OBSERVACIONES
DIA	MES	AÑO		
2	Agosto	2018	3	1 Tonalidad café muy fuerte
Toma a 15 Días				2 Ninguna
				3 Fondo amarillento
				4 Residuos en las paredes del recipiente
FECHA			PH	OBSERVACIONES
DIA	MES	AÑO		
17	Agosto	2018	3	1 Café muy oscuro
Toma a 30 Días				2 Ninguna
				3 En el fondo presencia de grumos amarillentos brillantes
				4 Cuerpo del envase tomo la tonalidad del fluido

Tabla 6. Seguimiento para compatibilidad de Nanocomposito y NaOH.

MUESTRA			Concentración Composito		Concentración otros Aditivos	
Agua + Composito + NaOH			O.G : 0,1 [Gramos] O.S : 0,15 [Gramos]		NaOH : 0,143 [Gramos]	
FECHA			PH	OBSERVACIONES		
DIA	MES	AÑO				
18	Julio	2018	12	1	Café muy oscuro, casi negro	
Toma Inicial				2	Ninguna	
				3	Ninguna	
				4	Poco viscoso	
FECHA			PH	OBSERVACIONES		
DIA	MES	AÑO				
19	Julio	2018	12	1	Negro	
Toma a 1 Día				2	Ninguna	
				3	Ninguna	
				4	Ninguna	
FECHA			PH	OBSERVACIONES		
DIA	MES	AÑO				
21	julio	2018	12	1	Negro	
Toma a 3 Días				2	Ninguna	
				3	Ninguna	
				4	Poco viscoso	
FECHA			PH	OBSERVACIONES		
DIA	MES	AÑO				
28	Julio	2018	12	1	Negro	
Toma a 10 Días				2	Ninguna	
				3	Ninguna	
				4	Poco viscoso	
FECHA			PH	OBSERVACIONES		
DIA	MES	AÑO				
2	Agosto	2018	12	1	Negro	
Toma a 15 Días				2	Ninguna	
				3	Ninguna	
				4	Bastante fluido, poco viscoso	
FECHA			PH	OBSERVACIONES		
DIA	MES	AÑO				
17	Agosto	2018	11	1	Negro	
Toma a 30 Días				2	Ninguna	
				3	Puntitos negros en el fondo	
				4	Algunas manchas negras en el cuerpo del envase	

Tabla 7. Seguimiento para compatibilidad de Nanocomposito y CaCO₃.

MUESTRA			Concentración Composito		Concentración otros Aditivos	
Agua + Composito + CaCO ₃			O.G : 0,1 [Gramos] O.S : 0,15 [Gramos]		CaCO ₃ : 1 [Gramos]	
FECHA			PH	OBSERVACIONES		
DIA	MES	AÑO				
18	Julio	2018	6	1	Tonalidad café	
Toma Inicial				2	Ninguna	
				3	Ninguna	
				4	Orillo superior de nivel de fluido más claro, muy delgado	
FECHA			PH	OBSERVACIONES		
DIA	MES	AÑO				
19	Julio	2018	6	1	Café Intenso	
Toma a 1 Día				2	Ninguna	
				3	Fondo marrón, como esponja triturada	
				4	Ninguna	
FECHA			PH	OBSERVACIONES		
DIA	MES	AÑO				
21	julio	2018	7	1	Café muy oscuro, casi negro	
Toma a 3 Días				2	Ninguna	
				3	Algunos grumos marrones	
				4	Ninguna	
FECHA			PH	OBSERVACIONES		
DIA	MES	AÑO				
28	Julio	2018	7	1	Café muy oscuro, casi negro	
Toma a 10 Días				2	Ninguna	
				3	Fondo amarillento	
				4	Fluido grumoso de tamaño pequeño y parejo	
FECHA			PH	OBSERVACIONES		
DIA	MES	AÑO				
2	Agosto	2018	7	1	Café muy oscuro, casi negro	
Toma a 15 Días				2	Ninguna	
				3	Fondo amarillento	
				4	Fluido grumoso	
FECHA			PH	OBSERVACIONES		
DIA	MES	AÑO				
17	Agosto	2018	6	1	Café muy oscuro	
Toma a 30 Días				2	Ninguna	
				3	Fondo con sedimentos oscuros	
				4	Fluido grumoso	

Tabla 8. Seguimiento para compatibilidad de O.S y Agua.

