

**FACTIBILIDAD DEL USO DE ACEITE MINERAL BLANCO GRADO TÉCNICO
COMO FASE CONTINUA EN LODOS DE PERFORACIÓN.**

JOSÉ EFRAÍN GONZÁLEZ GONZÁLEZ

GABRIEL MATTA ARIZA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2014

**FACTIBILIDAD DEL USO DE ACEITE MINERAL BLANCO GRADO TÉCNICO
COMO FASE CONTINUA EN LODOS DE PERFORACIÓN.**

JOSÉ EFRAÍN GONZÁLEZ GONZÁLEZ

GABRIEL MATTA ARIZA

**Trabajo de grado para optar el título de
IINGENIERO DE PETRÓLEOS**

Director

Esp. César Augusto Pineda Gómez

Ingeniero de petróleos

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2014

DEDICATORIA

A Dios por bendecirme cada día de mi vida, brindarme vida y salud para alcanzar mis metas propuestas.

A mis padres, Alexis Matta Suárez y María de los Ángeles, quienes con mucho esfuerzo y dedicación me han brindado todo su amor y ayuda incondicional.

A mi tía Ana Roselia Ariza Coronel que siempre me colaboró, me dio aliento y me trajo todas mis encomiendas los lunes.

A mis hermanos Raúl y Aracely por el amor que toda la vida me han dado y todas las cosas maravillosas que han hecho por mí.

A mi novia Lucy Andrea Carrillo quien estuvo a mi lado en las buenas y en las malas y fue un apoyo trascendental día tras día de inicio a fin.

A todos mis Amigos que siempre estuvieron a mi lado en este proceso profesional, en especial a Carlos Andrés Páez quien ayudo en la plantación de semillas sin condición alguna.

A todos aquellos que de una u otra forma colaboraron con la realización de este sueño que se llama ser Ingeniero de Petróleos, este triunfo también es suyo...

.....gracias.

GABRIEL MATTÁ ARIZA.

DEDICATORIA

Es tan importante y necesario para cada hombre cuando cuente sus metas no solo decir a donde llego si no como lo hizo, son razones más que suficientes para agradecer al Dios justo por brindarme la oportunidad de vivir para formarme en una Universidad, pues de dónde vengo no es algo muy común.

El respeto y retribución a mis padres Ovelio González y María Lucinda González dos seres maravillosos que con humildad y esfuerzo me permitieron formarme como Ingeniero de Petróleos, a mis hermanos salvador, Cristian, José Hermogenes, Edilberto, Zenaida, Edilma que con su apoyo siempre me animaron cuando pensaba desistir de esto y dedicarme a otras cosas.

A mi tío Diosde González por permitirme compartir sus enseñanzas y por apoyarme durante el transcurso de mi carrera. También a mis tíos Temilda y Chucho quienes son testigos de cuando empecé esta meta y siempre estuvieron ahí. Moisés González un tío que apreció con el mismo cariño y respeto como él lo ha hecho con mi padre.

A mi abuelo Isidro que gracias a la voluntad de Dios le ha permitido vivir 100 años para ver su nieto graduado de Ingeniero, muy agradecido por cada uno de sus consejos e historias.

A mis prim@s José Alexander, Armando, Porfidio, Carlos Fabián, Andrey, Heyner, Doralba y don Hernando, Flor y Avelino, Edilsa, Andrea, Alexandra, Nidia, Milena y Jeisson, Juancho, Luis Ovidio. Gracias por su compañía y los buenos momentos.

A mis amigos que siempre estuve rodeado de buenas personas, compa Alejo Aguilera, Jonathan Niño, John Estupiñan, Jordán Rincón (mi socito), Carlos Andrés (metra), Silvia Ruiz, Edna Jaramillo, Vanessa Cruz, Nicolás Díaz, Katherine Luna, Jeisson Blanco, Angélica Barrera, Angie Novoa, Andrea Carrillo, Cristian Cortes, Steven Téllez. Gracias por su apoyo el día de la sustentación.

José Efraín González González

AGRADECIMIENTOS

Queremos ofrecer nuestros agradecimientos a las orientaciones y apoyo constante durante la ejecución de este proyecto a nuestro director Cesar Augusto Pineda Gómez. Al codirector Alexander Beltrán y el equipo del laboratorio de lodos y cementos Mario y Laura que nos facilitaron los medios para realizar las pruebas.

También al ingeniero Jair Camacho quien fue la persona que nos facilitó los materiales y su apoyo durante el transcurso del proyecto, a la Doctora Patricia Escobar, Laura Fernanda Neira y el equipo del CINTROP quienes se interesaron desde el primer día por nuestro proyecto y nos facilitaron la prueba citotóxica con la cual quedó abierta la ventana de asuntos ambientales particularmente los estudios de toxicidad a fluidos de perforación, los cuales son una excelente herramienta para promover la conciencia ambiental desde la Universidad Industrial de Santander cada vez que se lleven pruebas con materiales nuevos.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	21
1. FLUIDOS DE PERFORACIÓN	24
1.2 TIPOS DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN.....	27
1.2.1 Lodos base agua	27
1.2.2 Lodos aireados de perforación.....	28
1.2.2.1 Perforación con aire	29
1.2.2.2 Perforación con espuma	29
1.3 FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASE ACEITE	30
1.3.1 Emulsiones inversas.	30
1.3.1.1 Aplicaciones específicas	30
1.3.1.2 Formulación típica de una emulsión inversa	31
1.3.2 Principales tipos de sistemas lodos base aceite	35
1.3.3 Fluidos 100% aceite.....	37
1.3.4 Aceites Minerales.....	38
1.3.4.1 Ficha Técnica Aceite Mineral Grado Técnico.....	39
1.3.5 Ventajas y desventajas de los (OBM) respecto a los base agua.	40
1.3.6 Mantenimiento de las propiedades de los fluidos base aceite	43
1.3.6.1 Densidad.....	43
1.3.6.2 Viscosidad embudo.....	43
1.3.6.3 Reología.....	43
1.3.6.4 Filtrado.....	43
1.3.6.5 Estabilidad eléctrica (EE).....	44
1.3.6.6 Calidad de la emulsión según la EE.	44
1.3.6.7 Rangos de valores de EE.	44
1.3.6.8 Porcentaje de sólidos.....	45
1.3.6.9 Observaciones visuales.	45
1.3.7 Problemas comunes	46

2. PRUEBAS DEL LODO BASE ACEITE (INCLUYENDO LOS FLUIDOS BASE ACEITE DIESEL, BASE ACEITE MINERAL Y BASE SINTÉTICO).....	48
2.1 PRUEBAS DE LABORATORIO	48
2.1.1 Determinación del punto de anilina	48
2.1.2 Densidad (peso del lodo)	49
2.1.3 Viscosidad y esfuerzo de gel	51
2.1.4 Filtración (prueba de alta temperatura, alta presión)	53
2.1.5 Estabilidad eléctrica	58
2.1.6 Líquido Y Sólidos	60
2.1.7 Análisis químico de los lodos de perforación base aceite	63
2.2 IMPACTO DEL FLUIDO BASE ACEITE SOBRE EL MEDIO AMBIENTE	71
2.2.1 Pruebas de Toxicidad o Bioensayos	71
2.2.1.1 Tipos de bioensayos	73
2.2.1.2 Criterios para la selección de pruebas biológicas en laboratorio para la evaluación toxicológica de sustancias químicas.	75
3. FORMULACIÓN DE LODOS EMULSIÓN INVERSA EMPLEANDO ACEITE MINERAL BLANCO GRADO TECNICO	76
3.1 ESTUDIOS PRELIMINARES	77
3.1.1 Caracterización de una muestra de aceite mineral grado técnico.....	77
3.1.2 Reología del aceite mineral a varias temperaturas	79
3.1.3 Ejecución pruebas de compatibilidad entre el aceite mineral grado técnico y los aditivos utilizados en lodos de perforación base inversa.....	83
3.1.4 Estabilidad de la emulsión aceite mineral grado técnico con agua en diferentes proporciones	87
3.2 PREPARACIÓN DE LAS FORMULACIONES Y REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS.....	93
3.2.1 Formulaciones con diesel y aceite mineral	93
3.2.2 Pruebas de Laboratorio.....	94
3.2.2.2 Densidad.....	96
3.2.2.3 Filtrado API	96
4. ENSAYO DE TOXICIDAD.....	137

4.1 DISEÑO EXPERIMENTAL.....	138
4.1.1 Obtención y conservación de las semillas	139
4.1.2 Preparación de las diluciones	140
4.2 REALIZACIÓN DE PRUEBAS TOXICOLÓGICAS	141
4.2.1 Pruebas de sensibilidad	141
4.2.2 Montaje y preparación de la batería de ensayo	142
4.2.3 Adición de las diluciones.....	143
4.2.4 Siembra de semillas.....	143
4.2.5 Medición.....	145
4.3 CONTROL DE CALIDAD DE LAS PRUEBAS TOXICOLÓGICAS.....	146
4.4 EXPRESIÓN DE RESULTADOS.....	146
4.4.1 Método gráfico	146
4.4.2 Análisis Spearman – Karber	147
4.4.3 Muestra y análisis de resultados.....	147
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	156
5.1 FORMULACIONES LLEVADAS A CABO EN ESTE ESTUDIO.....	156
5.1.1 Formulación filtrado firme (80/20 y 60/40).....	156
5.1.2 Formulación filtrado relajado (80/20)	162
5.1.3 Formulación alto contenido de agua (40/60).....	166
5.1.4 Formulación 100% aceite.....	171
5.2 RESULTADOS COMPARADOS CON OTROS TRABAJOS REALIZADOS EN LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.....	175
5.2.1 Comparación frente al Estudio de la factibilidad del uso de la glicerina como fase continua en fluidos de perforación de emulsión inversa.....	175
5.2.2 Comparación frente al Estudio de la factibilidad del uso del biodiesel como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa.	175
5.2.3 Comparación frente a la Estudio de Factibilidad y Económica del uso del biodiesel de soya como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa.	176
CONCLUSIONES	177
RECOMENDACIONES.....	179

SÍNTESIS BIBLIOGRÁFICA	180
ANEXOS	183

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Principales tipos de sistemas de lo base aceite	35
Tabla 2. Ficha técnica aceite mineral grado técnico	39
Tabla 3. Ventajas y desventajas de los (OBM) respecto a los base agua	41
Tabla 4. Problemas comunes que presentan los fluidos base aceite	46
Tabla 5. Alturas libres recomendadas	55
Tabla 6. Contrapresiones recomendadas para distintas temperaturas	55
Tabla 7. Tipos de bioensayos	73
Tabla 8. Criterios para la selección de pruebas biológicas en laboratorio para la evaluación toxicológica de sustancias químicas	75
Tabla 9. Rango de propiedades y los valores del aceite mineral	78
Tabla 10. Reología aceite mineral a varias temperaturas.	80
Tabla 11. Valores de n y de k para el aceite mineral a varias temperaturas	81
Tabla 12. Resultados prueba de compatibilidad	86
Tabla 13. Lecturas de la prueba de miscibilidad de la mezcla aceite mineral blanco grado técnico/agua 75/25.	88
Tabla 14. Lecturas de la prueba de miscibilidad de la mezcla aceite mineral blanco grado técnico/agua 50/50.	89
Tabla 15. Lecturas de la prueba de miscibilidad de la mezcla aceite mineral blanco grado técnico/agua 25/75.	90
Tabla 16. Formulaciones Base Mineral y Diesel	94
Tabla 17. Resultados de las pruebas con Diesel	97
Tabla 18. Resultados de las pruebas con Aceite mineral	98
Tabla 19. Reología formulación emulsión firme 80/20	99
Tabla 20. Propiedades reológicas formulación emulsión firme 80/20	100
Tabla 21. Valores de n y k formulación emulsión firme 80/20 aceite mineral	104
Tabla 22. Valores de n y k formulación emulsión firme 80/20 aceite Diesel.	105

Tabla 23. Reología formulación firme 60/40	107
Tabla 24. Propiedades reológicas formulación emulsión firme 60/40.	108
Tabla 25. Valores de n y k formulación emulsión firme 60/40 aceite mineral	112
Tabla 26. Valores de n y k formulación emulsión firme 60/40 aceite Diesel.	112
Tabla 27. Reología formulación filtrado relajado 80/20.	113
Tabla 28. Propiedades reológicas formulación filtrado relajado 80/20	114
Tabla 29. Valores de n y k formulación filtrado relajado 80/20 aceite mineral	118
Tabla 30. Valores de n y k formulación filtrado relajado 80/20 aceite Diesel.	119
Tabla 31. Reología formulación alto contenido de agua 40/60.	121
Tabla 32. Propiedades reológicas formulación alto contenido de agua 40/60.	122
Tabla 33. Valores de n y k formulación alto contenido de agua 40/60 aceite Mineral	127
Tabla 34. Valores de n y k formulación alto contenido de agua 40/60 aceite Diesel.	127
Tabla 35. Reología formulación 100% aceite.	129
Tabla 36. Propiedades reológicas formulación 100% aceite.	130
Tabla 37. Valores de n y k formulación 100% aceite Mineral.	134
Tabla 38. Valores de n y k formulación 100% aceite Diesel.	135
Tabla 39. Registró de datos diluciones de lodo (base mineral y base diesel) y agua.	145
Tabla 40. Resultados de germinación obtenidos bioensayo replica uno aceite Diesel.	148
Tabla 41. Resultados de germinación obtenidos bioensayo replica uno aceite Mineral.	149
Tabla 42. Resultados de germinación obtenidos bioensayo replica dos aceite Diesel.	150
Tabla 43. Resultados de germinación obtenidos bioensayo replica dos aceite Mineral.	151
Tabla 44. Resultados de germinación obtenidos bioensayo replica tres aceite Diesel.	152

Tabla 45. Resultados de germinación obtenidos bioensayo replica tres aceite Mineral.	153
Tabla 46. Reporte de resultados aceite mineral intervalo de CL50 por el método no paramétrico	154
Tabla 47. Reporte de resultados aceite diesel intervalo de CL50 por el método no paramétrico.	154

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Reograma del aceite mineral a varias temperaturas	83
Gráfica 2. Velocidad De Corte (1/seg) vs Viscosidad Efectiva (Cp)	101
Gráfica 3. Velocidad De Corte (1/seg) vs Esfuerzo De Corte (lb/100ft ²)	102
Gráfica 4. Velocidad de corte (seg ⁻¹) vs esfuerzo de corte (lb/100ft ²) y viscosidad efectiva (Cp)	102
Gráfica 5. Tiempo (segundos) vs Esfuerzo de gel (lb/100ft ²)	103
Gráfica 6. Velocidad De Corte (seg ⁻¹) vs Viscosidad Efectiva (Cp)	109
Gráfica 7. Velocidad De Corte (seg ⁻¹) vs Esfuerzo De Corte (lb/100ft ²)	110
Gráfica 8. Velocidad De Corte (seg ⁻¹) vs Esfuerzo De Corte (lb/100ft ²) y Viscosidad Efectiva (Cp)	110
Gráfica 9. Tiempo (segundos) vs Esfuerzo de gel (lb/100ft ²)	111
Gráfica 10. Velocidad De Corte (seg ⁻¹) vs Viscosidad Efectiva (Cp)	115
Gráfica 11. Velocidad De Corte (seg ⁻¹) vs Esfuerzo De Corte (lb/100ft ²)	116
Gráfica 12. Velocidad De Corte (seg ⁻¹) vs Esfuerzo De Corte (lb/100ft ²) y Viscosidad Efectiva (Cp)	116
Gráfica 13. Tiempo (segundos) vs Esfuerzo de gel (lb/100ft ²)	117
Gráfica 14. Velocidad De Corte (seg ⁻¹) vs Viscosidad Efectiva (Cp)	124
Gráfica 15. Velocidad De Corte (seg ⁻¹) vs Esfuerzo De Corte (lb/100ft ²)	124
Gráfica 16. Velocidad De Corte (seg ⁻¹) vs Esfuerzo De Corte (lb/100ft ²) Y Viscosidad Efectiva (Cp)	125
Gráfica 17. Tiempo (segundos) vs Esfuerzo de gel (lb/100ft ²)	126
Gráfica 18. Velocidad De Corte (seg ⁻¹) vs Viscosidad Efectiva (Cp)	131
Gráfica 19. Velocidad De Corte (seg ⁻¹) vs Esfuerzo De Corte (lb/100ft ²)	132
Gráfica 20. Velocidad De Corte (seg ⁻¹) vs Esfuerzo De Corte (lb/100ft ²) y Viscosidad Efectiva (Cp)	132
Gráfica 21. Tiempo (segundos) vs Esfuerzo de gel (lb/100ft ²)	133

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Informe citotoxicidad de formulaciones a base de aceite mineral y diesel en células vero (Tesis – Ing. Petróleos) por Patricia Escobar, PhD; Laura Fernanda Neira, Bact.	183

RESUMEN

TITULO: FACTIBILIDAD DEL USO DE ACEITE MINERAL BLANCO GRADO TECNICO COMO FASE CONTINUA EN LODOS DE PERFORACIÓN*

**AUTORES: JOSÉ EFRAÍN GONZÁLEZ GONZÁLEZ
GABRIEL MATTA ARIZA****

PALABRAS CLAVES: Lodos, fluidos, Emulsión inversa, Factibilidad Técnica, Aceite Mineral

Actualmente la industria petrolera emplea los fluidos de perforación base aceite en áreas donde otros fluidos como los base agua no garantizan el desarrollo de las operaciones, zonas que van desde arcillas hinchables, altas temperaturas y altas presiones. Principalmente estos fluidos están formulados a partir de Diesel un aceite que a pesar de sus buenas características técnicas tiene deficiencias en la parte ambiental y de seguridad en el taladro, las cuales la industria ha adoptado en sus procesos de toma de decisiones, lo cual es una razón que da lugar a proponer en este estudio la factibilidad de un nuevo aceite "Mineral Blanco Grado Técnico" para la formulación de lodos emulsión inversa, gracias a su alto punto de inflamación y su leve contenido de aromáticos lo convierte en un posible candidato sustituto del diesel.

Este estudio está basado en la búsqueda de una formulación óptima que tenga resultados similares a los obtenidos a partir de un fluido de referencia el cual esta formulado con diesel de bajo contenido de aromáticos y de uso común en la formulación de lodos base aceite. Para lo cual se han traído a relación cuatro escenarios o tipos de sistemas de lodo, emulsión firme, filtrado relajado, alto contenido de agua y 100% aceite, con cada uno de estos sistemas se formularon dos fluidos, empleando diesel como referencia y aceite mineral teniendo en cuenta para ambos casos las concentraciones de aditivos químicos que recomienda los fabricantes para cada tipo de sistemas traído a relación.

A pesar de los resultados obtenidos el aceite mineral blanco grado técnico se comporta de manera casi inversa al fluido de referencia y no muestra buenas propiedades, se abre un buen antecedente que sirve como referencia para continuar indagando ya sea con aceites del mercado o en la fabricación de los mismos.

* Trabajo de Grado

** Escuela de Ingeniería de Petróleos, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Director: Esp. César Augusto Pineda Gómez

ABSTRACT

TITLE: FACTIBILITY OF USING OF GRADE TECHNICAL WHITE MINERAL OIL AS THE CONTINUOUS PHASE IN DRILLING MUDS*

**AUTHORS: JOSÉ EFRAÍN GONZÁLEZ GONZÁLEZ
GABRIEL MATTA ARIZA****

KEY WORDS. Muds, Fluids, Inverse Emulsion, Technical Feasibility, Mineral Oil.

Currently the oil industry uses the oil-based drilling fluids in areas where other fluids such as water base do not warrant the development of operations, regions ranging from swelling clays, high temperatures and high pressures. Manly these fluids are formulated of Diesel, oil that despite their good technical characteristics has deficiencies in environmental and safety part, which the industry has adopted in its decision-making processes, which is one reason given place to propose in this study the feasibility of a new oil "Grade technical white mineral" for the formulation of invert emulsion muds, thanks to its high flash point and slight aromatic content makes it a possible candidate as a substitute for Diesel.

This study is based on finding an optimal formulation having similar results to those obtained from a reference fluid which is formulated with a diesel low aromatic content and commonly used in the formulation of oil-based muds. For this reason we have brought relation four stages or types of mud systems, firm emulsion, relaxed emulsion, high water content and 100% oil, with each of these systems two fluids were formulated, using like reference Diesel and mineral oil given for both concentrations of additives manufacturers recommended for each type of system brought relation.

Although the results show that the technical grade white mineral oil behaves almost inversely with reference fluid and it doesn't show good properties, a good background is open serving as the reference point to continue investigating either oil on the market or in the manufacture thereof.

* Work Degree

** School of Petroleum Engineering, Faculty of Engineering Physicochemical. Directed by Augusto César Pineda Gomez Eng.

INTRODUCCIÓN

Los fluidos de perforación base aceite (OBM por sus siglas en inglés “Oil Based Mud”) son empleados en ambientes de perforación donde no es posible emplear lodos base agua; se han desarrollado progresivamente para permitir a los operadores enfrentar ambientes de perforación cada vez más complejos y extremos: alta temperatura, alta presión, incompatibilidad con formaciones y medios corrosivos. Los OBM emplean principalmente diesel como fase continua con muy buenos resultados operacionales pero con relativas implicaciones sobre la salud, la seguridad y el medio ambiente.

Durante la última década las compañías tanto operadoras como de servicios han reevaluado las implicaciones ambientales de sus operaciones como una de las variables más relevantes para su crecimiento comercial y técnico. En el contexto de la perforación de pozos, se estudian nuevas alternativas para mejorar la calidad ambiental de los materiales utilizados en los lodos, hacia comportamientos menos tóxicos, más biodegradables y operacionalmente seguros, por lo que es de vital importancia que todo estudio de factibilidad vaya acompañado por una o varias pruebas de toxicidad, las cuales sirvan como indicativo sobre el impacto de un fluido de perforación formulado a partir de nuevos materiales cuando este es expuesto a una población de organismos, razón por la cual durante el desarrollo del proyecto se dedicó un capítulo para el tema ensayos de toxicidad.

El objetivo fundamental de este trabajo es estudiar la factibilidad técnica del uso de aceites minerales disponibles en el mercado en la formulación de lodos de perforación, analizar su comportamiento reológico, de filtrado tomando como referencia otros fluidos evaluados en investigaciones previas para el mismo fin como diesel, biodiesel, aceite de palma, glicerina y biodiesel de soya.