MUESTRA			Concentración Composito	Concentración otros Aditivos	
Agua + O.S			O.S : 0,15 [Gramos]	0 [Gramos]	
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
18	Julio	2018	5	1	Agua no cristalina, tonalidad blanco muy tenue
Toma Inicial				2	Ninguna
				3	Ninguna
				4	En fondo se comienza a ver fondo blanco suave
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
19	Julio	2018	5	1	Traslucido, agua cristalina
Toma a 1 Día				2	Ninguna
				3	Fondo opaco, precipitados blanco suave
				4	Ninguna
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
21	julio	2018	6	1	Cristalino, translucido
Toma a 3 Días				2	Ninguna
				3	Fondo con presencia de precipitado blanco tenue
				4	Ninguna
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
28	Julio	2018	6	1	Transparente, translucido
Toma a 10 Días				2	Ninguna
				3	Fondo blanco muy tenue
				4	Ninguna
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
2	Agosto	2018	6	1	Cristalino, translucido
Toma a 15 Días				2	Ninguna
				3	Fondo con presencia de precipitado blanco tenue
				4	Ninguna
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
17	Agosto	2018	6	1	Transparente, translucido
Toma a 30 Días				2	Ninguna
				3	Fondo con precipitados blancos muy tenues
				4	Paredes envase con agua condensada

Tabla 9. Seguimiento para compatibilidad de O.S y Bentonita.

MUESTRA			Concentración Composito	Concentración otros Aditivos	
Agua + O.S + Bentonita			O.S : 0,15 [Gramos]	Bentonita : 7,143 [Gramos]	
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
18	Julio	2018	9	1	Grisáceo
Toma Inicial				2	Ninguna
				3	Puntos negros en fondo
				4	Presenta algo de viscosidad
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
19	Julio	2018	9	1	Grisáceo
Toma a 1 Día				2	Ninguna
				3	Puntos negros en fondo
				4	Misma viscosidad que al principio
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
21	julio	2018	8	1	Grisáceo algo oscuro
Toma a 3 Días				2	Ninguna
				3	Fondo arenoso y puntos negros
				4	Puntitos negros presentes en todo el fluido
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
28	Julio	2018	8	1	Grisáceo fuerte
Toma a 10 Días				2	Ninguna
				3	Fondo arenoso con puntos negros y blancos
				4	Agua condensada en cuerpo del envase
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
2	Agosto	2018	8	1	Grisáceo algo oscuro
Toma a 15 Días				2	Ninguna
				3	Fondo arenoso y puntos negros
				4	Puntitos negros en el fluido
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
17	Agosto	2018	8	1	Grisáceo
Toma a 30 Días				2	Ninguna
				3	Fondo arenoso con puntos negros
				4	Fondo más viscoso que la parte superior

Tabla 10. Seguimiento para compatibilidad de O.S y Pac-L.

MUESTRA			Concentración Composito	Concentración otros Aditivos	
Agua + O.S + Pac-L			O.S : 0,15 [Gramos]	Pac-L : 0,143 [Gramos]	
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
18	Julio	2018	6	1	No traslucido, amarillo muy tenue
Toma Inicial				2	Ninguna
				3	Pequeñas partículas en fondo
				4	Pequeñas partículas en suspensión
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
19	Julio	2018	6	1	Alguna tonalidad amarillenta muy tenue
Toma a 1 Día				2	Ninguna
				3	Fondo opaco por precipitados
				4	Ninguna
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
21	julio	2018	6	1	Cristalino con tonalidad amarillenta muy suave
Toma a 3 Días				2	Ninguna
				3	Fondo con color amarillo pálido suave
				4	Pequeñas virutas en fluido suspendidas
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
28	Julio	2018	6	1	Transparente
Toma a 10 Días				2	Ninguna
				3	Fondo muy tenue
				4	Minúsculas partículas suspendidas
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
2	Agosto	2018	6	1	Transparente
Toma a 15 Días				2	Ninguna
				3	Fondo muy tenue
				4	Minúsculas partículas suspendidas
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
17	Agosto	2018	6	1	Transparente, traslucido
Toma a 30 Días				2	Ninguna
				3	Fondo viscoso de tonalidad blanco tenue
				4	Minúsculas partículas oscuras en fondo

Tabla 11. Seguimiento para compatibilidad de O.S y Pac-R.

MUESTRA			Concentración Composito	Concentración otros Aditivos
Agua + O.S + Pac-R			O.S : 0,15 [Gramos]	Pac-R : 0,143 [Gramos]
FECHA			PH	OBSERVACIONES
DIA	MES	AÑO		
18	Julio	2018	6	1 Agua no traslucida, tonalidad blanco bastante tenue
Toma Inicial				2 Algunas burbujas pequeñas
				3 Ninguna
				4 Ninguna
FECHA			PH	OBSERVACIONES
DIA	MES	AÑO		
19	Julio	2018	6	1 Agua cristalina
Toma a 1 Día				2 Ninguna
				3 Presencia de fondo algo opaco
				4 En paredes residuos muy pequeños, puntitos
FECHA			PH	OBSERVACIONES
DIA	MES	AÑO		
21	julio	2018	6	1 Agua cristalina
Toma a 3 Días				2 Ninguna
				3 Fondos blanco tenue
				4 Ninguna
FECHA			PH	OBSERVACIONES
DIA	MES	AÑO		
28	Julio	2018	6	1 Cristalino, traslucido
Toma a 10 Días				2 Ninguna
				3 Fondo blanco tenue
				4 Agua condensada en cuerpo de envase
FECHA			PH	OBSERVACIONES
DIA	MES	AÑO		
2	Agosto	2018	6	1 Agua cristalina
Toma a 15 Días				2 Ninguna
				3 Presencia de fondo algo opaco
				4 En paredes residuos muy pequeños, puntitos
FECHA			PH	OBSERVACIONES
DIA	MES	AÑO		
17	Agosto	2018	6	1 Cristalino, traslucido
Toma a 30 Días				2 Ninguna
				3 Fondo blanco muy tenue
				4 Agua condensada en cuerpo del envase

Tabla 12. Seguimiento para compatibilidad de O.S y NaOH.

MUESTRA			Concentración Composito	Concentración otros Aditivos	
Agua + O.S + NaOH			O.S : 0,15 [Gramos]	NaOH : 0,143 [Gramos]	
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
18	Julio	2018	12	1	Traslucido
Toma Inicial				2	Ninguna
				3	Ninguna
				4	Puntos blancos diminutos en suspensión
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
19	Julio	2018	12	1	Traslucido
Toma a 1 Día				2	Ninguna
				3	Fondo blanco muy tenue
				4	En paredes presencia puntitos blancos
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
21	julio	2018	12	1	Traslucido
Toma a 3 Días				2	Ninguna
				3	Algún precipitado de color blanco muy tenue
				4	Ninguna
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
28	Julio	2018	12	1	Transparente, translucido
Toma a 10 Días				2	Ninguna
				3	Partículas muy tenues en fondo del recipiente
				4	Ninguna
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
2	Agosto	2018	12	1	Traslucido
Toma a 15 Días				2	Ninguna
				3	Algún precipitado de color blanco muy tenue
				4	Ninguna
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
17	Agosto	2018	12	1	Transparente, translucido
Toma a 30 Días				2	Ninguna
				3	Fondo arenoso transparente
				4	Ninguna

Tabla 13. Seguimiento para compatibilidad de O.S y CaCO₃.

MUESTRA			Concentración Composito	Concentración otros Aditivos	
Agua + O.S + CaCO ₃			O.S : 0,15 [Gramos]	CaCO ₃ : 1 [Gramos]	
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
18	Julio	2018	6	1	Blanco de tonalidad suave
Toma Inicial				2	Ninguna
				3	En fondo especie de harina blanca
				4	Ninguna
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
19	Julio	2018	6	1	Cristalino
Toma a 1 Día				2	Ninguna
				3	Fondo blanco amarillento por precipitados
				4	Ninguna
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
21	julio	2018	6	1	Cristalino
Toma a 3 Días				2	Ninguna
				3	Fondo blanco amarillento por precipitados
				4	Ninguna
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
28	Julio	2018	6	1	Tono blancuzco muy tenue
Toma a 10 Días				2	Ninguna
				3	Fondo blanco tenue
				4	Ninguna
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
2	Agosto	2018	6	1	Cristalino
Toma a 15 Días				2	Ninguna
				3	Fondo blanco amarillento por precipitados
				4	Ninguna
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
17	Agosto	2018	6	1	Cristalino, traslucido
Toma a 30 Días				2	Ninguna
				3	Fondo blanco fuerte
				4	Agua condensada en cuerpo del envase

Tabla 14. Seguimiento para compatibilidad de O.G y Agua.