Posteriormente y a través de pruebas toxicológicas determinar un dato comparativo que permita percibir las ventajas sobre el impacto al medio ambiente, cuanto se utiliza un fluido Aceite Mineral Blanco Grado Técnico en la formulación de lodos base aceite.

El libro está contemplado en 5 capítulos el primero empieza haciendo una descripción de las funciones de los fluidos de perforación, seguida por una clasificación de los tipos de sistemas base inversa con sus aspectos más relevantes acerca de los ambientes donde estos son recomendados, también contempla las ventajas y desventajas de los fluidos base aceite respecto a los fluidos base agua, los problemas más comunes y lo correspondiente a información técnica acerca del aceite mineral blanco grado técnico.

El capítulo dos describe los protocolos más comunes para llevar a cabo las pruebas de laboratorio a las formulaciones traídas a relación durante este estudio, también los diferentes tipos de pruebas toxicológicas como los bioensayos los cuales son una herramienta efectiva para describir el impacto de un material sobre una población de organismos puestos en contacto, para el caso semillas de lechuga.

El capítulo tres describe los resultados de las pruebas de laboratorio empleando aceite mineral blanco grado técnico en la formulación de lodos base inversa, para lo cual se ha traído a relación 4 sistemas de lodo diferentes con sus respectivos datos obtenidos después del desarrollo de las pruebas. Anteriormente a esto se muestran los estudios preliminares que van desde estudios de compatibilidad, estabilidad de la emulsión aceite mineral agua, reología del aceite mineral a varias temperaturas.

El capítulo cuatro es una recopilación del protocolo llevado a cabo para la prueba de toxicidad mediante bioensayos con lo cual se buscó obtener la concentración

letal que causa una mortalidad del 50% de los organismos expuestos con la sustancia (CL_{50}) para el caso la concentración que causó la inhibición de las semillas de lechuga variedad Simpson.

El capítulo cinco muestra el análisis de resultados para cada uno de los cuatro sistemas de lodos emulsión filtrado firme, filtrado relajado, alto contenido de agua y 100% aceite, se presenta el análisis a cada una de las propiedades examinadas durante las pruebas de laboratorio como lo son la reología, filtrado API, análisis de la retorta, densidad, y esfuerzos de gel. Finalmente se compara con resultados de estudios similares llevados a cabo en la Universidad Industrial de Santander.

1. FLUIDOS DE PERFORACIÓN

El fluido de perforación o lodo como comúnmente se le llama, puede ser cualquier sustancia o mezcla de sustancias con características físicas y químicas apropiadas, puede tener como fase continua aire o gas, agua, petróleo o combinaciones de agua y aceite. Los fluidos de perforación cumplen varias funciones dentro del proceso de perforación que garantizan la seguridad, rapidez y optimización del desarrollo de la operación.¹

El fluido no debe ser tóxico, corrosivo, ni inflamable, pero sí inerte a las contaminaciones de sales solubles o minerales y estable a las altas temperaturas. Además, debe mantener sus propiedades según las exigencias de las operaciones, debe ser inmune al desarrollo de bacterias.

1.1 Funciones de un lodo de perforación.

El propósito fundamental del fluido de perforación es ayudar a hacer rápida y segura la perforación del pozo, mediante el cumplimiento de las siguientes funciones:²

- Capacidad de transporte

La densidad, viscosidad y el punto cedente son las propiedades del fluido que, junto a la velocidad de circulación o velocidad anular, hacen posible la remoción y el transporte del ripio desde el fondo del hueco hasta la superficie.

[1,2] Centro Internacional de Educación y Desarrollo (CIED), Fluidos de perforación, Primera versión, agosto, 2002

- Enfriar y lubricar

El fluido de perforación facilita el enfriamiento de la mecha al expulsar durante la circulación el calor generado por la fricción mecánica entre la mecha y la formación. En cierto grado, por sí mismo, el fluido actúa como lubricante y esta característica puede incrementarse con aceite o cualquier producto químico elaborado para tal fin.

- Formar revoque

Para minimizar los problemas de derrumbe y atascamiento de tubería en formaciones permeables, es necesario cubrir la pared del hueco con un revoque liso, delgado, flexible, de baja permeabilidad y altamente compresible. El revoque se logra incrementando la concentración y dispersión de los sólidos arcillosos.

- Controlar la presión de la formación

El fluido de perforación ejerce una presión hidrostática en función de la densidad y altura vertical del pozo, la cual debe controlar la presión de la formación, evitando un influjo hacia el pozo. Esta presión no depende de la geometría del hueco.

- Capacidad de suspensión

La resistencia o fuerza de gel es la propiedad reológica del fluido que permite mantener en suspensión las partículas sólidas cuando se interrumpe la circulación. Esta propiedad retarda la caída de los sólidos, pero no la evita.

- Flotabilidad

La sarta de perforación y la tubería de revestimiento pierden peso cuando se introducen en el hueco, debido al factor de flotación, el cual depende de la densidad o peso del fluido. En consecuencia, para calcular el peso de la sarta en el fluido, se multiplica su peso en el aire por el factor de flotación.

- Estabilidad

La estabilidad de las formaciones permeables se logra con peso y revoque de calidad, y las impermeables con peso, cuando se trata de lutitas presurizadas, y con inhibición o con fluido cien por ciento aceite, cuando se trata de Lutitas reactivas.

- Evaluación

El fluido debe tener una alta calidad para facilitar la toma de núcleos y la evaluación de las formaciones perforadas, sobre todo cuando se trata de la zona productora.

- Hidráulica

El fluido es el medio por el cual se transmite la potencia desde la superficie hasta el fondo del pozo. El programa hidráulico, trata de obtener la máxima caída de presión en la mecha para seleccionar los valores óptimos de caudal y chorros, que faciliten una limpieza efectiva del fondo del hueco y del espacio anular.

- Minimizar el impacto sobre el medio ambiente

Los fluidos a base de agua, a base de petróleo, anhidros y sintéticos están sujetos a diferentes consideraciones ambientales y no existe ningún conjunto único de características ambientales que sea aceptable para todas las ubicaciones. Esto se debe principalmente a las condiciones complejas y cambiantes que existen por todo el mundo – la ubicación y densidad de las poblaciones humanas, la situación geográfica local (costa afuera o en tierra), altos o bajos niveles de precipitación, la proximidad del sitio de eliminación respecto a las fuentes de agua superficiales y subterráneas, la fauna y flora local, y otras condiciones.³

1.2 TIPOS DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Básicamente existen tres tipos de fluidos de perforación: lodos base agua, base aceite y aireados. A continuación se hace una breve descripción de lodos base agua y aireados teniendo en cuenta que el tema principal de este trabajo son lodos base aceite.

1.2.1 Lodos base agua

Frecuentemente se usa agua para hacer el lodo. El agua conforma la parte o fase líquida del lodo. La cuadrilla le adiciona arcillas y otros aditivos especiales al agua para crear el lodo con las propiedades requeridas para llevar a cabo un buen trabajo. Por ejemplo, las arcillas le dan grosor o viscosidad. El agua usada puede ser dulce, agua de mar o salmuera.

[3] Energy API, Manual Fluidos de Perforación, Revisión febrero 2001.

El tipo de agua a usar depende de su disponibilidad y de las propiedades que debe tener el lodo para perforar el hueco eficientemente. Un lodo se considera de agua salada cuando contiene más de 10,000 ppm de sal y no ha sido convertido a otro tipo de lodo, estos se clasifican de acuerdo a la cantidad de sal presente y/o a la fuente de agua de constitución.

De acuerdo a la cantidad de sal se clasifican en:

- Lodos saturados de sal (315,000 ppm de sal o más).
- Lodos salados (más de 10,000 ppm de sal, pero no saturados).

Estos lodos pueden ser preparados para cumplir operaciones específicas como la perforación de una beta de sal o de un acuífero o como lodo inhibido para la perforación de arcillas hinchables, o ser el resultado de la sal que exista en un agua de constitución (donde no se tenga disponibilidad de agua dulce).

1.2.2 Lodos aireados de perforación

Tienen como fase continua o externa un gas, a los cuales se les agrega poca cantidad de agua para formar fluidos denominados neblinas, o una cantidad mayor para formar espumas. El agua puede provenir bien sea de una mezcla predeterminada en superficie o de aquella presente en la formación. Para lograr estos fluidos se deben adicionar agentes surfactantes o espumantes, respectivamente.

1.2.2.1 Perforación con aire

Algunas veces el fluido de perforación es aire seco o gas natural. Cuando se perfora con aire, se usan compresores en lugar de bombas de lodo. Al perforar con aire o gas se previene el daño de formación y se evitan problemas graves por pérdidas de circulación, además el aire o gas hace que la broca perfora muy rápido. Las condiciones de fondo de pozo deben ser las adecuadas para poder usar aire o gas. Por ejemplo, la broca no puede perforar fluidos de formación que contengan grandes cantidades de agua. El agua se mezcla con los cortes y el aire o gas, taponando el pozo.

En algunos casos el operador del taladro puede usar lodo aireado, el cual al igual que la perforación con espuma, ayuda a prevenir derrumbes y taponamientos en el pozo. La perforación aireada usa lodo y aire, bombeándolos dentro del stand pipe al mismo tiempo. Presenta menos presión hidráulica y tendencia a fracturar formaciones débiles. Reduce pérdidas de circulación en áreas muy porosas y con bajo gradiente de fracturas. Peso de 4 a 6 lb/gal. Permite alcanzar altas tasas de perforación.

1.2.2.2 Perforación con espuma

Es una combinación agua o polímetro/bentonita mezclada con un agente espumante y aire de un compresor para formar las burbujas. Cuando en la formación que se está perforando hay presentes pequeñas cantidades de agua, un equipo especial puede inyectar la espuma dentro del flujo de aire. La espuma ayuda a separar los cortes y remueve el agua del pozo.⁴

[4] Linares Rosbely, Tarrifa Marilin, Naranjo Andry, Quintero Leonardo, García Oscar, Clasificación de los fluidos de perforación, Universidad de Zulia enero de 2013

1.3 FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASE ACEITE

Los fluidos de perforación base aceite (OBM POR SUS SIGLAS EN INGLES) son aquellos cuya fase continua, al igual que el filtrado, es puro aceite. Pueden ser de tipo de emulsión inversa o cien por ciento aceite.

1.3.1 Emulsiones inversas. Las emulsiones inversas son mezclas en las cuales la fase continua es el aceite y la fase dispersa es el agua, se utilizan generalmente para perforar formaciones sensibles al agua aplicando el principio de actividad balanceada. Es una mezcla de agua en aceite a la cual se le agrega cierta concentración de sal para lograr un equilibrio de actividad entre el fluido y la formación.

El agua no se disuelve o mezcla con el aceite, sino que permanece suspendida, actuando cada gota como una partícula sólida. En una buena emulsión no debe haber tendencia de separación de fases y su estabilidad se logra por medio de emulsificantes y agentes adecuados. Estas emulsiones trabajan con una relación aceite/agua que varía por lo general entre 60:40 y 90:10, dependiendo de la densidad requerida.

1.3.1.1 Aplicaciones específicas

Las emulsiones inversas son utilizadas para:

- Perforar lutitas problemáticas utilizando el concepto de actividad balanceada.
- Prevenir pérdidas de circulación en formaciones con bajo gradiente de presión.
- Perforar pozos con alto gradiente de temperatura.
- Perforar huecos direccionales.

- Perforar formaciones de gases ácidos.
- Perforar formaciones de anhidrita o de yeso.
- Prevenir atascamiento de tubería.
- Minimizar problemas de torque y arrastre.

1.3.1.2 Formulación típica de una emulsión inversa

En la formulación de las emulsiones inversas se utilizan diversos aditivos químicos, cada uno de los cuales cumple con una función específica. Estos aditivos deben ser agregados de acuerdo al siguiente orden:

- ✓ Aceite.
- ✓ Emulsificante.
- ✓ Cal.
- ✓ Humectante.
- ✓ Agua.
- ✓ Arcilla Organofílica.
- ✓ Sal.
- ✓ Material densificante.

Nota: El uso del agente de control de filtrado es opcional y en caso de ser necesario debe agregarse después del humectante.

- ✓ ACEITE

Las emulsiones inversas pueden ser formuladas utilizando una amplia variedad de aceites que deben tener, entre otras, las siguientes especificaciones:

- Punto de anilina: Este está relacionado con el contenido aromático que contiene el aceite y debe ser mayor de 140°F para reducir el desgaste en las empaaduras de goma, sellos y gomas de tuberías.
- Punto de inflamación: Este debe ser mayor de 180°F para reducir los riesgos de incendio en el taladro.

✓ EMULSIFICANTE

Este producto hace que el agua se emulsione en el aceite formando un sistema estable. Los emulsificantes utilizados en la preparación de los fluidos base aceite son aniónicos y solubles, tanto en agua como en aceite. Estos se activan con cal y se usan por lo general en concentración de 0.6 a 1.7 gal/bbl. El calcio soluble suministrado por la cal, permite la creación de un detergente que emulsiona las gotas de agua en la fase continua. Por ello los jabones de base calcio son emulsificantes primarios que se usan con bastante frecuencia en los fluidos base aceite.

✓ CAL

Tiene como función primaria hacer más efectiva la acción del emulsificante, y como función secundaria actuar como secuestrador de gases agrios (H₂S y CO₂). El contenido de cal para las operaciones rutinarias de perforación debe ser de 3 a 5 lb/bbl, pero como protección contra las posibles arremetidas de H₂S, los límites prácticos y seguros en la gran mayoría de los fluidos base aceite son de 5 a 15 lb/bbl. La contaminación masiva con el H₂S/CO₂ consumirá grandes cantidades de cal y generará pequeñas cantidades de CaS y CaCO₃ como productos sólidos de la reacción.

Por esta razón, cuando se tienen problemas con H₂S y CO₂, se debe mantener una mayor concentración de cal que permita su remoción. Sin embargo, se debe evitar un excedente de cal muy elevado para no incrementar notablemente la viscosidad del fluido, debido a que la cal no disuelta actúa como un sólido más en el sistema. La prueba para determinar el contenido de cal en los fluidos base aceite es similar a la prueba de alcalinidad de los fluidos base agua, pero en éste caso a la muestra se le debe extraer el agua antes de hacer la titulación, la cual resulta moderadamente exacta.

✓ HUMECTANTE

Emulsionante no iónico o ligeramente catiónico que contribuye con la dispersión de los sólidos incorporados y a la vez permite mantenerlos humedecidos con aceite. Los productos químicos humectantes en aceite son las poliamidas, las aminas, los fosfatos orgánicos, los hidrocarburos sulfonatados, etc., y son bastantes efectivos como emulsificadores. Se utilizan generalmente en concentración de 0.1 – 1.0 gal/bbl

✓ AGUA

Esta forma parte de las emulsiones inversas y facilita la solubilidad del cloruro de calcio utilizado para lograr el equilibrio de actividad entre el fluido y la formación. Además el agua ayuda a aumentar la viscosidad y la fuerza de gel. También contribuye al control del filtrado, debido a que se encuentra en pequeñas gotas dispersas y suspendidas en el aceite, actuando cada una de ellas como una partícula sólida. La adición de emulsificadores hace que el agua emulsifique en el aceite, formando un sistema estable. Durante la agitación inicial el agua se separa en pequeñas gotas y se dispersa en aceite. A medida que aumenta la agitación, las gotas se hacen más pequeñas y la emulsión se hace más estable. Entre más

pequeñas sean las gotas de agua mayor será el área superficial y, por consiguiente, el área de contacto aceite/agua.

La emulsión es más estable cuando se adiciona aceite en lugar de agua; debido a que el aceite aumenta la distancia entre las gotas de agua, mientras que el agua la disminuye. A mayor cantidad de agua mayor es la tendencia de que las gotas se unan y coalezcan. Las gotas grandes coalescen más rápido que las pequeñas.

✓ ARCILLA ORGANOFÍLICA

Estas arcillas se utilizan en concentración de 1.0 – 5.0 lb/bbl para incrementar la capacidad de suspensión y limpieza de los fluidos base aceite, al incrementar el punto cedente y la resistencia o fuerza de gel. Estas arcillas necesitan de un activador polar para desarrollar su máximo rendimiento.

Los fluidos base aceite se caracterizan por tener menor capacidad de suspensión en comparación con la de los fluidos base agua, lo cual contribuye a acelerar el asentamiento de la barita, particularmente si esta humedecida por agua.

Entre los principales activadores polares usados por la industria están: agua, metanol, carbonato de propileno y glicerina, siendo el metanol uno de los más utilizados en los fluidos base aceite.

✓ SAL

Las sales inorgánicas tienen la habilidad de desarrollar fuerzas osmóticas de gran magnitud para deshidratar o balancear formaciones sensibles al agua, cuando se perfora con emulsiones inversas. Para desarrollar fuerzas osmóticas en las emulsiones inversas se utilizan sales de cloruro de sodio y calcio. Tanto el cloruro

de sodio como el cloruro de calcio se pueden obtener fácilmente y ninguno de los dos causa efectos notables en la reología del fluido.

✓ MATERIAL DENSIFICANTE

Entre los materiales utilizados para densificar a los fluidos base aceite, se tienen barita y orimatita, para densidades mayores a 13 lb/gal, y carbonato de calcio, principalmente el de origen dolomítico, para densidades menores a 12 lb/gal.

1.3.2 Principales tipos de sistemas lodos base aceite

Los sistemas de lodo base aceite se clasifican en cuatro categorías. La Tabla 1 detalla los usos principales de estos diferentes sistemas.

Sistemas de lodo base aceite: Cada sistema de lodo base aceite fue creado para llenar específicas necesidades de perforación:

Tabla 1. Principales tipos de sistemas de lo base aceite

Sistema	Aplicación
Emulsión firme o apretada	Para uso general y en áreas de temperaturas de hasta 500°F (260°C)
Filtrado relajado	Para proveer más altos índices de perforación
Todo aceite	Para uso como fluido no perjudicial de extracción de núcleos y perforación
Alto contenido de agua	Para reducir la retención de aceite en los recortes; usado principalmente en zonas costa afuera que son ambientalmente sensibles.

Fuente: Manual de fluidos de perforación Baroid

- **Sistema de emulsión firme:** una emulsión inversa es una emulsión de agua, aceite en la que el agua dulce o salda constituye la fase dispersa y el aceite diesel, crudo u otro aceite constituye la fase continua. El agua aumenta la viscosidad y el aceite la reduce.

Los sistemas de emulsión firme ofrecen estabilidad a alta temperatura y tolerancia a los contaminantes. Se aplican principalmente en formaciones con altas temperaturas (hasta 500°F). Estos sistemas usan altas concentraciones de emulsificantes y agentes controladores de pérdida de fluido para dar mayor estabilidad a la emulsión y reducir la pérdida de filtrado. El filtrado HPHT es comúnmente menor de 15 ml y debe ser todo aceite.

- **Sistemas de filtrado relajado:** los sistemas de filtrado relajado no tiene nada o muy bajas concentraciones de emulsificante y agente controlador de filtrado. El aumento de filtrado de estos sistemas provee velocidades más rápidas de perforación. El volumen de la pérdida de fluido HPHT es de 15 @ 20 ml. Estos sistemas son estables a temperaturas hasta 325°F.

- **Sistemas aceite 100%:** formulados solo con aceite en la fase continua, usados con frecuencia como fluidos de corazonamiento. Su alta tolerancia a la contaminación por sal y anhídrita, estabilidad a altas temperaturas, alto poder inhibitorio y estabilizador de arcillolitas y valores altos de lubricidad lo perfilan para ser usados en pozos que presentan estos problemas. Este sistemas no debe usarse donde existan fuentes de agua que puedan ser contaminadas.

- **Sistemas con alto contenido de agua:** los sistemas de alto porcentaje de agua fueron desarrolladas para cumplir ciertas reglamentaciones ambientales con respecto a la cantidad de aceite adherido a los cortes de perforación que se descargan a fuentes de agua como el mar. Estos sistemas que tienen una relación agua aceite 50/50, pueden reducir hasta un 45% el aceite remanente en los

recortes. Los sistemas de alto porcentaje de agua no son recomendados a temperaturas superiores 250°F.

1.3.3 Fluidos 100% aceite

Estos son empleados principalmente para tomar núcleos y perforar formaciones lutíticas sensibles al agua. En la selección de un fluido, sea base agua o aceite, se debe tomar en cuenta algunas consideraciones tales como:

- Costo
- Tiempo de taladro
- Problemas de hueco
- Perfilajes
- Completamiento
- Daño a la formación
- Productividad
- Impacto ambiental

El uso de los fluidos base aceite se justifica principalmente para perforar:

- Formaciones lutíticas sensibles al agua (formaciones reactivas)
- Huecos profundos con altas temperaturas
- Zona productora de gases ácidos (H₂S/CO₂)
- Zonas de bajo gradiente
- Domos de sal
- Pozos direccionales

1.3.4 Aceites Minerales

Los aceites minerales desaromatizados, son utilizados para la formulación de fluidos para la perforación de pozos de petróleo. Son aceites hidrogenados, mediante procesos catalíticos, a altas condiciones de presión y temperatura, por lo que en su composición sólo entran hidrocarburos saturados de mediano y alto peso molecular. Son incoloros e insípidos y poseen un tenue olor, característico de los hidrocarburos saturados.

En vista de la pureza que poseen estos aceites, se les ha clasificado como "Aceites Ambientalmente Amigables", por lo que se les utiliza en pozos donde exista el inminente riesgo de contaminar aguas superficiales y/o subterráneas o la necesidad de disminuir el impacto ambiental en caso de derrames. Adicionalmente, los bioensayos de toxicidad realizados a estos productos indican que los aceites minerales no son tóxicos, calificándolos como de muy bajo riesgo para la salud.

Los resultados de las pruebas de biodegradabilidad los hacen aptos para ser utilizados en operaciones costa afuera, a pesar de que los resultados de las evaluaciones de biodegradabilidad anaeróbicas indican que los aceites minerales se biodegrada parcialmente en el tiempo estipulado en las normas internacionales que regulan las descargas directas de recortes en cuerpos de agua.

Los aceites minerales ofrecen ventajas significativas comparadas con los fluidos en base diesel, entre las cuales se encuentran:

- Evitar daños ambientales sobre suelos, flora y fauna.