MUESTRA			Concentración Composito	Concentración otros Aditivos	
Agua + O.G			O.G : 0,1 [Gramos]	0 [Gramos]	
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
18	Julio	2018	3	1	Marrón claro
Toma Inicial				2	Ninguna
				3	Ninguna
				4	Ninguna
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
19	Julio	2018	3	1	Marrón claro
Toma a 1 Día				2	Ninguna
				3	Ninguna
				4	Ninguna
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
21	julio	2018	3	1	Marrón claro
Toma a 3 Días				2	Ninguna
				3	Ninguna
				4	Ninguna
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
28	Julio	2018	3	1	Marrón claro
Toma a 10 Días				2	Ninguna
				3	Ninguna
				4	Ninguna
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
2	Agosto	2018	3	1	Marrón oscuro
Toma a 15 Días				2	Ninguna
				3	Ninguna
				4	Solución homogénea
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
17	Agosto	2018	3	1	Marrón oscuro
Toma a 30 Días				2	Algunas burbujas muy pequeñas
				3	Ninguna
				4	Solución homogénea

Tabla 15. Seguimiento para compatibilidad de O.G y Bentonita.

MUESTRA			Concentración Composito	Concentración otros Aditivos	
Agua + O.G + Bentonita			O.G : 0,1 [Gramos]	Bentonita : 7,143 [Gramos]	
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
18	Julio	2018	8	1	Grisáceo
Toma Inicial				2	Ninguna
				3	Ninguna
				4	Ninguna
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
19	Julio	2018	8	1	Grisáceo
Toma a 1 Día				2	Ninguna
				3	Ninguna
				4	Adquirió más viscosidad
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
21	julio	2018	8	1	Grisáceo más oscuro
Toma a 3 Días				2	Ninguna
				3	Ninguna
				4	Adquirió más viscosidad
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
28	Julio	2018	8	1	Grisáceo
Toma a 10 Días				2	Ninguna
				3	Ninguna
				4	Ninguna
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
2	Agosto	2018	9	1	Grisáceo oscuro
Toma a 15 Días				2	Ninguna
				3	Ninguna
				4	Ninguna
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
17	Agosto	2018	8	1	Grisáceo oscuro
Toma a 30 Días				2	Presencia de pequeñas burbujas
				3	Fondo arenoso
				4	Ninguna

Tabla 16. Seguimiento para compatibilidad de O.G y Pac-L.

MUESTRA			Concentración Composito	Concentración otros Aditivos	
Agua + O.G + Pac-L			O.G : 0,1 [Gramos]	Pac-L : 0,143 [Gramos]	
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
18	Julio	2018	4	1	Marrón claro
Toma Inicial				2	Ninguna
				3	Ninguna
				4	Algo viscoso
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
19	Julio	2018	4	1	Marrón claro
Toma a 1 Día				2	Ninguna
				3	Ninguna
				4	Ninguna
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
21	julio	2018	4	1	Marrón claro
Toma a 3 Días				2	Ninguna
				3	Ninguna
				4	Ninguna
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
28	Julio	2018	4	1	Marrón levemente oscuro
Toma a 10 Días				2	Ninguna
				3	Ninguna
				4	
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
2	Agosto	2018	4	1	Marrón oscuro
Toma a 15 Días				2	Ninguna
				3	Ninguna
				4	Ninguna
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
17	Agosto	2018	4	1	Marrón oscuro
Toma a 30 Días				2	Ninguna
				3	Ninguna
				4	Ninguna

Tabla 17. Seguimiento para compatibilidad de O.G y Pac-R.