- Evitar daños a la salud de los operadores de los taladros.
- Disminuir efectos contaminantes en las fosas del lodo.
- Disminuir los costos en el lavado de ripios.

1.3.4.1 Ficha Técnica Aceite Mineral Grado Técnico

Tabla 2. Ficha técnica aceite mineral grado técnico

TECNICA	ASTM	ESPECIFICACIONES
Aspecto visual	-----	Sin
Color saybolt	D158	+27
Gravedad especifica 60/60 °F	D 1298	0.840/0.870
Punto de fluidez ° C	D 47	-10/3
Punto de chispa COC °C	D 92	150/180
Punto de fuego COC °C	D 92	170/230
Viscosidad 40 °C cst	D 445	15/25
Viscosidad 100 ° C cst	D 445	4/5
Corrosión lámina de cobre	D130	Pasa
Valor neutralización mg KOH	USP NF	Pasa
Prueba de espuma (Mls)	D 892	Pasa
Humedad kart fisher		50 ppm Max

Fuente: *Aceites minerales S.A. Bucaramanga*

Descripción del Producto Los Aceites Minerales Blancos Grado Técnico, son obtenidos de bases lubricantes, de tipo parafínico, provenientes de la refinación del petróleo con un alto contenido de parafinas livianas, las cuales son sometidas a procesos de sulfonación o hidrogenación catalítica, menos exigentes que los empleados para la obtención del aceite mineral blanco grado USP.

Posteriormente, el aceite es sometido a procesos de filtración, mediante el uso de tierras activadas con el fin de remover las trazas de impurezas que puedan darle coloración y obtener un producto terminado con un ligero color, olor característico de derivado refinado del petróleo. El aceite tiene características especiales tales como: estabilidad a la oxidación y baja fluorescencia. ***El Aceite Mineral Blanco Grado Técnico no es apto para el consumo humano.***

Especificaciones Los Aceites Minerales grado Técnico, cumplen con las especificaciones determinadas y aceptadas a nivel internacional por las siguientes instituciones: **FDA** Food and Drug Administration RE 172.878. Sec. Lubricación Equipos, **FAO** Food and Agricultural Organization (FAO – ONU). Sec. Lubricación Equipos, **NF** National Formulary.

1.3.5 Ventajas y desventajas de los (OBM) respecto a los base agua. La tabla 2 muestra las ventajas y desventajas que ofrecen los fluidos base aceite con relación a los fluidos base agua.

Tabla 3. Ventajas y desventajas de los (OBM) respecto a los base agua

Parámetros de comparación	Fluido base aceite	Fluido base agua
Costo de preparación	Mayor	Menor
Costo de mantenimiento	Menor	Mayor
Problemas de torque y arrastre	Menor	Mayor
Contaminación ambiental	Mayor	Menor
Efectos de los contaminantes	Menor	Mayor
Toma de núcleo	Mayor % de recuperación	Menor % de recuperación
Situación de peligro	Mayor	Menor
Viscosidad plástica	Mayor	Menor
Punto cedente	Menor	Mayor
Formaciones reactivas	Mayor estabilidad	Menor estabilidad
ECD	Mayor	Menor
Perforación bajo balance	Se puede perforar con una densidad menor	Hay que perforar con la densidad requerida

Continuación Tabla 3

Parámetros de comparación	Fluido base aceite	Fluido base agua
Problemas de corrosión	Menor	Mayor
Asentamiento de barita	Mayor	Menor
Fuerza del gel	Menor	Mayor
Efecto del agua	Mayor	Menor
Interpretación de registros	Mas difícil	Más difícil
Desplazamiento	Más complicado	Menos complicado
Hueco en calibre	Mejor	Peor
Succión y suabeo	Mayor	Menor
Tasa de penetración (ROP)	Menor	Mayor
Probabilidad de pérdida de circulación	Mayor	Menor
Atascamiento de tuberías	Menor	Mayor
Embolamiento de mecha	Menor	Mayor
Detección de arremetidas	Lenta	Rápida

Fuente: Manual de fluidos de perforación Baroid

1.3.6 Mantenimiento de las propiedades de los fluidos base aceite

1.3.6.1 Densidad. Los fluidos base aceite se pueden preparar con densidades que varían de 7.2 a 20 lb/gal. Generalmente se usa barita para aumentar o mantener la densidad del fluido sobre 13 lb/gal y Carbonato de Calcio, especialmente de origen dolomítico, cuando se requieren densidades menores a 12 lb/gal. Para reducir la densidad del fluido se agrega aceite, agua o su combinación en relación correcta.

1.3.6.2 Viscosidad embudo. La viscosidad embudo de un fluido base aceite es alterada en mayor grado por la temperatura que la de un fluido base acuosa, debido a que la temperatura reduce la viscosidad del aceite mucho más rápido que la del agua. En cambio, la presión aumenta la viscosidad del aceite. Las normas API establecen que se debe reportar la temperatura del fluido junto con la viscosidad embudo.

1.3.6.3 Reología. La reología de un fluido base aceite se corre a 120 °F y es básicamente más compleja que la de un fluido base agua, debido a que la presión aumenta la viscosidad del aceite, pero no afecta en forma significativa a la viscosidad del agua. La temperatura reduce la viscosidad del aceite e influye en la solubilidad de algunos componentes del fluido, tales como los asfaltos y emulsificadores. La viscosidad plástica de estos fluidos es ligeramente mayor a la de los fluidos base agua, y se baja con equipos mecánicos de control de sólidos o adicionando aceite. En cambio, el punto cedente y los geles son más bajos y se incrementa con arcilla organofílica.

1.3.6.4 Filtrado. El filtrado de los fluidos base aceite se corre generalmente a 500 psi y 300 °F y es un parámetro indicador de las buenas o malas condiciones del

fluido. La presencia de agua en el filtrado HP-HT indica problemas de separación de fases y la necesidad de adicionar más emulsificantes. Algunas veces se hace necesario agregar tanto un emulsificante como un agente humectante, ya que el agua libre humedece la barita causando su precipitación y, por consiguiente, su sedimentación. El filtrado estándar API de los fluidos base aceite, medido a temperatura ambiente bajo una presión diferencial de 100 psi, debe ser 100% aceite y, por lo general su valor es cero.

1.3.6.5 Estabilidad eléctrica (EE). La estabilidad eléctrica es un indicativo de que tan bien emulsionada se encuentra el agua en el aceite. Esta prueba no indica necesariamente que la emulsión esté en buenas o malas condiciones, pero sí indica la tendencia que tiene la emulsión a mejorar o a empeorar.

1.3.6.6 Calidad de la emulsión según la EE. La calidad de la emulsión se puede evaluar cualitativamente por medio de la prueba de estabilidad eléctrica. Por ejemplo: Una caída repentina en el voltaje indica una posible entrada de agua, la cual es corroborada mediante la prueba de retorta. Si este es el caso, se deberá agregar un emulsificante. Si el voltaje disminuye lentamente puede indicar que la emulsión se está debilitando y que se requiere la adición de más emulsificante. También puede indicar que se ha agregado demasiada cantidad de cloruro de calcio al sistema. En este caso, la actividad del fluido estará alrededor de 0.30. Cuando esto ocurre, se debe adicionar agua para mantener la actividad del fluido por encima de 0.35.

1.3.6.7 Rangos de valores de EE. Generalmente, una estabilidad eléctrica de 400 voltios o más, es aceptable para densidades que estén dentro del rango de 8 a 12 lb/gal. A densidades más altas se requiere más emulsificante y humectante para mantener la barita totalmente humedecida con aceite. A mayor porcentaje de

sólidos, mayor es la separación entre las gotas de agua, por lo tanto, el voltaje a aplicar también deberá ser mayor para lograr un flujo de corriente. La estabilidad eléctrica para los fluidos pesados puede variar de 500 a 2000 voltios.

1.3.6.8 Porcentaje de sólidos. Al igual que en los fluidos base agua, se determina con la prueba de retorta, pero con la diferencia de que el tiempo de destilación para los fluidos base aceite es mayor. Con los resultados obtenidos a partir de esta prueba se puede determinar:

- La relación aceite/agua
- Porcentaje total de los sólidos de baja y alta gravedad.

Nota: Esta prueba no permite conocer en detalle los % v/v de los sólidos de baja gravedad agregados e incorporados, porque a los fluidos base aceite no se les hace la prueba MBT Análisis químicos. En este caso es necesario separar las dos fases con una centrífuga manual (o eléctrica) que opere por lo menos a 1800 rpm para tomar muestra de la fase acuosa.

Nota: Por lo general, el porcentaje de agua en los fluidos base aceite se mantienen en el rango del 1 al 2% v/v.

1.3.6.9 Observaciones visuales. Aunque no sean cuantitativas, las observaciones visuales desde un punto de vista práctico son importantes y deben ser reportadas en el informe de lodo. A través de ella pueden ser detectados problemas con el fluido. Por ejemplo:

- Precipitación de barita: El asentamiento de barita en los tanques es indicativo de bajas fuerzas de gel o de problemas de humectabilidad de la barita por agua.

Este problema se detecta primero en el tanque más caliente o en la taza térmica del viscosímetro de lectura directa. Esta situación requiere el uso de un gelificante o de un humectante de acuerdo al caso.

- Anillos de dispersión. En un fluido base aceite de calidad los anillos de dispersión que se forman sobre la superficie brillante del fluido son agudos y oscuros. En cambio cuando son difusos es indicativo de un problema potencial en cuyo caso el fluido debe ser sometido a análisis para determinar su condición.

1.3.7 Problemas comunes La tabla 3 muestra los problemas más comunes que presentan los fluidos base aceite:

Tabla 4. Problemas comunes que presentan los fluidos base aceite

PROBLEMAS	INDICADOR
Contaminación con agua	Cambio de densidad Cambio de la relación aceite/agua
Alto contenido de solidos	Baja ROP
Rotura de la emulsión	Agua en filtrado Baja estabilidad eléctrica
Separación de aceite	Aceite en la superficie
Asentamiento de la barita	Cambio de densidad Baja reología
Solidos humedecidos en agua	Precipitación de solidos

Continuación Tabla 3

PROBLEMAS	INDICADOR
Baja alcalinidad	Baja estabilidad eléctrica
Perdida de fluido	Disminución del nivel en los tanques
Sales insolubles	Baja estabilidad eléctrica Alta salinidad de la fase agua

Fuente: *Centro Internacional de Educación y Desarrollo (CIED), Fluidos de perforación, Primera versión, agosto, 2002*

2. PRUEBAS DEL LODO BASE ACEITE (INCLUYENDO LOS FLUIDOS BASE ACEITE DIESEL, BASE ACEITE MINERAL Y BASE SINTÉTICO)

2.1 PRUEBAS DE LABORATORIO

2.1.1 Determinación del punto de anilina. Esta prueba determina el punto de anilina de un aceite. Cuando el aceite Diesel era muy usado como aditivo en los lodos, se prefería un número próximo a 150°F. Un número más bajo podía indicar un riesgo de ataque de los compuestos de caucho/elastómero en contacto con el fluido de perforación. La anilina es un producto químico orgánico aromático, y los aceites de naturaleza similar tendrían un punto de anilina bajo (indeseable). El aceite y la anilina fresca (pura) son mezclados en cantidades iguales, y se aumenta la temperatura hasta que ambos sean miscibles y tengan un aspecto claro dentro de un tubo. La temperatura (°F) a la cual esto ocurre se llama el punto de anilina.

A. Equipo

- Reactivo de anilina, pura.
- Tubo de ensayo de vidrio Pyrex.
- Alambre en espiral a través del tapón para agitar.
- Termómetro, 0 a 220°F.
- Fuente de calor.

B. Procedimiento

- i. Dentro del tubo de ensayo limpio y seco, añadir volúmenes iguales de aceite y anilina.
- ii. Colocar el tapón con el agitador y el termómetro dentro del cuello del tubo.
- iii. Agitando, calentar la mezcla hasta que pase de una fase turbia a una fase miscible/clara.
- iv. . Retirar la fuente de calor y continuar hasta que la mezcla se vuelva ligeramente turbia. Leer la temperatura en ese momento y registrarla como punto de anilina.

CUIDADO: La anilina es un producto químico venenoso y se sugiere tomar precauciones extremas al manejarlo. Evitar el contacto entre el producto químico y el cuerpo, las manos, etc., y la ropa. En caso de contacto grave, enjuagar con agua durante aproximadamente 15 minutos, mientras se llama a un médico para obtener instrucciones.

2.1.2 Densidad (peso del Iodo)

A. Equipo

La densidad puede estar expresada en libras por galón (lb/gal), libras por pie cúbico (lb/pie³), g por centímetro cúbico (g/cm³), Gravedad Específica (SG) o gradiente de presión. Se puede usar cualquier instrumento que tenga una precisión suficiente para permitir mediciones con un margen de error de $\pm 0,1$ lb/gal

o $\pm 0,5 \text{ lb/pe}^3$ ($\pm 0,01 \text{ g/cm}^3$). La balanza de lodo es el instrumento que se suele usar. El peso de un vaso de lodo colocado en un extremo del brazo es compensado en el otro extremo por un contrapeso fijo y un caballero que se desplaza libremente a lo largo de una escala graduada. Un nivel de burbuja está montado sobre el brazo. Accesorios pueden ser usados para extender la capacidad de pesada de la balanza.

- Termómetro.

B. Procedimiento

- i. Disponer la base del instrumento de manera que esté prácticamente nivelada.
- ii. Medir y registrar la temperatura del lodo. Llenar el vaso limpio y seco con el lodo a probar; colocar y girar la tapa hasta que esté firmemente asentada. Verificar que parte del lodo sea expulsado a través del agujero de la tapa para liberar el aire o gas aprisionado.
- iii. Lavar con aceite base o limpiar el lodo que está fuera del vaso.
- iv. Colocar el brazo sobre el soporte y equilibrarlo desplazando el caballero a lo largo de la escala graduada. El brazo está equilibrado cuando la burbuja se encuentra en la línea central.
- v. Leer la densidad en el lado del caballero cerca del borde del cuchillo. Realizar las correcciones apropiadas cuando se usa un accesorio para extender la capacidad de pesada.
- vi. Ajustar la densidad a la unidad más próxima en $0,1 \text{ lb/gal}$ o $0,5 \text{ lb/pe}^3$ ($0,01 \text{ g/cm}^3$).

C. Calibración

➤ El instrumento debería ser calibrado frecuentemente con agua dulce. El agua dulce debería producir una indicación de 8,33 lb/gal o 62,3 lb/pe3 (1,0 g/cm³) a 70°F (21°C). De lo contrario, ajustar el tornillo de compensación o la cantidad de granalla de plomo en el recipiente en el extremo del brazo graduado, según las necesidades.

2.1.3 Viscosidad y esfuerzo de gel

A. Procedimiento: viscosidad plástica, punto cedente y viscosidad aparente

- i. Colocar una muestra de lodo dentro de un vaso térmico y sumergir el manguito de rotor exactamente hasta el nivel de la línea trazada. Las medidas deben ser tomadas lo antes posible después de tomar la muestra. Las pruebas deben ser realizadas a una temperatura de 120±2°F (50±1°C) o 150±2°F (65±1°C). (Los operadores pueden exigir pruebas a temperaturas más altas.)
- ii. . Calentar o enfriar la muestra de lodo hasta la temperatura seleccionada. La muestra debería ser sometida a un esfuerzo cortante a 300 RPM, durante el calentamiento o enfriamiento, para obtener una temperatura uniforme de la muestra. Registrar la temperatura de la muestra.
- iii. . Con el manguito girando a 600 RPM, esperar que la indicación del cuadrante llegue a un valor constante (el tiempo requerido depende de las características del lodo). Registrar la indicación del cuadrante para 600 RPM.
- iv. Cambiar la velocidad a 300 RPM y esperar que la indicación del cuadrante se estabilice en un valor constante. Registrar la indicación del cuadrante para 300 RPM.

- v. La Viscosidad Plástica (VP) en centipoise es igual a la indicación a 600 RPM menos la indicación a 300 RPM. El Punto Cedente (PC) en lb/100 pies² es igual a la indicación a 300 RPM menos la viscosidad plástica. Registrar la temperatura de la muestra en °F o °C. La Viscosidad Aparente (VA) en centipoise es igual a la indicación a 600 RPM dividida por 2.

B. Procedimiento: esfuerzo de gel

- i. Colocar la muestra de lodo de la manera indicada anteriormente. Agitar a gran velocidad durante 10 segundos.
- ii. Dejar reposar el lodo durante 10 segundos con el motor apagado. Con el embrague en neutro, girar lenta y paulatinamente el volante en sentido anti horario para producir una indicación positiva del cuadrante. La indicación máxima es el esfuerzo de gel inicial en lb/100 pies². Para instrumentos con una velocidad de 3 RPM, la indicación máxima lograda después de iniciar la rotación a 3 RPM es el esfuerzo de gel inicial. Registrar la temperatura de la muestra en °F o °C.
- iii. Agitar de nuevo el lodo a gran velocidad durante 10 segundos y luego esperar 10 minutos. Repetir la medición de la manera indicada anteriormente y registrar la indicación máxima como esfuerzo de gel a 10 minutos en lb/100 pies². Registrar la temperatura de la muestra en °F o °C.
- iv. En algunos casos, también se puede requerir una medición del esfuerzo de gel a 30 minutos. Para obtener el esfuerzo de gel a 30 minutos, repetir el procedimiento para el esfuerzo de gel a 10 minutos pero dejar reposar el fluido durante 30 minutos.

C. Calibración

La operación del instrumento como viscosímetro de indicación directa depende del mantenimiento de la tensión correcta sobre el resorte y de la velocidad correcta de rotación del manguito. Procedimientos pueden ser obtenidos del fabricante para probar la tensión del resorte y la velocidad. Sin embargo, la fiabilidad del instrumento puede generalmente ser probada de manera más sencilla midiendo un líquido newtoniano de viscosidad conocida (por ej.: líquidos silicónicos, soluciones de azúcar o aceites de petróleo de viscosidades conocidas a las temperaturas especificadas).

2.1.4 Filtración (prueba de alta temperatura, alta presión)

A. Equipo

CUIDADO: Cumplir estrictamente con las recomendaciones del fabricante en lo que se refiere a las limitaciones impuestas sobre el volumen y la presión de la muestra para la temperatura que será utilizada.

Los instrumentos se componen esencialmente de una fuente de presión controlada, una celda diseñada para soportar una presión de trabajo de por lo menos 1.000 psi (70,3 kg/cm²), un sistema para calentar la celda, y un bastidor adecuado para contener la celda y el sistema de calentamiento. Para las pruebas de filtración a temperaturas mayores de 200°F (93,4°C), la celda colectora presurizada debería estar diseñada para soportar una contrapresión de trabajo de por lo menos 500 psi (35,3 kg/cm²), para evitar la vaporización instantánea o la evaporación del filtrado a altas temperaturas. La celda del filtro está equipada con una termocupla o un termómetro, una cubeta del termómetro, empacaduras

resistentes al aceite y un soporte para el medio de filtración. Para temperaturas hasta 350°F (177°C), usar papel filtro (Whatman N° 50 o equivalente). Para temperaturas mayores de 350°F (177°C), usar un disco de Dynalloy para cada prueba. Actualmente API no tiene ningún procedimiento recomendado para temperaturas mayores de 400°F (204°C). Un gas no peligroso como el nitrógeno (preferido) o el dióxido de carbono debería ser usado para la fuente de presión. A temperaturas mayores de 300°F (149°C), sólo se debe usar el nitrógeno.

ADVERTENCIA: *No se debe usar N2O para esta prueba, porque los cartuchos pueden causar la explosión de la celda. API ha emitido advertencias contra este uso.*

Si es posible, para agitar la muestra, usar un mezclador de alta velocidad comprendida entre 11.000 y 17.000 RPM bajo carga, con una sola rueda móvil de superficie ondulada de aproximadamente 1 pulgada (25 mm) de diámetro (por ej.: Multimixer o Hamilton Beach) y un contenedor tal como el vaso mezclador Hamilton Beach N° M 110-D.

OBSERVACIÓN: *¡Cada filtro o filtro reforzado con fibra de vidrio sólo se puede usar UNA VEZ.*

Debido a la expansión del fluido durante el calentamiento, será necesario dejar suficiente espacio dentro de la celda de calentamiento para evitar la sobrepresurización. Alturas libres recomendadas las cuales se muestran en la tabla 4:

Tabla 5. Alturas libres recomendadas

TEMPERATURA °F	ESPACIO VACIO (PULG)
HASTA 300	1
300---400	1.5---2
400—500	2.5----3

Fuente: Energy API. Manual de fluidos de perforación. Fluidos de Perforación 2001.

También es necesario aplicar una presión sobre el receptor de filtrado para evitar la ebullición del filtrado. Las contrapresiones recomendadas para distintas temperaturas son las siguientes (la presión máxima debe ser ajustada para mantener el diferencial apropiado) esto se muestra en la tabla 5:

Tabla 6. Contrapresiones recomendadas para distintas temperaturas

TEMPERATURA °F	PRESIÓN DE FONDO (psi)
HASTA 300	100
300---400	200
400---500	300

Fuente: Energy API. Manual de fluidos de perforación. Fluidos de Perforación 2001.

B. Procedimiento para temperaturas no mayores de 300°F (149°C)

- i. Conectar la envuelta exterior calefactora al voltaje correcto para la unidad antes de realizar la prueba. Colocar el termómetro en la cubeta del termómetro.

Precalentar la envuelta a 10°F encima de la temperatura de prueba seleccionada. Ajustar el termostato para mantener la temperatura deseada.