MUESTRA			Concentración Composito	Concentración otros Aditivos	
Agua + O.G + Pac-R			O.G : 0,1 [Gramos]	Pac-R : 0,143 [Gramos]	
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
18	Julio	2018	3	1	Marrón claro
Toma Inicial				2	Ninguna
				3	Ninguna
				4	Ninguna
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
19	Julio	2018	3	1	Marrón claro
Toma a 1 Día				2	Pequeñas en la superficie
				3	Ninguna
				4	Ninguna
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
21	julio	2018	3	1	Marrón claro
Toma a 3 Días				2	Pequeñas en la superficie
				3	Ninguna
				4	Ninguna
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
28	Julio	2018	3	1	Marrón claro
Toma a 10 Días				2	Pequeñas en la superficie
				3	Ninguna
				4	Ligeramente viscoso
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
2	Agosto	2018	3	1	Marrón
Toma a 15 Días				2	Pequeñas en la superficie
				3	Ninguna
				4	Ligeramente viscoso
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
17	Agosto	2018	3	1	Marrón oscuro
Toma a 30 Días				2	Pequeñas en la superficie
				3	Ninguna
				4	Ligeramente viscoso

Tabla 18. Seguimiento para compatibilidad de O.G y NaOH.

MUESTRA			Concentración Composito	Concentración otros Aditivos	
Agua + O.G + NaOH			O.G : 0,1 [Gramos]	NaOH : 0,143 [Gramos]	
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
18	Julio	2018	12	1	Café muy oscuro
Toma Inicial				2	Ninguna
				3	Ninguna
				4	Ninguna
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
19	Julio	2018	12	1	Café muy oscuro
Toma a 1 Día				2	Ninguna
				3	Ninguna
				4	Ninguna
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
21	julio	2018	12	1	Negro
Toma a 3 Días				2	Ninguna
				3	Ninguna
				4	Ninguna
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
28	Julio	2018	12	1	Negro
Toma a 10 Días				2	Ninguna
				3	Ninguna
				4	Ninguna
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
2	Agosto	2018	12	1	Negro
Toma a 15 Días				2	Ninguna
				3	Ninguna
				4	Ninguna
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
17	Agosto	2018	12	1	Negro
Toma a 30 Días				2	Ninguna
				3	Ninguna
				4	Ninguna

Tabla 19. Seguimiento para compatibilidad de O.G y CaCO3.

MUESTRA			Concentración Composito	Concentración otros Aditivos	
Agua + O.G + CaCO3			O.G : 0,1 [Gramos]	CaCO3 : 1 [Gramos]	
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
18	Julio	2018	8	1	Grisáceo
Toma Inicial				2	Ninguna
				3	Mitad de la solución
4	Ninguna				
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
19	Julio	2018	8	1	Grisáceo
Toma a 1 Día				2	Ninguna
				3	Mitad de la solución
4	Ninguna				
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
21	julio	2018	7	1	Café
Toma a 3 Días				2	Ninguna
				3	Fondo
4	Ninguna				
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
28	Julio	2018	7	1	Café
Toma a 10 Días				2	Ninguna
				3	Fondo
4	Ninguna				
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
2	Agosto	2018		1	Café oscuro
Toma a 15 Días				2	Ninguna
				3	Fondo
4	Ninguna				
FECHA			PH	OBSERVACIONES	
DIA	MES	AÑO			
17	Agosto	2018		1	Café muy oscuro
Toma a 30 Días				2	Ninguna
				3	Fondo
4	Ninguna				

Anexo B. Tablas evaluación de costos de la investigación.

Tabla 1. Costos asociados a compra de reactivos.

Reactivo	Información de Compra		Cantidad usada en síntesis	Costo síntesis [Pesos]
	Presentación	Costo [Pesos]		
Grafito Puro	2,5 kg	787.800	15	4.726
Ácido Sulfúrico	1 litro	234.000	2	468.000
Ácido Fórmico	2,5 litros	728.000	0,5	145.600
Ácido Fosfórico	1 litro	570.700	0,8	456.560
Permanganato de Potasio	1 kg	1.345.500	100	134.550
Peróxido de Hidrogeno	1 litro	652.600	0,2	130.520
Bentonita	50 Lb	60.000	2,2 Lb	2.640
Pac-I	1 Tonelada	2.900.000	20 gr	29
Pac-R	1 Tonelada	2.300.000	10 gr	23
CaCO ₃	250 g	264.000	10 gr	10.560
NaOH	1 kg	87.000	20 gr	1.740
O.S	1 gr	11.600	20 gr	232.000
				\$ 1.586.949

Tabla 2. Costos asociados a recursos humanos.