- ii. Agitar la muestra de lodo durante 5 minutos. Preparar la celda con la muestra de lodo, y luego el papel filtro, evitando llenar la celda a más de 1 pulgada (2,5 cm) de la parte superior del borde a fin de dejar un espacio para la expansión.
- iii. Colocar la celda dentro de la envuelta exterior calefactora con las válvulas superior e inferior cerradas. Transferir el termómetro a la cubeta del termómetro de la celda.
- iv. Colocar la unidad de presión en la válvula superior y bloquearla. Bloquear el receptor de presión inferior sobre la válvula inferior. Aplicar una presión de 200 psi (14,06 kg/cm²) a la unidad de presión superior y una presión de 100 psi (7,03 kg/cm²) a la unidad de presión inferior, manteniendo las válvulas cerradas. Abrir la válvula superior y aplicar una presión de 200 psi (14,06 kg/cm²) al lodo mientras se calienta a la temperatura seleccionada.
- v. Cuando la muestra alcanza la temperatura seleccionada, aumentar la presión de la unidad de presión superior hasta 600 psi (42,18 kg/cm²) y abrir la válvula inferior para iniciar la filtración. Recoger el filtrado durante 30 minutos, manteniendo la temperatura seleccionada dentro de ±5°F. Si la contrapresión excede 100 psi (7,03 kg/cm²) durante la prueba, reducir cuidadosamente la presión extrayendo una porción del filtrado. Registrar el volumen total.
- vi. El volumen de filtrado debería ser corregido para una superficie de filtro de 7,1 pulg.² (45,8 cm²). Si la superficie del filtro es de 3,5 pulg.² (22,6 cm²), doblar el volumen de filtrado y registrar el valor.
- vii. Al final de la prueba, cerrar ambas válvulas. Aflojar el tornillo en T y purgar la presión de ambos reguladores.

CUIDADO: La celda del filtro aún puede contener una presión de aproximadamente 500 psi (35 kg/cm²). Mantener la celda en la posición vertical y enfriarla a la temperatura ambiente antes de desmontarla.

C. Procedimiento para temperaturas entre 300 y 400°F (149 y 204°C)

- i. Conectar la envuelta exterior calefactora al voltaje correcto para la unidad antes de realizar la prueba. Colocar el termómetro en la cubeta del termómetro. Precalentar la envuelta a 10°F encima de la temperatura de prueba seleccionada. Ajustar el termostato para mantener la temperatura deseada.
- ii. Agitar la muestra de lodo durante 10 minutos.
- iii. Preparar la celda con la muestra de lodo agitada, evitando que celda se llene a más de 1 1/2 pulgada (38 mm) de la parte superior del borde a fin de dejar un espacio para la expansión; luego, colocar el medio de filtración apropiado.
- iv. Colocar la celda dentro de la envuelta exterior calefactora con las válvulas superior e inferior cerradas. Transferir el termómetro a la cubeta del termómetro de la celda.
- v. Colocar la unidad de presión en la válvula superior y bloquearla. Bloquear el receptor de presión inferior sobre la válvula inferior. Para realizar la prueba a temperaturas de 300 a 400°F (149 a 204°C), aplicar una presión de 300 psi (21,1 kg/cm²) a ambas unidades de presión con las válvulas cerradas. Abrir la válvula superior y aplicar una presión de 300 psi (21,1 kg/cm²) al lodo durante el calentamiento.

vi. Cuando la temperatura de la muestra alcanza la temperatura de prueba seleccionada, aumentar la presión de la unidad de presión superior hasta 800 psi (56,2 kg/cm²) y abrir la válvula inferior para iniciar la filtración. Captar el filtrado durante 30 minutos, manteniendo la temperatura de prueba dentro de $\pm 5^{\circ}\text{F}$. Mantener la contrapresión inicial durante la prueba; reducir cuidadosamente la presión extrayendo una porción del filtrado. Dejar suficiente tiempo para purgar todo el filtrado del receptor, y registrar el volumen total. El tiempo requerido para calentar la muestra dentro de la celda del filtro no debería exceder una hora.

CUIDADO: Medidas de seguridad adicionales serán requeridas para realizar la prueba a altas temperaturas y altas presiones. Los sistemas de presurización y los receptores de filtrado deberían estar equipados con válvulas de desahogo apropiadas. Las envueltas exteriores calefactoras deberían estar equipadas con un fusible de seguridad para sobrecalentamiento y un dispositivo de cierre termostático. La presión de vapor de la fase líquida de los lodos constituye un factor de diseño que es cada vez más crítico a medida que se aumenta la temperatura de la prueba.

CUIDADO: La celda del filtro aún puede contener una presión de aproximadamente 500 psi (35 kg/cm²). Mantener la celda en la posición vertical y enfriarla a la temperatura ambiente antes de desmontarla.

2.1.5 Estabilidad eléctrica

A. Equipos

- Se usa un medidor de estabilidad eléctrica para medir la estabilidad relativa de una emulsión de agua en aceite. Esta medición es realizada mediante el uso de un par de electrodos de placa separados precisa y permanentemente, sumergidos en

una muestra de fluido. Se usa una fuente de alimentación de corriente continua (CC) para proporcionar un voltaje de corriente alterna (CA) que es aplicado al electrodo según un régimen constante de aumento del voltaje. El voltaje al cual la emulsión se vuelve conductora es indicado por el flujo de corriente entre los electrodos de placa; al completar el circuito, (1) la luz indicadora se encenderá cuando se usa un medidor de cuadrante manual o (2) la indicación numérica se estabilizará cuando se usa un medidor de lectura directa.

- Termómetro.

B. Procedimiento

- i. Colocar en un contenedor una muestra filtrada a través de una malla de malla 12 (Malla del Viscosímetro de Marsh), verificando que el fluido haya sido bien agitado.
- ii. Calentar o enfriar la muestra a $120 \pm 5^{\circ}\text{F}$ ($50 \pm 2^{\circ}\text{C}$). Registrar la temperatura a la cual se tomó la indicación de estabilidad eléctrica.
- iii. Después de verificar la limpieza del electrodo, sumergir el electrodo dentro del lodo. Agitar manualmente la muestra con el electrodo durante aproximadamente 10 segundos. Mantener el electrodo inmóvil y evitar que el electrodo toque los lados o el fondo del contenedor al leer la indicación.
- iv. Dos tipos de medidores de estabilidad están disponibles. El medidor más reciente utiliza una indicación directa automática. El medidor más antiguo de tipo manual requiere que el botón de la fuente de alimentación sea pulsado manualmente y mantenido pulsado durante toda la prueba, al mismo tiempo que se hace girar un cuadrante. NO se debe mover el electrodo durante las mediciones.

- Si se usa el estilo más reciente de medidor de estabilidad eléctrica de lectura directa, pulsar y mantener pulsado el botón hasta que el valor desplegado se estabilice. Registrar el valor desplegado como estabilidad eléctrica (voltios).
- Si se usa el estilo más antiguo de medidor de estabilidad eléctrica de cuadrante manual, pulsar y mantener pulsado el botón rojo; comenzando a partir de una indicación de cero, aumentar el voltaje desplazando el cuadrante en sentido horario, a una velocidad de 100 a 200 voltios por segundo. Seguir aumentando el voltaje hasta que la luz indicadora se encienda. Cuando la luz indicadora se enciende, la rampa de voltaje ha terminado. Cálculo para el estilo más antiguo de medidor de estabilidad eléctrica de cuadrante manual:

$$\textit{Estabilidad eléctrica VOLTIOS} = \textit{indicación del cuadrante} * 2 \quad \text{Ecuación 1}$$

- v. Limpiar la sonda eléctrica y repetir la prueba. Las dos indicaciones no deberían diferir en más de 5%. Si las indicaciones difieren en más de 5%, verificar el medidor y la sonda eléctrica para detectar cualquier falla.
- vi. Registrar el promedio de las dos medidas como estabilidad eléctrica.

2.1.6 Líquido Y Sólidos

A. Equipo

- Se usa una retorta para determinar la cantidad de líquidos y sólidos en el fluido de perforación. El lodo es colocado dentro de un contenedor de acero y calentado hasta que los componentes líquidos se vaporicen. Los vapores son dirigidos a través de un condensador y captados en un cilindro graduado, después de lo cual

se mide el volumen de líquido. Los sólidos, tanto suspendidos como disueltos, son determinados calculando la diferencia. Se puede usar una retorta de 10, 20 ó 50 ml para determinar el contenido de líquidos y sólidos. Para reducir el margen de error asociado con el aire arrastrado, se recomienda usar una retorta de 20 ó 50 ml.

B. Procedimiento

- i. Asegurarse que la retorta, el condensador y el receptor del líquido estén limpios, secos y enfriados después del uso anterior.
- ii. Tomar una muestra de lodo y dejar que se enfríe hasta aproximadamente $75\pm 2^{\circ}\text{F}$ ($24\pm 1,4^{\circ}\text{C}$) o hasta la temperatura ambiente. Filtrar la muestra a través de una malla de malla 12 para eliminar el material de pérdida de circulación y los recortes grandes.
- iii. Si el lodo contiene gas o aire, agitar lentamente de 2 a 3 minutos para eliminar el gas.
- iv. Lubricar las roscas en el vaso de la muestra y el tubo condensador con un ligero revestimiento de Never-Seez (según los procedimientos de API, éste es el único material que debe ser usado). Esto impide la pérdida de vapor a través de las roscas.
- v. Rellenar ligeramente la cámara de la retorta con un anillo de lana de acero, encima del vaso de muestra. La lana de acero líquida NO es aprobada por API.
- vi. Llenar el vaso de muestra de la retorta con lodo base aceite sin gas.

- vii. Colocar la tapa sobre el vaso de muestra y dejar que el lodo se desborde a través del agujero en la tapa. Para obtener un volumen correcto de muestra, parte del lodo debe salir a través del agujero.
- viii. Limpiar el vaso de muestra y la tapa para eliminar el lodo que ha desbordado.
- ix. Colocar un receptor limpio y seco debajo de la descarga del condensador.
- x. Calentar la retorta, continuando durante 10 minutos después de que el condensador deje de descargar condensado.
- xi. Retirar el receptor de líquido de la retorta. Anotar el volumen total de líquido recuperado. Si el líquido contiene sólidos, el lodo entero se ha desbordado y el procedimiento DEBE ser repetido.
- xii. Registrar los volúmenes de aceite y agua en el receptor de líquido después de que se haya enfriado hasta $75\pm 2,5^{\circ}\text{F}$ ($24\pm 1,4^{\circ}\text{C}$) o hasta la temperatura ambiente.
- xiii. A partir de los volúmenes de aceite y agua recuperados y del volumen de la muestra de lodo original, calcular el porcentaje en volumen de aceite, agua y sólidos en el lodo.
- xiv. La retorta retendrá todos los sólidos – tanto suspendidos como disueltos. Para los lodos que contienen considerables cantidades de sales, los cálculos del contenido de sólidos suspendidos serán incorrectos a menos que se efectúen las correcciones para tener en cuenta la sal disuelta.

2.1.7 Análisis químico de los lodos de perforación base aceite

A. Alcalinidad (pom) (vsa•api)

La alcalinidad de un lodo base aceite se determina rompiendo la emulsión y valorando rápidamente la mezcla hasta el primer cambio de color o el punto final. El volumen (ml) de ácido sulfúrico 0,1 N usado en la valoración por ml de lodo constituye la alcalinidad del lodo o POM. Se describirán dos procedimientos de prueba que utilizan diferentes solventes.

El primer procedimiento es una prueba eficaz para un fluido base aceite que utiliza barita o hematita en un sistema de una sal. El segundo procedimiento no es tan eficaz pero es necesario cuando se usa un sistema de dos sales.

I. Equipo y reactivos

- Equipo de valoración (agitador magnético o agitador Hamilton Beach).
- Pipeta de 5 ml.
- Frasco de conservas de 16 oz., vaso de precipitado de 500 ml o equivalente.
- Mezcla de xileno-alcohol isopropílico (IPA) (50:50) o Propasol Propílico.
- Indicador de Fenolftaleína.
- Solución de ácido sulfúrico, 0,1N H₂SO₄.

II. Procedimiento

➤ Al utilizar el Procedimiento de Prueba n^o 1, colocar 100 ml de mezcla de Xileno/IPA o 75 ml de Propasol Propílico dentro del frasco de vidrio. Llenar una jeringa de 5 ml con lodo entero hasta exceder la marca de 3 ml.

- Disipar 2 ml de lodo base aceite dentro del solvente y añadir 200 ml de agua destilada.
- Añadir 15 gotas de fenolftaleína.
- Agitar rápidamente con un agitador magnético, un agitador Hamilton Beach o cualquier agitador equivalente.
- Al agitar, valorar lentamente con H₂SO₄ 0,1N hasta que el color rosa desaparezca. Seguir agitando, y si el color rosa no reaparece dentro de un minuto, dejar de agitar. Puede que sea necesario dejar de agitar y esperar que la mezcla se separe en dos fases para que el color pueda ser observado con más claridad en la fase acuosa.
- Dejar reposar la muestra durante 5 minutos. Si el color rosa no reaparece, el punto final ha sido alcanzado. Si el color rosa reaparece, valorar otra vez con ácido sulfúrico. Si el color rosa reaparece por tercera vez, valorar de nuevo. No se debe valorar después de la tercera vez.

$$Pom = \text{ml de H}_2\text{SO}_4 \text{ 0,1N} * \text{ML DE LODO}$$

Ecuación 2

$$\text{Exceso de cal } \left(\frac{lb}{bbl} \right) = Pom * 1.295$$

Ecuación 3

B. Salinidad – cloruros en el lodo entero.

I. Reactivos

- Indicador de Cromato de Potasio.

- Solución de AgNO₃ 0,282N. La valoración del cloruro es una continuación del procedimiento de medición de la alcalinidad. Añadir 10 a 15 gotas de indicador de cromato de potasio a la muestra cuya alcalinidad acaba de ser probada. Valorar con AgNO₃ 0,282N, agitando hasta que se produzca el primer cambio de color. Éste es el punto final. NO se debe valorar hasta obtener un color “rojo ladrillo”. API requiere que el contenido de sal esté indicado como total de cloruros en la fase de lodo, calculado de la siguiente manera:

$$\text{total cl en el lodo } \frac{\text{mg}}{\text{l}} = \text{ml de AgNO}_3 \text{ 0,282N} * \frac{10000}{\text{ml}} \text{ de lodo} \quad \text{Ecuación 4}$$

El contenido de cloruros también puede ser indicado en otras unidades, según la compañía operadora, la información deseada y el sistema de lodo.

II. Equipo

- Equipo de valoración (agitador magnético con varilla de agitación o agitador mezclador Hamilton Beach).
- Pipeta de 5 ml.
- Frasco de conservas de 6 oz. Con tapa.
- Mezcla de xileno-alcohol isopropílico (IPA) (50:50) o Propasol Propílico.
- Polvo Indicador Calver II.
- Solución amortiguadora de hidróxido de sodio 8N.
- Jeringa de 5 ml.
- Agua desionizada.
- Solución de ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) (Versenato Fuerte o equivalente), concentración molar de 0,1 (1 ml = 4.000 mg/l calcio), también designada por “x 10 fuerte”.

III. Procedimiento

- Añadir 100 ml de solvente de xileno/isopropanol 50/50 ó 75 ml de Propasol Propílico al frasco.
- Llenar una jeringa de 5 ml con lodo base aceite entero hasta exceder la marca de 3 ml.
- Desplazar 2 ml de lodo base aceite dentro del frasco.
- Cerrar herméticamente la tapa del frasco y agitar durante 1 minuto.
- Añadir 200 ml de agua desionizada al frasco.
- Añadir 3 ml de solución amortiguadora de hidróxido de sodio 1N.
- Añadir de 0,1 a 0,25 g de polvo Indicador Calver II.
- Tapar de nuevo el frasco y agitar otra vez durante 2 minutos. Poner el frasco de un lado por 15 a 30 segundos para dejar que las dos fases se separen. Si un color rojizo aparece en la fase acuosa (inferior), esto indica que el calcio está presente.
- Colocar el frasco en el agitador magnético o mezclador Hamilton Beach. Agitar solamente con la velocidad requerida para agitar la fase acuosa sin mezclar de nuevo las fases superior e inferior.
- Valorar muy lentamente con EDTA de concentración molar de 0,1 o la solución de Versenato Fuerte. Un cambio de color muy marcado del color rojizo a un color azul-verde indica que se ha alcanzado el punto final.

C. Cálculo del contenido de calcio del lodo entero

$$\text{Calodo} = \frac{4.000 \cdot (0.1 \text{ m EDTA})}{2,0 \text{ cm}^3}$$

Ecuación 5

Nomenclatura

Pom = Alcalinidad del lodo entero

Calodo = Calcio en el lodo entero

Clodo = Cloruros en el lodo entero

Vo = % en volumen de aceite de la retorta

Vw = % en volumen de agua de la retorta

D. Sulfuros

Este procedimiento es utilizado para medir la concentración de sulfuros solubles activos en un lodo base aceite.

i. Equipo

- Tren de Gas de Garrett (GGT) completo.
- Tubos Dräger de H₂S (bajo rango y alto rango).
- Medidor de caudal.
- Tubo flexible hecho con caucho de látex o Tygon (plástico o equivalente).
- Agitador magnético.
- Varilla de agitación magnética (1/4 pulg. X 1 pulg.).
- Jeringa hipodérmica: 10 ml de vidrio o plástico.

- Solución de ácido cítrico/alcohol isopropílico/ruptor de emulsión de concentración molar de 2.
- 420 g de ácido cítrico (C₆H₈O₇H₂O) disuelto en 1.000 ml de agua desionizada.
- A esta solución, añadir 25 ml de ruptor de emulsión Dowell W-35 de Fann Instrument equivalente (un dispersante de asfalto).
- A esta solución, añadir 200 ml de alcohol isopropílico.
- Antiespumante: octanol (CAS nº 111-87-5).
- Cilindro graduado de 25 ml.
- Gas portador – cartuchos de CO₂, o preferiblemente, nitrógeno. No se debe usar N₂O.
- Tubo de inyección de muestra: aguja de PTFE (Teflón o equivalente) de 6 pulg. (15,2 mm) de largo o equivalente.

ii. Procedimiento

- Comenzar con un Tren de Gas de Garrett limpio y seco.
- Modificar el Tren de Gas de Garrett introduciendo el tubo de inyección de muestra a través del diafragma de caucho, de manera que el extremo inferior del tubo de inmersión esté aproximadamente a 1/2 pulgada del fondo de la cámara 1. El tubo de inmersión se usa para que la muestra de lodo pueda ser inyectada directamente dentro de la solución de ácido cítrico.
- Disponer el agitador magnético y la varilla de agitación (en la cámara 1) de manera que la varilla gire libremente.
- Instalar el cartucho de CO₂.

- Añadir 20 ml de solución de ácido cítrico/alcohol isopropílico/ruptor de emulsión de concentración molar de 2 a la cámara 1.

- Añadir 10 gotas de antiespumante octanol a la cámara 1.

- Romper las puntas del tubo Dräger de H₂S e introducirlo en el soporte del Tren de Gas de Garrett, en el lado más a la derecha. La fecha que indica el flujo de gas debería estar orientada hacia abajo. Colocar una junta tórica sobre el tubo Dräger.

- Introducir el medidor de caudal en el otro soporte, con la flecha de flujo de aire hacia arriba. Colocar una junta tórica sobre el medidor de caudal.

- Instalar la parte superior del Tren de Gas de Garrett y apretar todos los tornillos para cerrar herméticamente.

- Ajustar el tubo de dispersión de manera que el tubo esté colocado encima del nivel de líquido.

- Conectar el tubo de caucho del regulador al tubo de dispersión. Conectar el tubo de caucho de la cámara 3 al tubo Dräger. **NO INICIAR EL FLUJO DE GAS.**
- Aspirar dentro de la jeringa el volumen de la muestra de lodo entero más un exceso de lodo de 0,5 ml. El exceso de lodo compensa el volumen de retención dentro del tubo de inyección.

- Introducir la jeringa dentro del tubo de inmersión y sujetar el émbolo de la jeringa en el tubo de inmersión usando una goma elástica. Esto impedirá que la mezcla de ácido cítricoantiespumante suba por el tubo de inmersión al aplicar la presión.

- Hacer circular lentamente el gas a través del tubo de dispersión durante 10 a 15 segundos para purgar el aire del GGT. Regular el flujo de gas para evitar la espumación de la solución en la cámara 1. Verificar la ausencia de fugas y la operación apropiada del medidor de caudal.
- Encender el agitador magnético. Ajustar la velocidad de manera que se forme un remolino. Bajar con cuidado el tubo de dispersión dentro del líquido, hasta un punto ubicado justo encima de la varilla de agitación.
- Bajar el tubo de inyección de manera que el fondo esté justo debajo del tubo de dispersión. Esto permitirá inyectar el lodo base aceite dentro del remolino.
- Inyectar lentamente una cantidad medida de lodo base aceite en la cámara uno, a través del tubo de inyección. Aumentar la velocidad de la varilla de agitación para mejorar la dispersión e impedir que el lodo base aceite se adhiera en las paredes. Seguir agitando durante 1 minuto.
- Usar una goma elástica para fijar el émbolo de la jeringa. Reiniciar el flujo de gas. Ajustar la velocidad de manera que el medidor de caudal indique entre 200 y 400 ml/min, manteniendo la bola del medidor de caudal entre las marcas rojas del medidor de caudal.
- Observar los cambios en el aspecto del tubo Dräger. Observar y registrar la longitud oscurecida máxima (en unidades marcadas en el tubo) antes de que el “frente” empiece a “emplumar” o a manchar. Continuar el flujo durante un total de 15 minutos; se puede requerir otro cartucho de gas.
- Limpiar el GGT inmediatamente después de utilizarlo para minimizar la deterioración del plástico. Limpiar las cámaras y los conductos con agua caliente y un detergente suave. Lavar el tubo de dispersión y el tubo de inyección con un

solvente orgánico como la acetona, y luego con agua. Ocasionalmente, puede que sea necesario remojar el tubo de dispersión en un ácido para eliminar los depósitos de carbonato de calcio. Los solventes orgánicos pueden agrietar el cuerpo de lucita del GGT. Usando el volumen de muestra, la longitud oscurecida del tubo Dräger, y el factor de tubo Dräger, calcular los sulfuros en la muestra.

$$GGT \frac{mg}{l} = \text{longitud oscurecida} * \frac{\text{factor de tubo}}{\text{volumen de muestra ml}} \quad \text{Ecuación 6}$$

2.2 IMPACTO DEL FLUIDO BASE ACEITE SOBRE EL MEDIO AMBIENTE

El uso de los aceites menos tóxicos y más biodegradables, aunado a las regulaciones implementadas por la nueva Ley Penal del Ambiente, ha disminuido considerablemente el impacto ambiental en áreas sensibles, tanto en tierra como en mar.

El criterio usado para conocer el grado de toxicidad de un aceite es su concentración letal (CL50), basada en indicadores seleccionados de acuerdo a las condiciones climatológicas y a las especies locales. La expresión CL50 se refiere a la concentración letal que causa la muerte al 50% de la población experimental al cabo de cierto tiempo de exposición.

2.2.1 Pruebas de Toxicidad o Bioensayos

Las pruebas de toxicidad o bioensayos son experimentos que permiten medir el efecto de una sustancia cuando esta es expuesta a una o varias especies de organismos, permitiendo evaluar el grado de toxicidad de una sustancia química.

Los resultados de estas pruebas son aceptados como estimaciones de los efectos de una sustancia cuando esta es expuesta al medio ambiente.

Alrededor del mundo y en particular en Colombia se han desarrollado ejercicios en los que se ha buscado estandarizar pruebas de toxicidad (en el mundo APHA, 1981, ASTM, 1980^a y 1980^b) y en Colombia la GTC 31 1996. De esta forma se logra detectar un efecto en el caso de muestras de las cuales se desconoce sus componentes tóxicos.

A nivel mundial se ha hecho un gran esfuerzo por estandarizar estas pruebas, cabe destacar y en particular para Latinoamérica el esfuerzo del centro de investigación de Canadá en 1996 el cual reunió expertos de 8 países los cuales llevaron a cabo un programa de intercalibración, con la finalidad de validar una batería de ensayos a través de muestras ciegas y su posterior aplicación en muestras ambientales. Como resultado de esta experiencia se publicó el libro "Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de aguas, estandarización, intercalibración, resultados y aplicaciones (castillo, 2004) .Cabe destacar que en este trabajo se ha puesto en práctica algunos capítulos para llevar a cabo el estudio de toxicidad para Diesel y aceite mineral.

Desde el punto de vista regulatorio estas pruebas biológicas pueden utilizarse para establecer criterios de calidad ambiental, para controlar descargas de aguas residuales municipales e industriales, para regular el uso y producción de sustancias químicas y para enjuiciar y defender actividades relacionadas con los contaminantes en casos de litigio ambiental.

2.2.1.1 Tipos de bioensayos

Se pueden clasificar de acuerdo al procedimiento, según el tipo de respuesta y la infraestructura del laboratorio la tabla 7 muestra esta clasificación:

Tabla 7. Tipos de bioensayos

De acuerdo al procedimiento	Según la respuesta	Según la infraestructura del laboratorio
<p>Ensayos con muestra única: es el que se realiza con una sustancia química conocida o con una muestra única de aguas residuales complejas. Permiten determinar la concentración necesaria para producir una cierta respuesta indicativa de toxicidad de las muestras evaluadas.</p>	<p>Bioensayos agudos: estos cuantifican las concentraciones letales de una o más sustancias a una especie en particular y por lo general, son de corta exposición (24-48 horas). el tiempo del bioensayo debe ser constante y suficiente para que los efectos de la sustancia evaluadas proporcionen respuestas claras y bien definidas en las especies expuestas. El valor calculado se denomina concentración letal media (CL 50) y representa la concentración que causa la muerte al 50% de la población experimental, en un tiempo determinado.</p>	<p>Sistemas estáticos: se efectúa sin la renovación continua del flujo constante de las diluciones sometidas al ensayo. Las desventajas están dadas por la posible degradación de las sustancias a ensayar y a la acumulación de las excretas de los animales en los recipientes durante el ensayo.</p> <p>Según la renovación pueden subdividirse en:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sin renovación: los organismos se exponen a la misma solución de prueba el tiempo de duración del ensayo. • Con renovación: los especímenes se someten a una preparación fresca de la misma concentración inicialmente empleada, periódicamente (generalmente 24 horas).

Continuación Tabla 7

De acuerdo al procedimiento	Según la respuesta	Según la infraestructura del laboratorio
<p>Ensayos de toxicidad con efluentes: se realiza para determinar la calidad toxicológica de un efluente de vertimiento constante o variable. El agua se toma continuamente en un punto de conducción de descarga, de modo que las diluciones de ensayo se reemplacen también continuamente, con diluciones análogas a las que se descargan en el momento.</p>	<p>Bioensayos crónicos: por lo general son bioensayos de larga exposición, generalmente días, semanas e incluso meses y se extiende sobre un periodo de vida de las especies utilizando como medida de la respuesta parámetros tales como capacidad reproductiva, crecimiento, longevidad, número de crías, etc. Son ensayos que utilizan concentraciones tan bajas que los factores biológicos (como la edad) o los parámetros, medioambientales (como temperatura), dentro de un rango ecológicamente razonable, ejercen una pequeña influencia en la susceptibilidad de los organismos. Se estima la concentración efectiva media (CE 50), la cual es la concentración de la sustancia de prueba que causa un efecto al 50% de la población experimental, al cabo de un tiempo determinado; depende del estadio de vida considerado o del ciclo de vida del organismo empleado.</p>	<p>De flujo continuo: circula continuamente una corriente de sustancia de prueba nueva en contacto con los individuos experimentales, a través de una fuente de suministro de agua y una unidad dosificadora de la sustancia a evaluar. Esta última, generalmente está dada por una bomba, una válvula, un sifón o una torre de distribución constante de las sustancias a ensayar y eliminan la mayoría de los efectos negativos que aparecen en los sistemas estáticos.</p>
<p>Ensayos de toxicidad de alarma en efluentes: estos se realizan en el sitio de descarga y permiten determinar si las aguas receptoras del vertimiento o de otros contaminantes producen una respuesta medible, que por lo general es la muerte de los organismos de ensayo. También es conocido como bioensayo in situ.</p>		

Fuente: Evaluación eco toxicológica de un biocida convencional y un biocida no convencional mediante la aplicación de bioensayos de toxicidad aguda en ambientes acuáticos, Diana Marcela Calixto Gómez, universidad Industrial de Santander 2004.

2.2.1.2 Criterios para la selección de pruebas biológicas en laboratorio para la evaluación toxicológica de sustancias químicas.

Tabla 8. Criterios para la selección de pruebas biológicas en laboratorio para la evaluación toxicológica de sustancias químicas

<p>Factibilidad</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Bajo costo ✓ Materiales y reactivos disponibles en la localidad. ✓ Tiempo máximo de desarrollo, 5 días. ✓ Procedimiento de prueba simple. ✓ Facilidad en la evaluación de la respuesta a medir.
<p>De los organismos</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Fácil obtención. ✓ Fácil mantenimiento. ✓ Representatividad ecológica. ✓ Con información sobre su sensibilidad a compuestos tóxicos. ✓ Estadio más sensible. ✓ Respuesta relevante a los compuestos tóxicos. ✓ Sensibilidad a bajas concentraciones. ✓ Sensibilidad a una amplia variedad de compuestos tóxicos. ✓ Sensibilidad no redundante con otras especies. ✓ Con información sobre su biología.
<p>De la prueba</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Condiciones presentes en los ecosistemas (temperatura, salinidad, dureza, etc) ✓ Concentraciones químicas reales (que se presenten en el medio ambiente) ✓ Técnicamente seguros y no contaminantes. ✓ Posibilidad de ser estandarizada. ✓ Buena exactitud y precisión analíticas. ✓ Aplicación universal (usos, ventajas y limitaciones) ✓ Significado ecológico de los resultados. ✓ Buenas prácticas de laboratorio.

Fuente: (Ensayos toxicológicos para la evaluación de sustancias químicas en agua y suelo La experiencia en México , Patricia Ramírez Forero y Ana Mendoza Cantú (copiladoras), Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología , primera edición enero de 2008.)

3. FORMULACIÓN DE LODOS EMULSIÓN INVERSA EMPLEANDO ACEITE MINERAL BLANCO GRADO TECNICO

La tecnología de los fluidos de perforación se rige por tres principios fundamentales desempeño, economía y aspectos ambientales. Este estudio surge como una forma de ampliar los estudios acerca de nuevos materiales para la preparación de lodos emulsión inversa ya propuesta en tesis anteriores.

Otros aspectos relevantes del estudio de factibilidad de aceite mineral en la formulación de lodos es apoyar dos principios claves mencionados anteriormente desempeño y aspectos ambientales, conociendo que el aceite mineral tiene gran compatibilidad con el medio e inclusive en muchos estudios se ha denominado “aceite amigable con el medio ambiente” un aspecto bastante importante si se tiene en cuenta que las regulaciones ambientales cada día aumentan y sumado a que las industrias están optando por incorporar la importancia del medio ambiente en sus procesos de toma de decisiones con respecto al desarrollo ,manufactura y comercialización de sus productos.

El fluido de perforación es una parte clave para el éxito de cualquier programa de perforación, así como los materiales son base fundamental de las propiedades de cualquier lodo y de estos depende el buen desempeño cuando este sea expuesto a condiciones de perforación. Este estudio trata de la formulación de varias emulsiones con el fin de poner a prueba la capacidad y desempeño de un fluido preparado empleando como fase continua aceite mineral, para lo cual se trajeron a relación varias formulaciones variando la concentración de los productos y los porcentajes de aceite y agua en la emulsión. Posteriormente se llevó a cabo una prueba de toxicidad mediante bioensayos a una muestra de lodo formulada con Diesel y otra formulada con Aceite mineral con el fin de determinar un patrón

cuantitativo que corrobore el efecto positivo a favor del medio ambiente cuando se emplea aceites minerales respecto a cuándo se prepara con Diesel.

3.1 ESTUDIOS PRELIMINARES

- ✓ Caracterización de una muestra de aceite mineral grado técnico sujeta a los parámetros críticos que debe cumplir para hacer parte de un lodo base aceite.

- ✓ Ejecución pruebas de compatibilidad entre el aceite mineral grado técnico y los aditivos utilizados en lodos de perforación base inversa.

- ✓ Verificar la estabilidad de la emulsión aceite mineral grado técnico con agua en diferentes proporciones y evaluar el desempeño de cada una de estas formulaciones.

3.1.1 Caracterización de una muestra de aceite mineral grado técnico: Las emulsiones inversas pueden ser formuladas utilizando una amplia variedad de aceites que deben tener, entre otras, las siguientes especificaciones punto de anilina, punto de inflamación, no debe ser tóxico, no corrosivo, basados en estos aspectos el aceite mineral resultó ser una excelente opción para trabajar como fase continúa en la formulación de lodos base aceite. La siguiente tabla muestra los rangos óptimos de estas propiedades mencionadas anteriormente, respecto a los valores de las propiedades para un aceite mineral blanco grado técnico.

Tabla 9. Rango de propiedades y los valores del aceite mineral

Propiedad	Descripción	Rango recomendable	Aceite mineral blanco grado técnico
Punto de inflamación	Este debe ser mayor para reducir los riesgos de incendio en el taladro.	➤ 180 °F	➤ 338°F
Punto de anilina	Este está relacionado con el contenido aromático que contiene el aceite para reducir el desgaste en las empaaduras de goma, sellos y gomas de tuberías.	➤ 140 °F	➤ 200°F

Continuación TABLA 9

Propiedad	Descripción	Rango recomendable	Aceite mineral blanco grado técnico
Corrosión lámina de cobre	Es uno de los efectos más relevantes que causa daño en las tuberías de perforación.	NO CORROSIVO	PASA
Toxicidad	Esta está relacionada con los efectos con el medio ambiente cuando este es expuesto a un tipo se sustancia.	LO MENOR POSIBLE	Son menos toxicos a los organismos marinos ya que su contenido de aromáticos es < 1 % V/V

Fuente: Centro Internacional de Educación y Desarrollo (CIED). Fluidos de Perforación PDVSA. 2002.

3.1.2 Reología del aceite mineral a varias temperaturas

La tabla 10 muestra la Reología y la viscosidad a varias temperaturas para una muestra de 350 ml de aceite mineral blanco grado técnico:

Tabla 10. Reología aceite mineral a varias temperaturas.

velocidad de corte (RPM)	velocidad de corte (Seg ⁻¹)	lecturas dial				Viscosidad efectiva (cp.)			
		84°F	100°F	120°F	150°F	84°F	100°F	120°F	150°F
600	1020	75	49	42	37	37.5	24.5	21	18.5
300	510	40	28	21	18	40	28	21	18
200	340	30	19	15	14	45	28.5	22.5	21
100	170	17	12	10	9	51	36	30	27
6	10.2	6	5	3	2	300	250	150	100
3	5.1	5	4	2	1	500	400	200	100

Fuente: Los autores.

Con las lecturas del dial del cuadro anterior se obtienen los valores de n (índice de ley exponencial o exponente), K (índice de consistencia o índice de fluido de la ley exponencial) para cada temperatura optando por un modelo de ley exponencial que se expresa como:

$$\tau = K (\dot{\gamma}^n)$$

Dónde:

τ = esfuerzo de corte

K = índice de consistencia

n = índice de ley exponencial

$\dot{\gamma}$ = velocidad de corte

Tabla 11. Valores de n y de k para el aceite mineral a varias temperaturas

VELOCIDADES DE CORTE ALTAS					
Parámetros	Unidades	Temperatura			
		84°F	100°F	120°F	150°F
n	Adimensional	0.9069	0.9143	1	1.04
K	Lb-Seg ⁿ /100 ft ²	0.1401	0.087	0.041	0.028

Fuente: Los autores

El índice de ley exponencial indica el grado de comportamiento no newtoniano de un fluido y cuanto menor sea este más el fluido disminuye su viscosidad, los datos reportados en el cuadro anterior muestran que para el aceite mineral blanco grado técnico a varias temperaturas su índice (n) se encuentra alrededor de uno lo cual su comportamiento es de un fluido newtoniano y a medida que se aumenta la temperatura su comportamiento es más similar a este tipo de fluidos.

En estos fluidos el esfuerzo de corte es directamente proporcional a la velocidad de corte y su viscosidad es la pendiente de esta línea de esfuerzo de corte/velocidad de corte de esta manera a medida que se incrementa la velocidad de corte el esfuerzo de corte también lo hace (por ejemplo para una lectura de 35 para 100RPM y si se duplica la velocidad de corte a 200RPM el esfuerzo de corte es de 70), lo cual es desfavorable si lo que se quiere es que este a velocidades altas de corte disminuya su viscosidad.

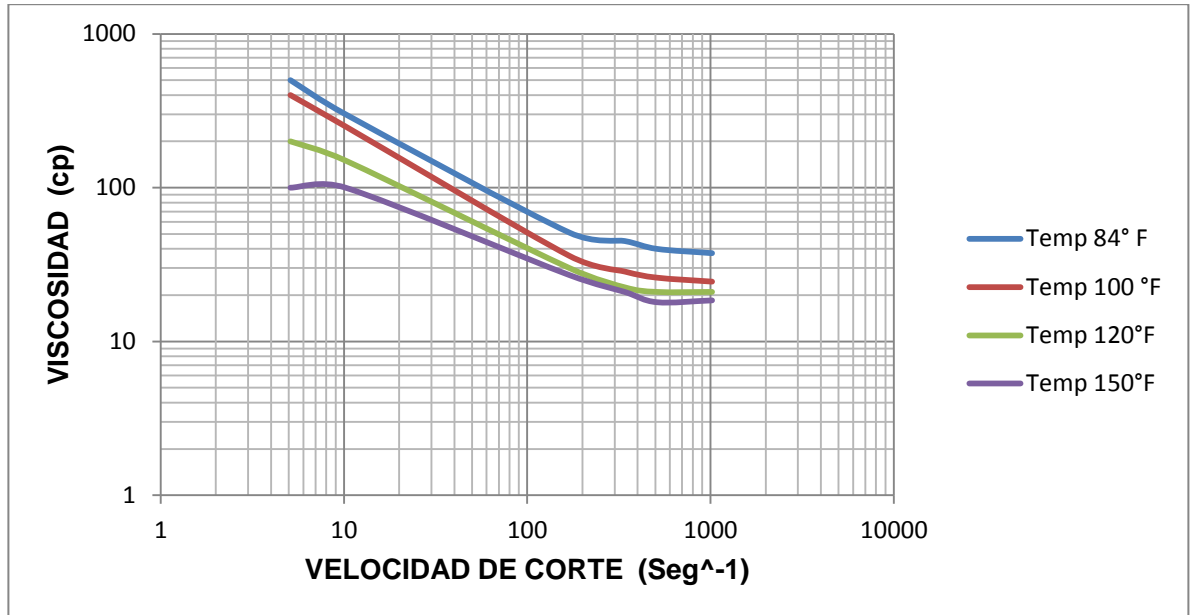
Para que un fluido como el aceite mineral tenga una variación de su viscosidad con el esfuerzo de corte es necesario un “n<1” ya que a medida que este disminuye el perfil de velocidad se aplanan lo cual es una de las razones por las

cuales el aceite mineral debido a sus valores de n y bajo esas condiciones no suspenderá los recortes y el material densificante bajo condiciones estáticas lo cual estará reflejado en una deficiente limpieza de pozo.

Por otra parte el índice de consistencia (K) está relacionado con la viscosidad de un fluido a bajas velocidades de corte. Los valores reportados anteriormente en el cuadro para el aceite mineral muestran que este a medida que aumenta la temperatura decrece progresivamente lo cual es un indicativo que la viscosidad a bajas velocidades de corte su variación va ser relativamente baja debido a la dificultad de las partículas para enlazarse entre sí, razón por la cual el aceite mineral tiene una baja eficacia para limpiar el pozo y suspender los materiales densificantes y los recortes de la broca a velocidades de corte bajas, comparado con otros fluidos que se emplean en la formulación de lodos base aceite.

El reograma de la gráfica 1 para el aceite mineral blanco grado técnico muestra que el adelgazamiento del fluido varía con las velocidades de corte pero hasta un punto donde este adelgazamiento a velocidades de corte altas tiende a ser constante o tener muy poca variación lo cual indica que este fluido a velocidades de corte altas presentará una disminución en la viscosidad baja.

Gráfica 1. Reograma del aceite mineral a varias temperaturas



Fuente: Los autores.

3.1.3 Ejecución pruebas de compatibilidad entre el aceite mineral grado técnico y los aditivos utilizados en lodos de perforación base inversa: las pruebas fueron realizadas con los aditivos más comunes para la preparación de lodos base aceite a continuación se describe cada uno de estos materiales, descripción de la prueba y en la tabla el resultado de la misma.

Descripción de productos:

Densificante: material utilizado para aumentar la densidad del lodo con la cual se controla la presión de los fluidos de formación previniendo posibles reventones.

Viscosificante: es una arcilla bentónica tratada con un compuesto de aminas que desarrolla las propiedades de viscosidad y suspensión; requiere un aditivo polar como el agua para desarrollar el máximo rendimiento, este producto fue desarrollado para crear más rápidamente capacidad de suspensión y acarreo de los recorte en lodos base aceite con menor corte y temperaturas más bajas.

Alcalinizante: aditivo utilizado como fuente de alcalinidad y saponificar el emulsificante.

Emulsificante: ácido graso poliaminado se utiliza para emulsificar agua en aceite en los fluidos de perforación inversa. Se emplea para mejorar las características de humectación de aceite.

Humectante: promueve de manera efectiva la humectación por aceite del material utilizado para densificar el fluido y facilita la formación de emulsiones agua y aceite. Puede ser usado para reducir el punto cedente en fluidos de emulsión inversa, aunque a veces este material pueden reducir la cantidad de sólidos que el fluido puede tolerar.

Controlador de filtrado: es una leonardita organofílica se utiliza para controlar la velocidad de filtración en lodos de perforación base aceite. Provee un control de filtrado a HPHT en todos los sistemas de fluidos, también se puede usar para aumentar la emulsión de agua en lodos base aceite y promover la estabilidad del fluido.

Descripción de la prueba

- i. Se toma 6 muestras de 100 ml cada una de aceite mineral blanco grado técnico en 6 vasos por separado.
- ii. A cada una de las 6 muestras se le agrega una cantidad de cada producto, así para el primer frasco se le agrega viscosificante, al segundo densificante, al tercer frasco emulsificante, al cuarto controlador de filtrado, al quinto humectante y al sexto alcalinizante. La proporción de estos productos se encuentra más adelante en la tabla de resultados.
- iii. Cada uno de los frascos con el aceite mineral y los aditivos es llevado a agitación.
- iv. Finalmente se retiran de la agitadora y se almacenan en botellas de vidrio para posteriormente ser rotuladas y puestas para empezar a hacer el seguimiento de estas muestras por un tiempo no mayor a 30 días. Se dice que es incompatible si se nota alguna reacción adversa entre las dos sustancias como formación y precipitación de sólidos de tamaño considerable, formación de gas, cambios en la viscosidad o fluidez de la muestra.

Tabla 12. Resultados prueba de compatibilidad



PRODUCTO	CANTIDAD (Lpb)	TIEMPO DE AGITACIÓN(minutos)	RESULTADO DE COMPATIBILIDAD
Densificante	3.5	10	Compatible
Emulsificante	3.5	10	incompatible
Viscosificante	3.5	10	incompatible
Humectante	3.5	10	compatible
Controlador de filtrado	3.5	10	compatible
Alcalinizante	3.5	10	compatible

Fuente: Los autores

El aceite mineral blanco grado técnico resulto incompatible con el emulsificante y viscosificante. Para el emulsificante se presentó precipitación y formación de grumos, el viscosificante también presenta precipitación prácticamente en la misma relación del material agregado.

3.1.4 Estabilidad de la emulsión aceite mineral grado técnico con agua en diferentes proporciones

El procedimiento seguido fue el siguiente:

- I. Se preparan mezclas de aceite mineral con agua en diferentes proporciones 75/25, 50/50, y 25/75.
- II. Se mezclan en el agitador a la velocidad más alta durante 5 minutos.
- III. Las mezclas son sometidas a calentamiento en una plancha hasta alcanzar una temperatura de 95°C (203°F).
- IV. Se registran lecturas de %agua libre, %interface,% emulsión y % Aceite Mineral para tiempos de (1minuto,2.5,5,7.5,10,15,20,30).

Este ejercicio se hace con el fin de establecer si existe miscibilidad entre el aceite mineral y el agua sin presencia de un emulsificante, tomando como parámetros de referencia y que afectan las tensiones interfaciales, la Temperatura y la agitación los cuales su variación permite que dos fluidos desarrollen miscibilidad.

Tabla 13. Lecturas de la prueba de miscibilidad de la mezcla aceite mineral blanco grado técnico/agua 75/25.