Actividad	Tiempo [Semanas]	Precio [Pesos]	Valor [Pesos] 2 Investigadores
Síntesis O.G	8	195.000	3.120.000
Pruebas Preliminares	1	195.000	390.000
Pruebas Nanocomposito	3	195.000	1.170.000
Indagación tema	8	195.000	3.120.000
Informes	8	195.000	3.120.000
Tramites y otros	4	195.000	1.560.000
Director y Codirector	192 Horas	50.000	9.600.000
			\$ 22.080.000

Tabla 3. Costos asociados a equipos de laboratorio.

Equipo Laboratorio	Valor Equipo [Pesos]	Tiempo promedio de Uso [Meses]	Valor del uso de Equipo
Cabina de Gases	30.000.000	1	250.000
Ultrasonido	65.000.000	1	541.666
Centrifuga	10.000.000	1	83.333
Bomba de Vacío	3.000.000	1	25.000
Plancha Calentamiento	1.000.000	1	8.333
Horno	45.000.000	1	375.000
Balanza Electrónica	1.500.000	1	12.500
Baño Ultrasonido	1.500.000	1	12.500
Caracterización por Difracción de Rayos X (DRX)	2.500.000	---	2.500.000
Mixer	4.000.000	1	33.333
Balanza Electrónica	1.500.000	1	12.500
Balanza de Lodos	3.000.000	1	25.000
Viscosímetro FANN	26.000.000	1	216.666
Filtro prensa	3.500.000	1	29.166
			\$ 4.125.000

Tabla 4. Materiales de laboratorio y otros.

Material	Cantidad	Total
Materiales Lab. Lodos	---	300.000
Materiales síntesis O.G	---	1.000.000
Papelería	---	400.000
Equipos de Computo	2	2000.000
		\$ 3.700.000

Tabla 5. Costo de producir un barril de lodo base.

Aditivo	Cantidad	Presentación	Precio Comercial	Costo en lodo
Bentonita	25 Lb	50 Lb	\$ 50.000	\$ 25.000
Pac-L	0,5 Lb	1 Ton	\$ 2.900.000	\$ 659
				\$ 25.659
				US 9

Tabla 6. Costo de producir un barril de lodo con nanomaterial, O.G sintetizado en laboratorio UIS Guatiguará.

Aditivo	Cantidad	Presentación	Precio Comercial	Costo en lodo
Bentonita	25 Lb	50 Lb	\$ 50.000	\$ 25.000
Pac-L	0,5 Lb	1 Ton	\$ 2.900.000	\$ 659
O.G	0,35 Lb	1 gr	\$ 882.694	\$ 139.465.652
O.S	0,05 Lb	1 gr	\$ 11.600	\$ 263.088
				\$ 139.754.399
				US 48.422

Tabla 7. Costo de producir un barril de lodo con nanomaterial, O.G comercial tipo industrial.

Aditivo	Cantidad	Presentación	Precio Comercial	Costo en lodo
Bentonita	25 Lb	50 Lb	\$ 50.000	\$ 25.000
Pac-L	0,5 Lb	1 Ton	\$ 2.900.000	\$ 659
O.G	0,35 Lb	1 gr	\$ 46.400	\$ 7.331.200
O.S	0,05 Lb	1 gr	\$ 11.600	\$ 263.088
				\$ 7.619.947
				US 2.627

Tabla 8. Costo de producir un barril de lodo con nanomaterial, O.G comercial tipo investigación.

Aditivo	Cantidad	Presentación	Precio Comercial	Costo en lodo
Bentonita	25 Lb	50 Lb	\$ 50.000	\$ 25.000
Pac-L	0,5 Lb	1 Ton	\$ 2.900.000	\$ 659
O.G	0,35 Lb	1 gr	\$ 290.000	\$ 45.820.000
O.S	0,05 Lb	1 gr	\$ 11.600	\$ 263.088
				\$ 46.108.747
				US 15.899