Mezcla1	75%aceite mineral/ 25% agua			
observación(minutos)	% agua	% interface	% emulsión	% Aceite Mineral
1	25	0	0	75
2.5	25	0	0	75
5	25	0	0	75
7.5	25	0	0	75
10	25	0	0	75
15	25	0	0	75
20	25	0	0	75
30	25	0	0	75

Fuente: Los autores

Tabla 14. Lecturas de la prueba de miscibilidad de la mezcla aceite mineral blanco grado técnico/agua 50/50.

Mezcla1	50%aceite mineral/ 50% agua			
observación(minutos)	% agua	% interface	% emulsión	% Aceite Mineral
1	50	0	0	50
2.5	50	0	0	50
5	50	0	0	50
7.5	50	0	0	50
10	50	0	0	50
15	50	0	0	50
20	50	0	0	50
30	50	0	0	50

Fuente: Los autores

Tabla 15. Lecturas de la prueba de miscibilidad de la mezcla aceite mineral blanco grado técnico/agua 25/75.

Mezcla1	25%aceite mineral/ 75% agua			
Observación (minutos)	% agua	% interface	% emulsión	% Aceite Mineral
1	75	0	0	25
2.5	75	0	0	25
5	75	0	0	25
7.5	75	0	0	25
10	75	0	0	25
15	75	0	0	25
20	75	0	0	25
30	75	0	0	25

Fuente: Los autores

En las tres mezclas y bajo estas condiciones de agitación y temperatura no se desarrolla emulsión entre el aceite mineral y el agua debido a que como muestran los registros el aceite mineral y el agua se mantienen en las mismas proporciones que al principio de la prueba.

Otra observación fue la permanencia de fase (agua) dispersa en pequeñas proporciones en el aceite pero a medida que pasa el tiempo de un minuto aproximadamente esta se precipita. Con el fin de generar emulsión entre el aceite mineral y el agua se hace necesaria la ayuda de un material emulsificante ya que las observaciones de la prueba y de una manera visual muestran que la tensión interfacial entre estos dos fluidos es fuerte comparada con otros fluidos empleados para la formulación lodos base inversa.

PRUEBA DE ESTABILIDAD DE LA EMULSIÓN

Aceite mineral y agua en tres porcentajes



Proceso de aumento de la temperatura de las tres combinaciones



Estabilidad de la emulsión después de un minuto



Estabilidad de la emulsión aceite diesel y agua (50/50)



3.2 PREPARACIÓN DE LAS FORMULACIONES Y REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS

3.2.1 Formulaciones con diesel y aceite mineral

Con el fin de obtener valores representativos se tomó como base un lodo de referencia preparado a partir de diesel el cual es el fluido más común en la formulación de lodos base aceite, posteriormente se formulan cuatro sistemas diferentes: emulsión firme, emulsión filtrado relajado, alto contenido de agua y 100% aceite con los dos aceites, mineral y diesel con las concentraciones promedio reportadas por la literatura las cuales son reportadas más adelante para cada caso.

Con respecto a las densidades cabe hacer la observación que todas las emulsiones se llevaron a cabo sin la presencia de un agente densificante ya que se contó con un fluido de referencia (diesel) y en base a este se llevaron a cabo las comparaciones.

Tabla 16. Formulaciones Base Mineral y Diesel

	Sistema filtrado firme 80/20 60/40	Sistema filtrado relajado 80/20	Sistema alto contenido de agua 40/60	Sistema 100% aceite
Material	Concentración (Lb/bbl)	Concentración (Lb/bbl)	Concentración (Lb/bbl)	Concentración (Lb/bbl)
Emulsificante	7	3	6	3
Viscosificante	3.25	3	1.5	10
Controlador de filtrado	7	3	6	10
Alcalinizante	3.5	3.5	4	2
Fuente de salinidad	2	2	2
Fase continua	según se requiera	según se requiera	según se requiera	100%
Fase discontinua	según se requiera	según se requiera	según se requiera

Fuente: Los autores

3.2.2 Pruebas de Laboratorio

Estas se realizan de acuerdo al procedimiento descrito en el capítulo 2, siguiendo el paso a paso de cada uno de los protocolos basados en el capítulo 3 del manual: Energy API. Manual de fluidos de perforación. Fluidos de Perforación 2001.

3.2.2.1 Pruebas reológicas

A partir de las lecturas obtenidas por el viscosímetro rotacional para seis velocidades diferentes se calculan las siguientes propiedades:

PROPIEDADES	UNIDADES
Viscosidad plástica (VP)	cp.
Viscosidad aparente (VA)	cp.
Punto cedente (YP)	lb/100 ft ²
Resistencia Gel 10 s.	lb/100 ft ²
Resistencia Gel 10 m.	lb/100 ft ²
	Inconsistente--- consistente
Cake	Plástica----quebradiza
	Espesor de la retorta

Fuente: Los autores

La manera en que se deforma el fluido en condiciones de operación influye en las funciones de limpieza, suspensión, pérdidas de filtrado y la manera como este fluye se asemeja al comportamiento del fluido a velocidades de corte y está asociado más a la integridad del equipo, las tasas de energía suministrada y las tasas de penetración.

3.2.2.2 Densidad

La densidad de los fluidos es medida en lpg (libras por galón) sin la presencia de material densificante para ambos casos, el método se describe en la sección 2.1.2.

3.2.2.3 Filtrado API

Esta prueba es llevada a cabo a una presión de 100 psi y una temperatura ambiente promedio de 27.7 °C el filtrado obtenido es medido en ml, para ello seguimos lo descrito en el capítulo 2.1.4. El cake es analizado de la siguiente manera:

	Inconsistente--- consistente
Cake	Plástica----quebradiza
	Espesor de la retorta(pulgadas)

Fuente: Los autores

En las tablas 17 Y 18 Se muestran los resultados para el fluido formulado a partir de diesel y aceite mineral de las pruebas anteriores:

Tabla 17. Resultados de las pruebas con Diesel

VARIABLE	UNIDADES	100% Aceite	Firme 80/20	Firme 60/40	Relajado 80/20	%Agua 40/60
θ 600	lb/100 ft^2	57	40	80	33	80
θ 300	lb/100 ft^2	36	26	55	20	46
θ 200	lb/100 ft^2	29	22	37	16	33
θ 100	lb/100 ft^2	24	16	33	10	19
θ 6	lb/100 ft^2	16	11	21	8	5
θ 3	lb/100 ft^2	13	9	20	6	4
Resistencia Gel 10 s.	lb/100 ft^2	12	6	20	5	9
Resistencia Gel 10 m.	lb/100 ft^2	18	7	22	6	34
VP	cp.	21	14	25	13	40
VA	cp.	29	20	40	17	12
YP	lb/100 ft^2	15	12	30	7	34
Filtrado API	ml	6.8	5.1	1.2	3.5	1.1
Densidad	Lpg	6.8	6.7	7.2	6.5	7
Cake		inconsisten te	Inconsisten te	inconsisten te	inconsisten te	Inconsisten te
		plástica	Plástica	plástica	plástica	Quebradiza
		<1/32	< 1/32"	<1/32	<1/32	<1/32

Fuente: Los autores

Tabla 18. Resultados de las pruebas con Aceite mineral

VARIABLE	UNIDADES	100% Aceite	Firme 80/20	Firme 60/40	Relajado 80/20	%Agua 40/60
θ 600	lb/100 ft ²	90	180	253	145	363
θ 300	lb/100 ft ²	47	97	145	80	204
θ 200	lb/100 ft ²	34	67	104	55	176
θ 100	lb/100 ft ²	22	44	60	31	100
θ 6	lb/100 ft ²	4	7	11	5	9
θ 3	lb/100 ft ²	3	6	8	4	6
Resistencia Gel 10 s.	lb/100 ft ²	11	7	11	4	8
Resistencia Gel 10 m.	lb/100 ft ²	13	12	17	9	21
VP	cp.	43	83	108	65	159
VA	cp.	45	90	127	73	182
YP	lb/100 ft ²	4	14	37	15	45
Filtrado API	ml	53.8	6	5.3	5.5	5.5
Densidad	Lpg	7.1	7.08	7.25	6.9	7.22
Cake		consistente	inconsistente	inconsistente	inconsistente	Inconsistente
		quebradiza	plástica	plástica	plástica	Plástica
		2/32"	< 1/32"	<1/32	<1/32	2/32"

Fuente: Los autores

A continuación se presentan los datos obtenidos para cada sistema de lodo: firme, filtrado relajado, alto contenido de agua y 100% aceite con su respectivo análisis:

FORMULACIÓN FILTRADO FIRME

Tabla 19. Reología formulación emulsión firme 80/20

ACEITE MINERAL GRADO TECNICO				DIESEL			
VARIABLE	V (1/s)	θ RPM (lb/100 ft ²)	μ efectiva (Cp)	VARIABLE	V (1/s)	θ RPM (lb/100 ft ²)	μ efectiva (Cp)
θ 600	1020	180	90	θ 600	1020	40	20
θ 300	510	97	97	θ 300	510	26	26
θ 200	340	67	100.5	θ 200	340	22	33
θ 100	170	44	132	θ 100	170	16	48
θ 6	10.2	7	350	θ 6	10.2	11	550
θ 3	5.1	6	600	θ 3	5.1	9	900

Fuente: Los autores.

Tabla 20. Propiedades reológicas formulación emulsión firme 80/20

PROPIEDADES	UNIDADES	ACEITE MINERAL	DIESEL
VP	Cp	83	14
VA	Cp	90	20
YP	lb/100 ft ²	14	12
Filtrado API	ml	6	5.1
Resistencia Gel 10s.	lb/100 ft ²	7	6
Resistencia Gel 10m.	lb/100 ft ²	12	7
Densidad	LPG	7.08	6.7
		inconsistente	Inconsistente
Cake		Plástica	Plástica
		< 1/32"	< 1/32"

Fuente: Los autores.

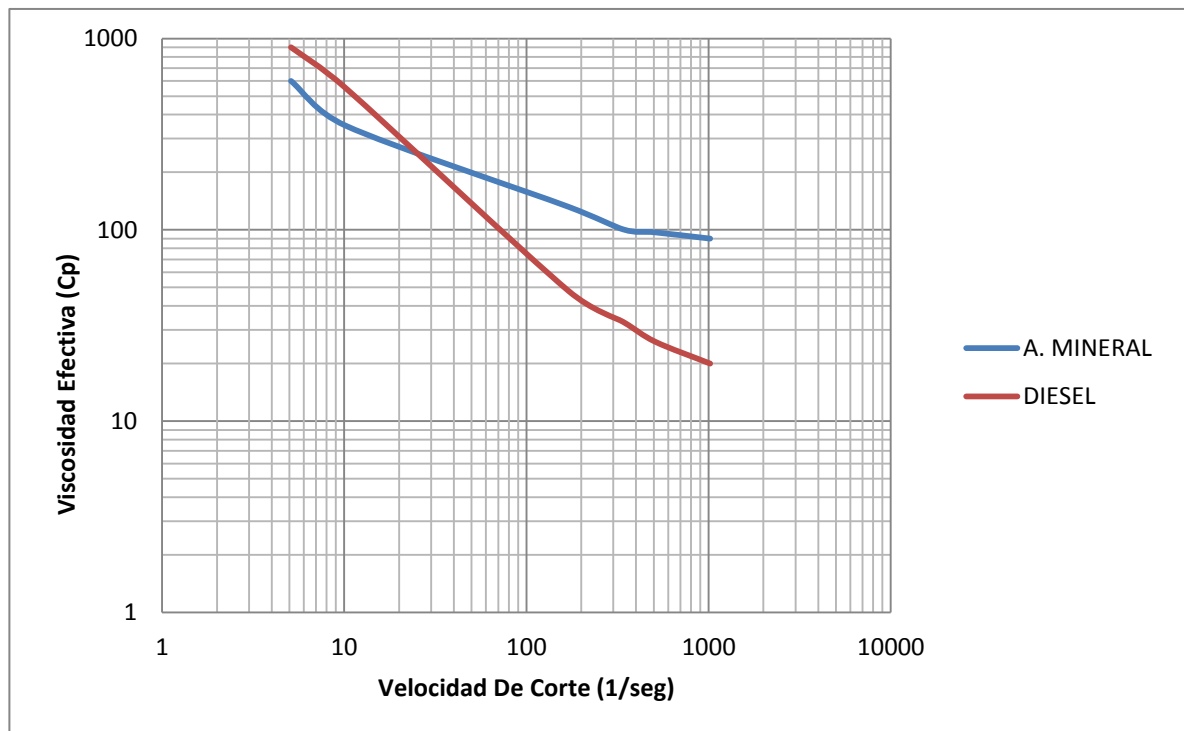
Los resultados mostrados en la tabla 20 para las pérdidas de filtrado API muestran que para ambos casos, tanto para el aceite mineral como para el diesel se mantienen en los niveles permisibles menor a 7ml que reporta la literatura. Siguiendo con el análisis del cake se puede decir que bajo estas condiciones las retortas muestran las mismas características.

Los datos reportados de densidad en la *tabla 20* muestran que está en la emulsión aceite mineral es mayor debido a que este fluido en estado natural es

decir sin la adición de agentes químicos (emulsificantes, viscosificantes, controladores de filtrado etc.) resulta ser mayor que la del diesel de referencia.

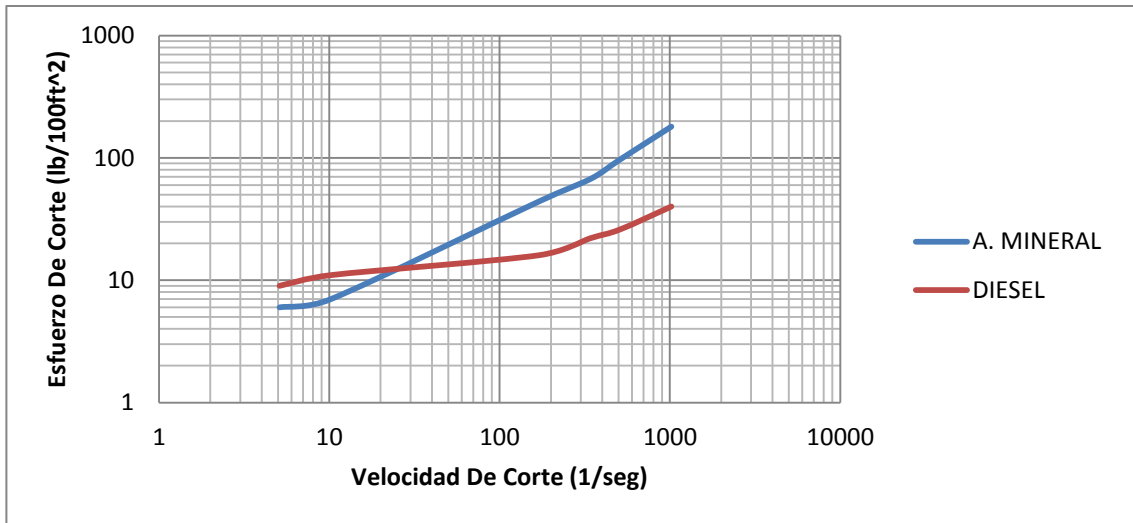
Es posible observar en los datos reportados por la *tabla 20* empezando con la viscosidad plástica (VP) la cual para el aceite mineral resulto ser mayor en un 83% comparada con la obtenida para la formulación con Diesel. Otro parámetro importante en el análisis reológico es la viscosidad aparente, en la *tabla 20* se reportan los valores para la formulación aceite mineral y diesel, los valores reportados muestran que la viscosidad a altas velocidades de corte es mayor en casi un 78% comparada con la obtenida para el lodo base diesel.

Gráfica 2. Velocidad De Corte (1/seg) vs Viscosidad Efectiva (Cp)



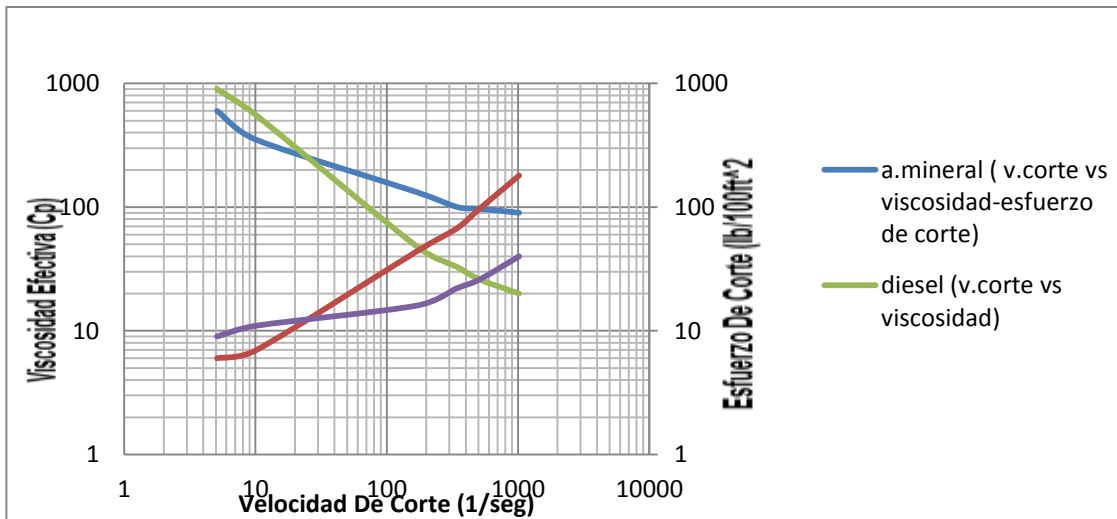
Fuente: Los autores.

Gráfica 3. Velocidad De Corte (1/seg) vs Esfuerzo De Corte (lb/100ft²)



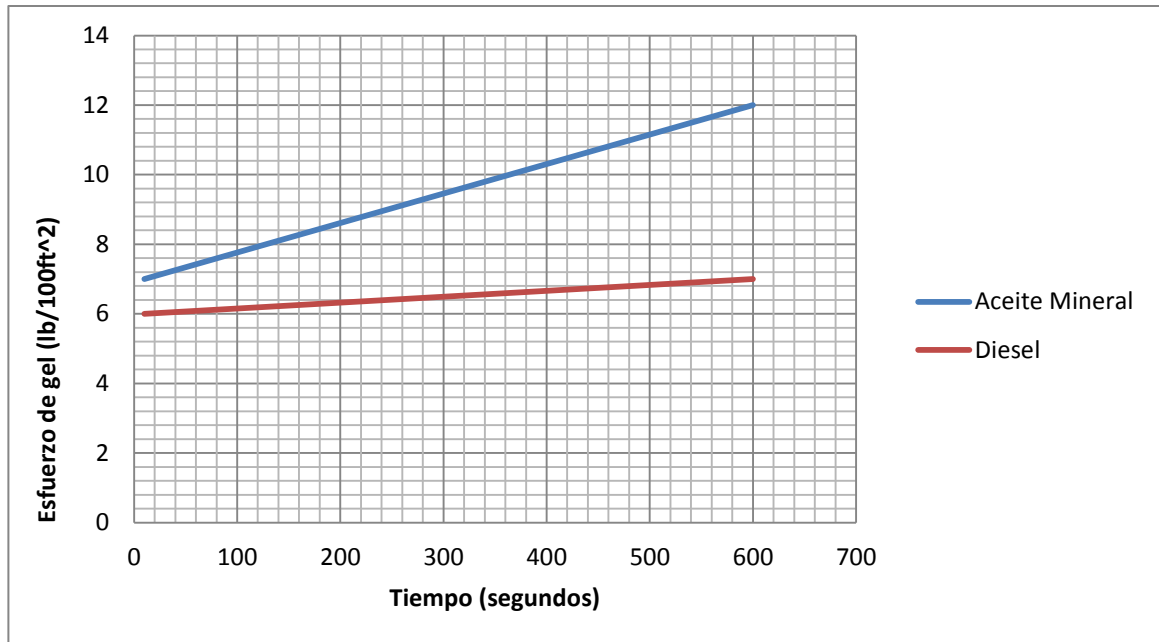
Fuente: Los autores.

Gráfica 4. Velocidad de corte (seg⁻¹) vs esfuerzo de corte (lb/100ft²) y viscosidad efectiva (Cp)



Fuente: Los autores.

Gráfica 5. Tiempo (segundos) vs Esfuerzo de gel (lb/100ft²)



Fuente: Los autores.

Las gráficas 2, 3 y 4 permiten describir de una manera más general el comportamiento para las dos emulsiones, el gráfico 2 muestra que ambos fluidos tienden a disminuir su viscosidad con el aumento de la velocidad de corte pero la tasa de decremento para el diesel es de cerca de un 33% bastante mayor comparada con la del aceite mineral de 23%, esto se ve también corroborado en el *gráfico 3* si se tiene en cuenta que aumenta el esfuerzo de corte a medida que lo hace la velocidad de corte, aunque en el *gráfico 3* se nota que para el aceite mineral a medida que se aumenta la velocidad de corte los esfuerzos son mayores comparados con los obtenidos para el lodo base diesel a pesar de que este parte inicialmente con esfuerzos de corte altos a velocidades de corte bajas su crecimiento es paulatinamente, no de la manera progresiva con que lo hace el aceite mineral.

La *gráfica 4* permite mostrar el comportamiento en un solo gráfico de los tres aspectos relevantes como son: viscosidad efectiva, esfuerzos de corte y la velocidad de corte para los dos fluidos base mineral y diesel, es fácil observar de este gráfico la disminución de la viscosidad con el esfuerzo de corte que exhiben los dos fluidos, pero si se adentra la mirada es posible notar que para el aceite mineral la viscosidad disminuye paulatinamente mientras los esfuerzos de corte lo hacen progresivamente caso contrario presenta el lodo de referencia el cual presenta una disminución progresiva de su viscosidad y un aumento paulatino de los esfuerzos de corte.

Los esfuerzos de gel obtenidos para el lodo base mineral como se percibe en la *gráfica 5* muestran un cambio de magnitud respecto al valor de 10 segundos de cerca del 42% pasados 10 minutos, mientras que para el lodo base diesel es cerca de un 15%, de esta manera cabe señalar que la gelificación si bien no debe ser más alta que la necesaria para cumplir las funciones.

Basados en el modelo de ley exponencial se obtuvieron valores de n y k , índice de ley exponencial e índice de consistencia respectivamente. Estos valores solo son pertinentes cuando están relacionados con una velocidad de corte específica, para el caso se trabajó con velocidades altas ($\Theta 600$, $\Theta 300$), medias ($\Theta 200$, $\Theta 100$), bajas ($\Theta 6$, $\Theta 3$):

Tabla 21. Valores de n y k formulación emulsión firme 80/20 aceite mineral

ACEITE MINERAL			
nb	0.222	kb	4.176
nm	0.606	km	1.951
na	0.891	ka	0.373

Fuente: Los autores.

Tabla 22. Valores de n y k formulación emulsión firme 80/20 aceite Diesel.

DIESEL			
nb	0.289	kb	5.615
nm	0.459	km	1.511
na	0.621	ka	0.539

Fuente: Los autores.

Las *tablas 21, 22* muestran valores de índice ley exponencial “n” e índice de consistencia “k” para los dos lodos base mineral y diesel relacionados a tres velocidades de corte que están denominadas como bajas, medias y altas. Los datos obtenidos para las formulaciones muestran de manera general que ambos fluidos se comportan como fluidos no newtonianos ya que los valores de “n” estuvieron menores a 1 para ambos casos; como también se había observado anteriormente en la *gráfica 2* estos disminuyen su viscosidad con la velocidad de corte.

FORMULACIÓN FILTRADO FIRME

Retorta diesel 80/20 y 60/40



Retorta aceite mineral 80/20



Retorta aceite mineral 60/40



Agitación formulación 80/20

Mineral y diesel



Tabla 23. Reología formulación firme 60/40

ACEITE MINERAL GRADO TECNICO					DIESEL			
RPM	VARIABLE	V (1/s)	θ RPM lb/100 ft ²	μ efectiva (Cp)	VARIABLE	V (1/s)	θ RPM lb/100 ft ²	μ efectiva (Cp)
600	θ 600	1020	253	126.5	θ 600	1020	80	40
300	θ 300	510	145	145	θ 300	510	55	55
200	θ 200	340	104	156	θ 200	340	37	55.5
100	θ 100	170	59	177	θ 100	170	34	102
6	θ 6	10.2	11	550	θ 6	10.2	21	1050
3	θ 3	5.1	8	800	θ 3	5.1	20	2000

Fuente: Los autores.

Tabla 24. Propiedades reológicas formulación emulsión firme 60/40.

PROPIEDADES	UNIDADES	ACEITE MINERAL	DIESEL
VP	Cp	108	25
VA	Cp	126.5	40
YP	lb/100 ft ²	37	30
Filtrado API	ml	5.3	1.2
Resistencia Gel 10 s.	lb/100 ft ²	11	20
Resistencia Gel 10 m.	lb/100 ft ²	15	23
Densidad	LPG	7.25	7.2
		inconsistente	Inconsistente
Cake		plástica	Plástica
		<1/32	<1/32

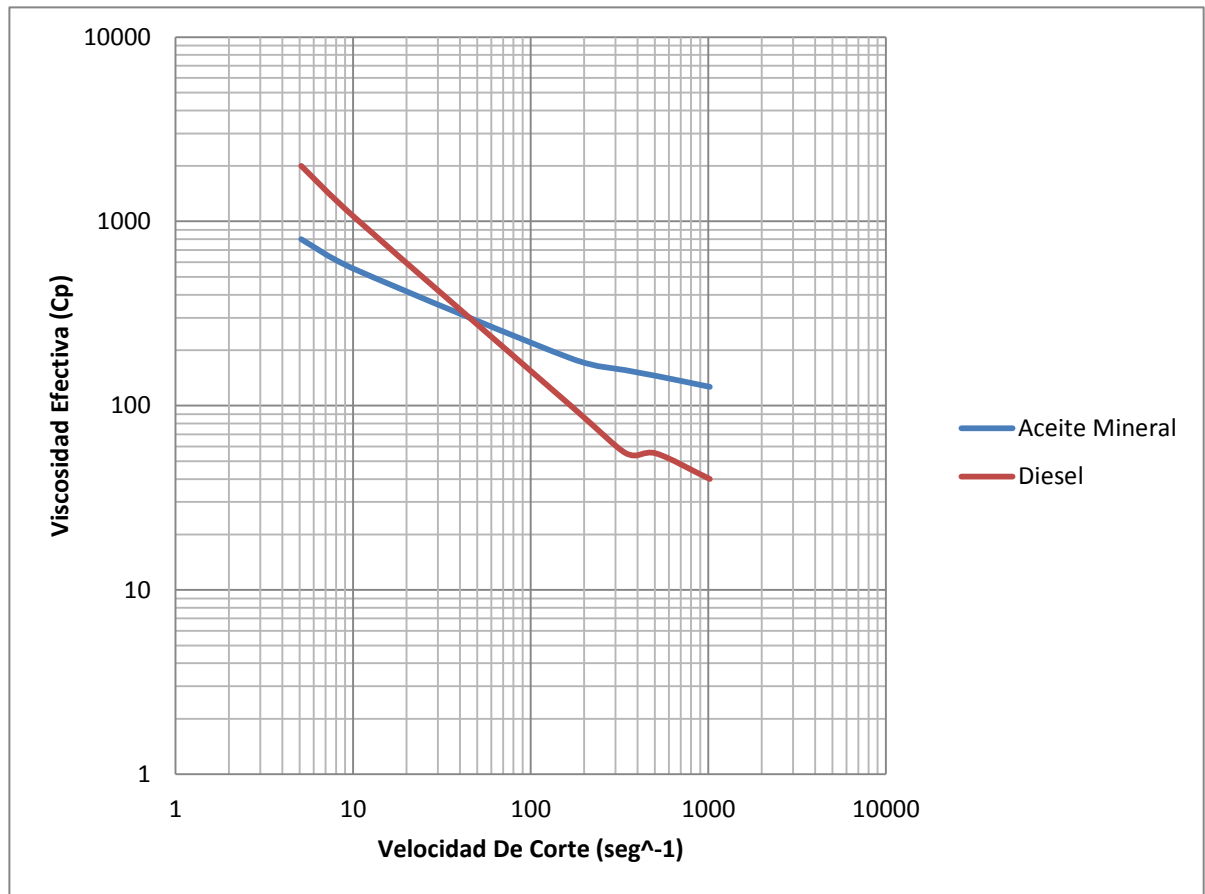
Fuente: Los autores.

La *tabla 24* reporta los datos de pérdida de filtrado para los dos lodos base mineral y diesel estos representan que a altas proporciones de agua el diesel tiene menores pérdidas de filtrado que el aceite mineral el cual a pesar de que su valor reportado es menor a 7 ml tiene mayor tendencia a permitir pérdidas hacia la formación, lo cual pone en riesgo la integridad del pozo cuando el fluido sea expuesto a condiciones reales de perforación, en base a lo que se busca principalmente de un tipo de formulación filtrado firme.

En general los comportamientos de este tipo de emulsión están relacionados con la formulación anterior, cabe hacer algunos señalamientos empezando que para este tipo de formulación debido a su alto contenido de agua las viscosidades

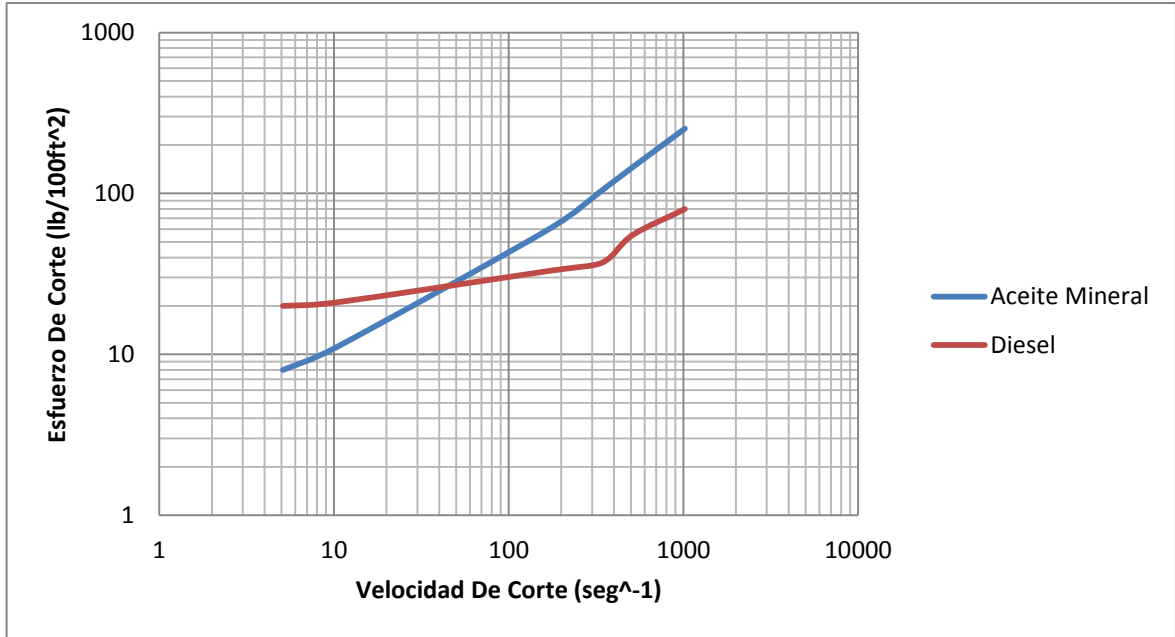
resultantes son más altas que las reportadas para la emulsión 80/20 y así el punto cedente, viscosidad plástica, viscosidad aparente y esfuerzos de gel para ambos casos, como lo reporta la *tabla 24*. Debido a los altos valores de viscosidad y los demás valores obtenidos para esta formulación se decide llevar a cabo las formulaciones siguientes únicamente en una proporción 80/20 excepto la formulación alto contenido de agua.

Gráfica 6. Velocidad De Corte (seg^{-1}) vs Viscosidad Efectiva (Cp)



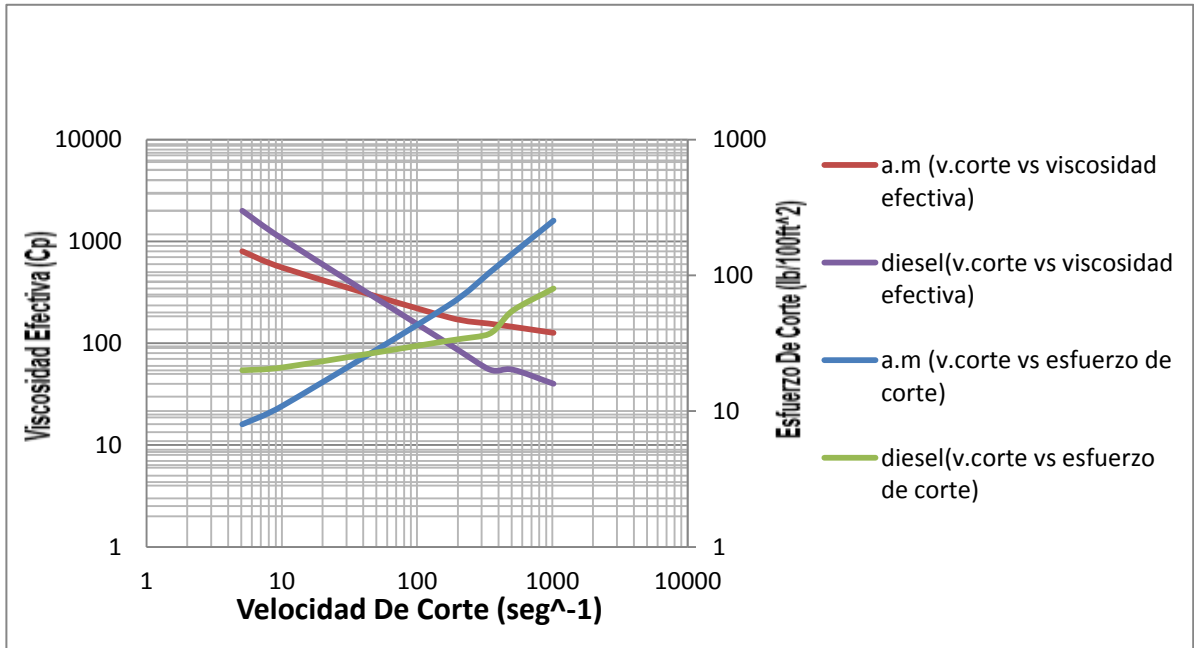
Fuente: Los autores.

Gráfica 7. Velocidad De Corte (seg^{-1}) vs Esfuerzo De Corte ($\text{lb}/100\text{ft}^2$)



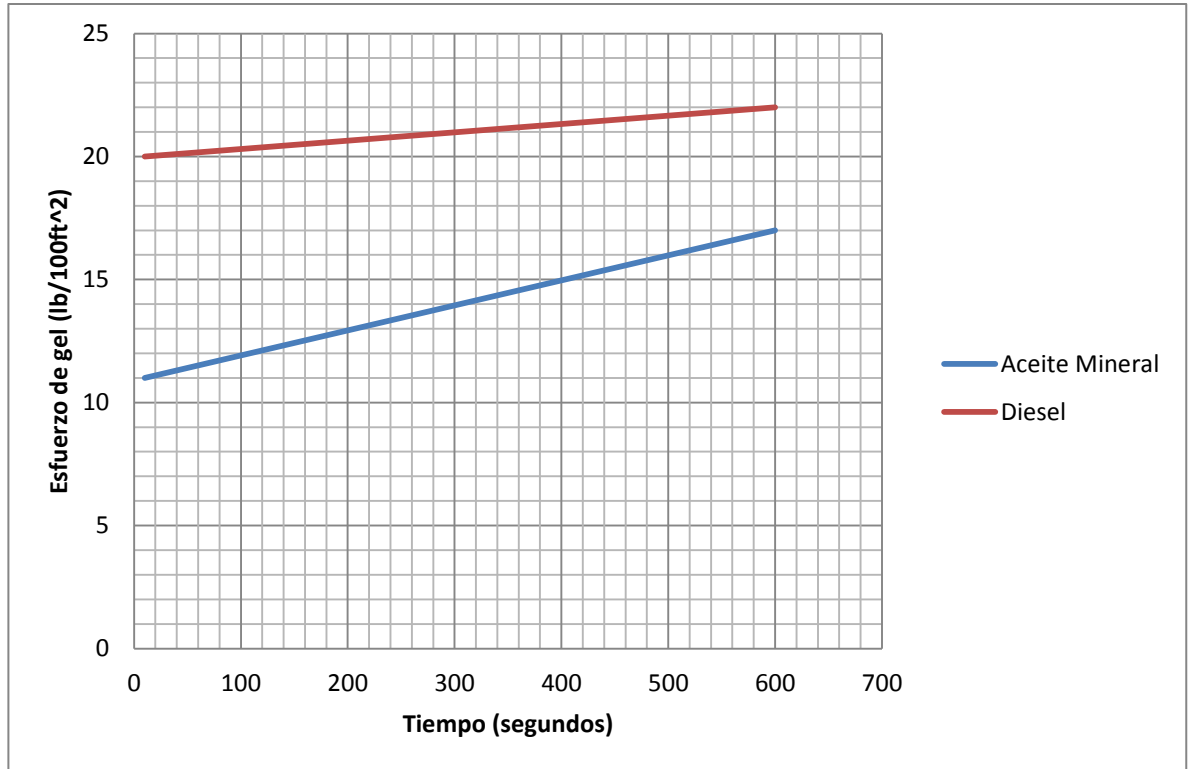
Fuente: Los autores.

Gráfica 8. Velocidad De Corte (seg^{-1}) vs Esfuerzo De Corte ($\text{lb}/100\text{ft}^2$) y Viscosidad Efectiva (Cp)



Fuente: Los autores.

Gráfica 9. Tiempo (segundos) vs Esfuerzo de gel (lb/100ft²)



Fuente: Los autores.

Las *gráficas 6, 7, 8 y 9* muestran que el comportamiento para esta emulsión estuvo muy relacionado con la formulación 80/20 en diferentes valores pero con un comportamiento muy similar el cual cómo es posible ver en los gráficos el lodo base mineral desarrolla viscosidades más altas con la velocidad de corte que las mostradas por el diesel y a bajas velocidades de corte se comportaron inversamente lo cual representa y corrobora el análisis que se hizo anteriormente y demuestra que el fluido aceite mineral tiene pésimas posibilidades de desarrollar altas tasas de penetración debido a sus altas viscosidades, las cuales generan altos esfuerzos de corte que generan desgaste en el equipo, por otra parte su eficiencia de limpieza de pozo es deficiente ya que bajas tasas de corte no desarrolla viscosidades suficientes que permitan subir los recortes y tampoco suspender el material cuando la perforación se haya interrumpido.

Basados en el modelo de ley exponencial se obtuvieron valores de n y k, índice de ley exponencial e índice de consistencia respectivamente. Estos valores solo son pertinentes cuando están relacionados con una velocidad de corte específica, para el caso se trabajó con velocidades altas ($\Theta 600$, $\Theta 300$), medias ($\Theta 200$, $\Theta 100$), bajas ($\Theta 6$, $\Theta 3$):

Tabla 25. Valores de n y k formulación emulsión firme 60/40 aceite mineral

ACEITE MINERAL			
nb	0.459431619	Kb	3.784511905
nm	0.793549123	Km	1.01901474
na	0.803084485	Ka	0.970421484

Fuente: Los autores.

Tabla 26. Valores de n y k formulación emulsión firme 60/40 aceite Diesel.

DIESEL			
nb	0.070389328	Kb	17.83300809
nm	0.165059246	Km	14.13701511
na	0.540568381	Ka	1.891193045

Fuente: Los autores.

FORMULACIÓN FILTRADO RELAJADO

REOLOGÍA FORMULACIÓN RELAJADO 80/20

Tabla 27. Reología formulación filtrado relajado 80/20.

ACEITE MINERAL GRADO TECNICO					DIESEL			
RPM	VARIABLE	V (1/s)	θ RPM lb/100 ft ²	μ efectiva (Cp)	VARIABLE	V (1/s)	θ RPM lb/100 ft ²	μ efectiva (Cp)
600	θ 600	1020	145	72.5	θ 600	1020	33	16.5
300	θ 300	510	80	80	θ 300	510	20	20
200	θ 200	340	55	82.5	θ 200	340	16	24
100	θ 100	170	31	93	θ 100	170	10	30
6	θ 6	10.2	5	250	θ 6	10.2	8	400
3	θ 3	5.1	4	400	θ 3	5.1	6	600

Fuente: Los autores.

Tabla 28. Propiedades reológicas formulación filtrado relajado 80/20

PROPIEDADES	UNIDADES	ACEITE MINERAL	DIESEL
VP	Cp	65	13
VA	Cp	72.5	16.5
YP	lb/100 ft ²	15	7
Filtrado API	ml	5.5	3.5
Resistencia Gel 10 s.	lb/100 ft ²	4	5
Resistencia Gel 10 m.	lb/100 ft ²	9	6
Densidad	LPG	6.9	6.5
Cake		inconsistente	Inconsistente
		plástica	Plástica
		<1/32	<1/32

Fuente: Los autores.

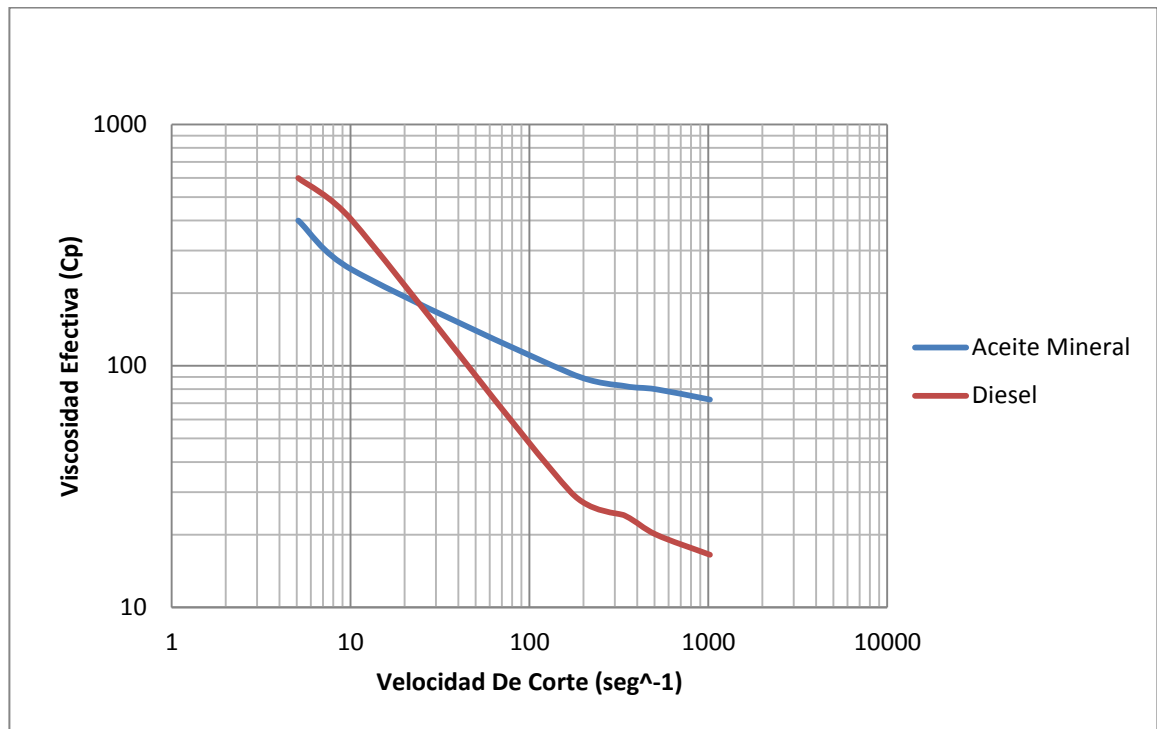
La *tabla 28* muestra los datos de pérdida de filtrado para los dos lodos base mineral y base diesel, de esta se puede apreciar que los valores para el mineral estuvieron por encima a los reportados para el diesel.

Las densidades reportadas en la *tabla 28* muestran que para el aceite mineral es mayor que para el diesel, lo cual representa que debido a que el aceite mineral en estado natural es más denso que el diesel y al no haber presencia de un material densificante esta sigue siendo mayor aunque no desproporcionadamente.

Siguiendo con el estudio reológico y empezando con la viscosidad plástica (v_p) reportada en la *tabla 28* para los dos casos es posible notar que la diferencia es del 80% lo cual refleja para el lodo base mineral una mayor afectación por la concentración de sólidos, relación sintético/agua, la viscosidad de la fase continua. Otro parámetro importante en el análisis reológico es la viscosidad aparente, en la *tabla 28* se reportan los valores para la formulación aceite mineral y diesel, los valores reportados muestran que la viscosidad a altas velocidades de corte es mayor en casi un 77% comparada con la obtenida para el lodo base diésel.

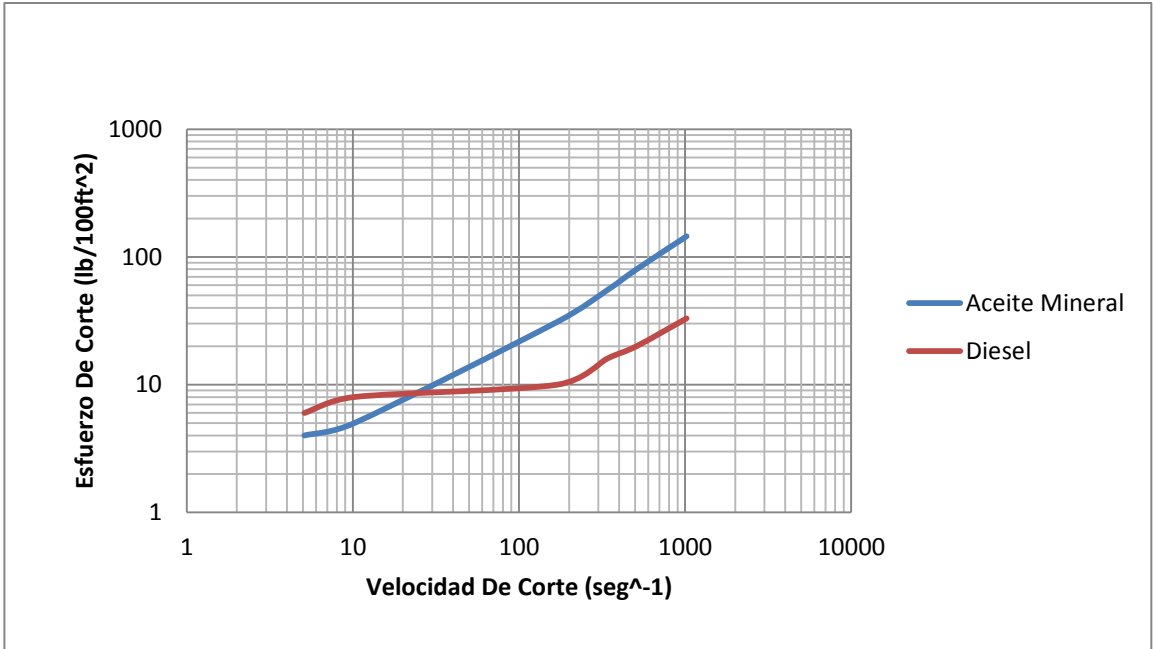
La *tabla 28* muestra valores de punto cedente para los dos casos base mineral y base diesel para ambos casos se observa que la variación entre un dato y el otro es del 53%.

Gráfica 10. Velocidad De Corte (seg^{-1}) vs Viscosidad Efectiva (Cp)



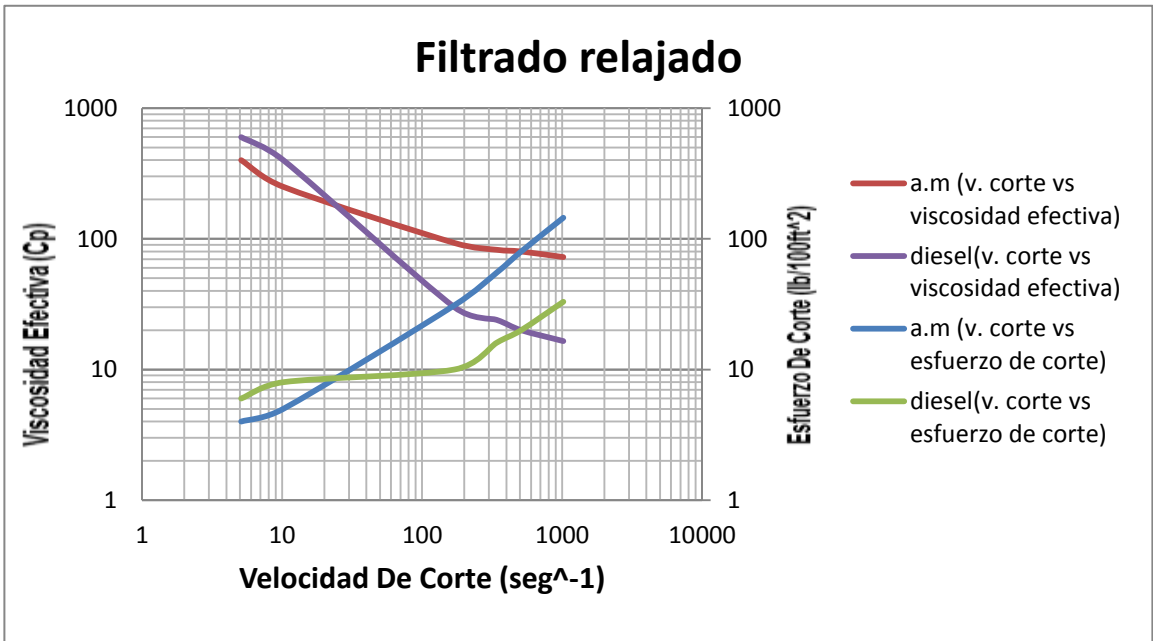
Fuente: Los autores.

Gráfica 11. Velocidad De Corte (seg⁻¹) vs Esfuerzo De Corte (lb/100ft²)



Fuente: Los autores.

Gráfica 12. Velocidad De Corte (seg⁻¹) vs Esfuerzo De Corte (lb/100ft²) y Viscosidad Efectiva (Cp)

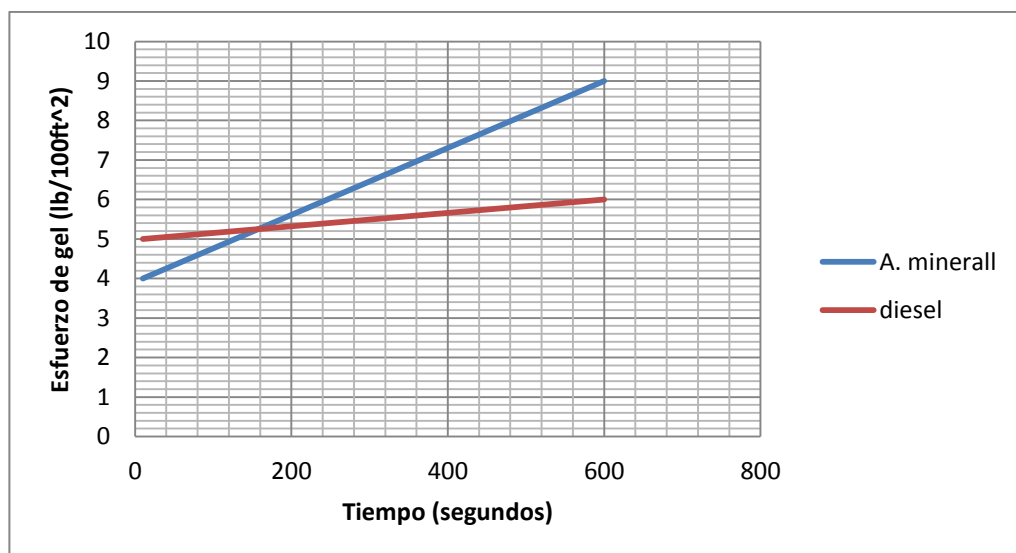


Fuente: Los autores.

Las *gráficas 10, 11 y 12* muestran para un sistema filtrado relajado el comportamiento de viscosidades, esfuerzos de corte y velocidades de corte para los dos fluidos traídos a relación base mineral y diesel de una manera general se puede decir que para ambos casos la *gráfica 12* evidencia que su comportamiento es de fluidos de perforación al disminuir su viscosidad con la velocidad de corte.

Sin embargo también es posible notar en la *gráfica 10* que dicha disminución no es proporcional para los dos fluidos, para el aceite mineral y dándole una línea de tendencia potencial a los datos se obtiene un valor de exponente de decremento menor de la mitad que el obtenido a partir del fluido base diesel, de esta manera mientras que para la formulación con diesel su reducción de viscosidad con la velocidad de corte es de 10 Cp para el aceite mineral será menor que 5cp, este comportamiento representa la baja capacidad de un fluido base mineral a disminuir su viscosidad con el esfuerzo de corte lo cual no es favorable ya que lo que se busca es que esta disminuya a altas velocidades de corte y a bajas desarrolle sus máximas.

Gráfica 13. Tiempo (segundos) vs Esfuerzo de gel (lb/100ft²)



Fuente: Los autores.

Los esfuerzos de gel obtenidos para el lodo base mineral como se percibe en la *gráfica 13* muestran un cambio de magnitud en 100 segundos de (0.0085 lb/100²) respecto al valor para el diesel (0.0017 lb/100²) de esta manera cabe señalar que la gelificación si bien no debe ser más alta que la necesaria para cumplir las funciones, para el caso de aceite mineral se presenta un tipo de gelificación progresiva (fuerte) en la cual los esfuerzos de gel tienden a incrementar progresivamente con el tiempo en 5 veces comparado con el diesel, (por ejemplo si para el diesel en 100 segundos su esfuerzo de gel aumento 1 lb/100² para el aceite mineral este aumento será de 5 lb/100²) este tipo de gelificación es poco deseado ya que ocasiona altas tasas de bombeo para romper la circulación, pérdida de circulación y suabeo en el pozo.

Basados en el modelo de ley exponencial se obtuvieron valores de n y k, índice de ley exponencial e índice de consistencia respectivamente. Estos valores solo son pertinentes cuando están relacionados con una velocidad de corte específica, para el caso se trabajó con velocidades altas ($\Theta 600$, $\Theta 300$), medias ($\Theta 200$, $\Theta 100$), bajas ($\Theta 6$, $\Theta 3$):

Tabla 29. Valores de n y k formulación filtrado relajado 80/20 aceite mineral

ACEITE MINERAL			
nb	0.3219	kb	2.3674
nm	0.8271	km	0.4430
na	0.8579	ka	0.3802

Fuente: Los autores.

Tabla 30. Valores de n y k formulación filtrado relajado 80/20 aceite Diesel.

DIESEL			
nb	0.4150	kb	3.0512
nm	0.6780	km	0.3073
na	0.7224	ka	0.221

Fuente: Los autores.

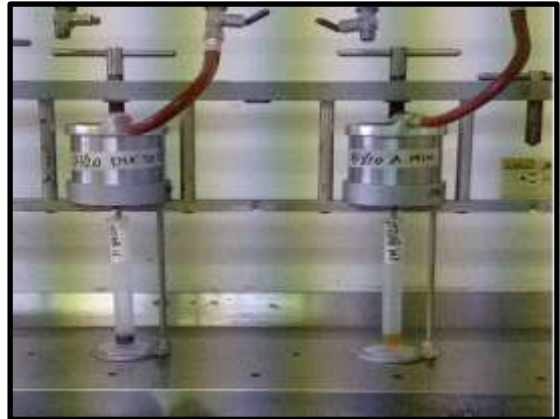
Las *tablas 29 y 30* muestran valores de índice ley exponencial “n” e índice de consistencia “k” para los dos lodos base mineral y diesel relacionados a tres velocidades de corte que están denominadas como bajas, medias y altas. Los datos obtenidos para las formulaciones muestran de manera general que ambos fluidos se comportan como fluidos no newtonianos ya que los valores de “n” estuvieron menores a 1 para ambos casos, como también se había observado anteriormente en la *gráfica 10* estos disminuyen su viscosidad con el esfuerzo de corte.

FORMULACIÓN FILTRADO RELAJADO

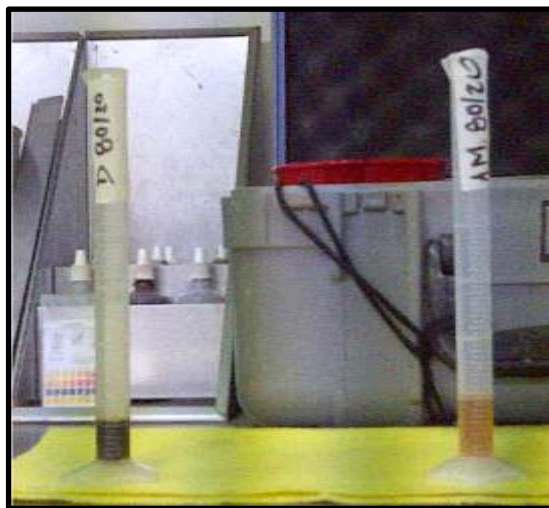
**Proceso de preparación de los lodos
80/20 mineral y diesel**



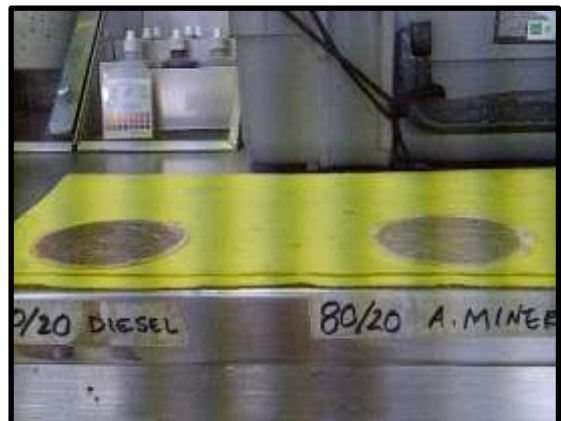
Prueba de filtrado API



**Filtrado obtenido para los dos lodos
base mineral y diesel**



Retortas diesel y aceite mineral



FORMULACIÓN ALTO CONTENIDO DE AGUA

Tabla 31. Reología formulación alto contenido de agua 40/60.

ACEITE MINERAL GRADO TECNICO					DIESEL			
RPM	VARIABLE	V (1/s)	θ RPM lb/100 ft ²	μ efectiva (Cp)	VARIABLE	V (1/s)	θ RPM lb/100 ft ²	μ efectiva (Cp)
600	θ 600	1020	363	182	θ 600	1020	80	40
300	θ 300	510	204	204	θ 300	510	46	46
200	θ 200	340	176	264	θ 200	340	33	50
100	θ 100	170	100	300	θ 100	170	19	57
6	θ 6	10.2	9	450	θ 6	10.2	5	250
3	θ 3	5.1	6	600	θ 3	5.1	4	400

Fuente: Los autores.

Tabla 32. Propiedades reológicas formulación alto contenido de agua 40/60.

PROPIEDADES	UNIDADES	ACEITE MINERAL	DIESEL
VP	Cp	159	34
VA	Cp	182	40
YP	lb/100 ft ²	45	12
Filtrado API	ml	5.5	1.1
Resistencia Gel 10 s.	lb/100 ft ²	8	9
Resistencia Gel 10 m.	lb/100 ft ²	21	12
Densidad	LPG	7.22	7
		Inconsistente	Inconsistente
Cake		Plástica	Quebradiza
		=2/32"	<1/32

Fuente: Los autores.

La *tabla 32* muestra datos de pérdida de filtrado para los dos lodos base mineral y diesel de ella se puede ver que el valor reportado para el caso de aceite mineral a pesar de que está dentro del nivel que recomienda la literatura inferior a 7 ml, está desviado del obtenido a partir del lodo de referencia.

Analizando las características del cake reportada en la *tabla 32* la retorta para el lodo aceite mineral tuvo mayor espesor lo que pudo ser debido a sus altas

perdidas de filtrado o la precipitación de algún aditivo durante la prueba de filtrado API.

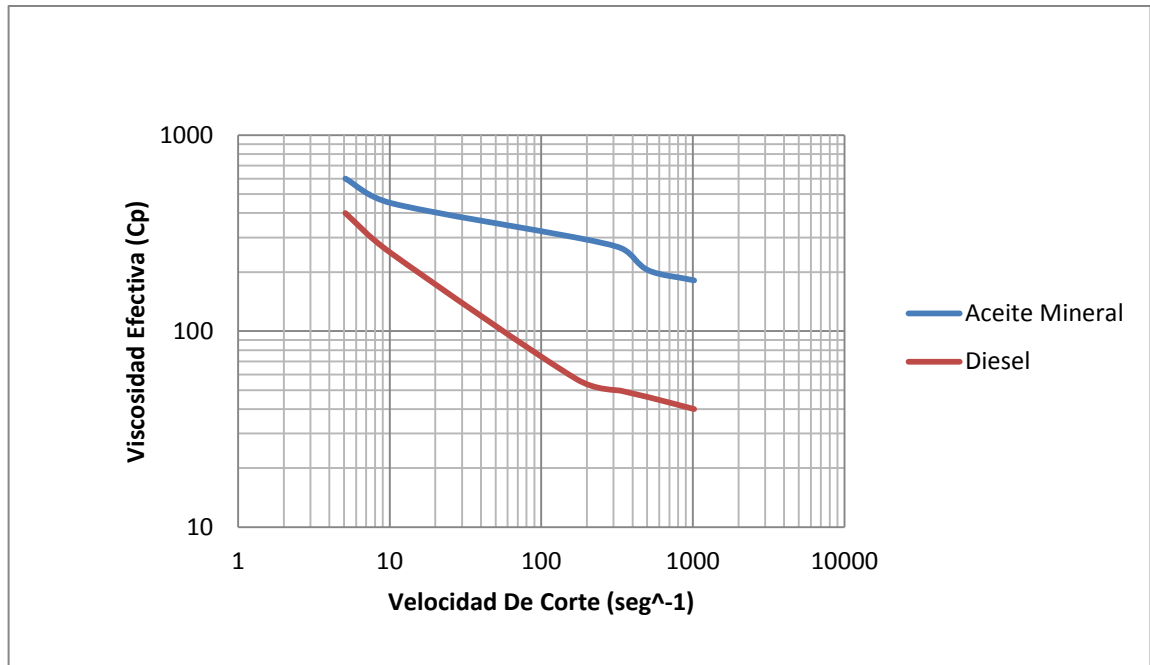
Las densidades reportadas en la *tabla 32* muestran que esta se mantiene mayor para el lodo base mineral, recordemos que este presenta mayor densidad en su estado natural y durante las pruebas no se utilizó ningún tipo de agente densificante.

El estudio de la reología nos proporciona la deformación y como se presenta el flujo para un tipo de sistema alto contenido de agua, empezando con el valor reportado en la *tabla 32* para viscosidad plástica (vp) el cual estuvo para el lodo mineral arriba en cerca de un 79% comparado con el obtenido para el lodo de referencia, es importante notar que este valor es un indicativo crucial del comportamiento de la viscosidad altas velocidades de corte de que tan bajo se mantenga depende la cantidad de energía suministrada a la barrena, de la disminución en uso y desgaste de los equipos, mejoras del flujo en el espacio anular para la limpieza del pozo.

Otro parámetro reológico importante en el comportamiento de la viscosidad a altas velocidades de corte es la viscosidad aparente (va), los valores reportados en la *tabla 32* muestran que para el aceite mineral está por encima en un 78% comparado con el lodo diesel.

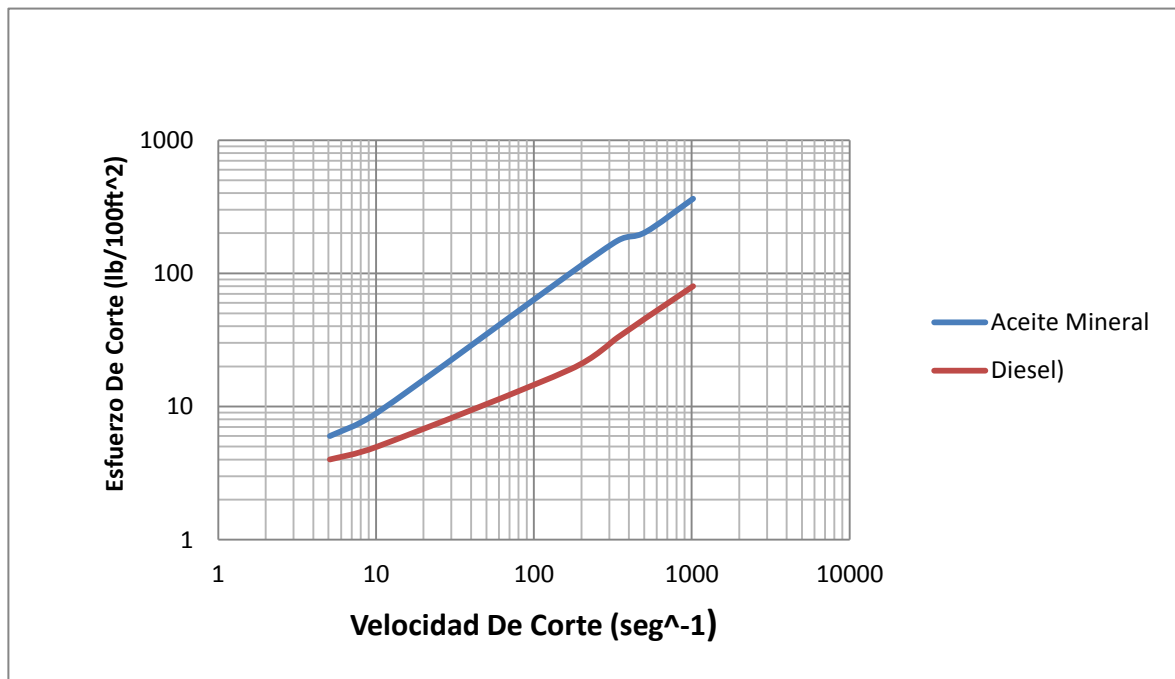
El punto cedente es un parámetro que describe de una manera subjetiva la capacidad de limpieza del fluido, de suspensión de material densificante y los recortes, la *tabla 32* muestra valores para ambos casos siendo el lodo aceite mineral el que desarrolla el valor más alto lo cual no representa que este fluido tenga mejores características.

Gráfica 14. Velocidad De Corte (seg^{-1}) vs Viscosidad Efectiva (Cp)



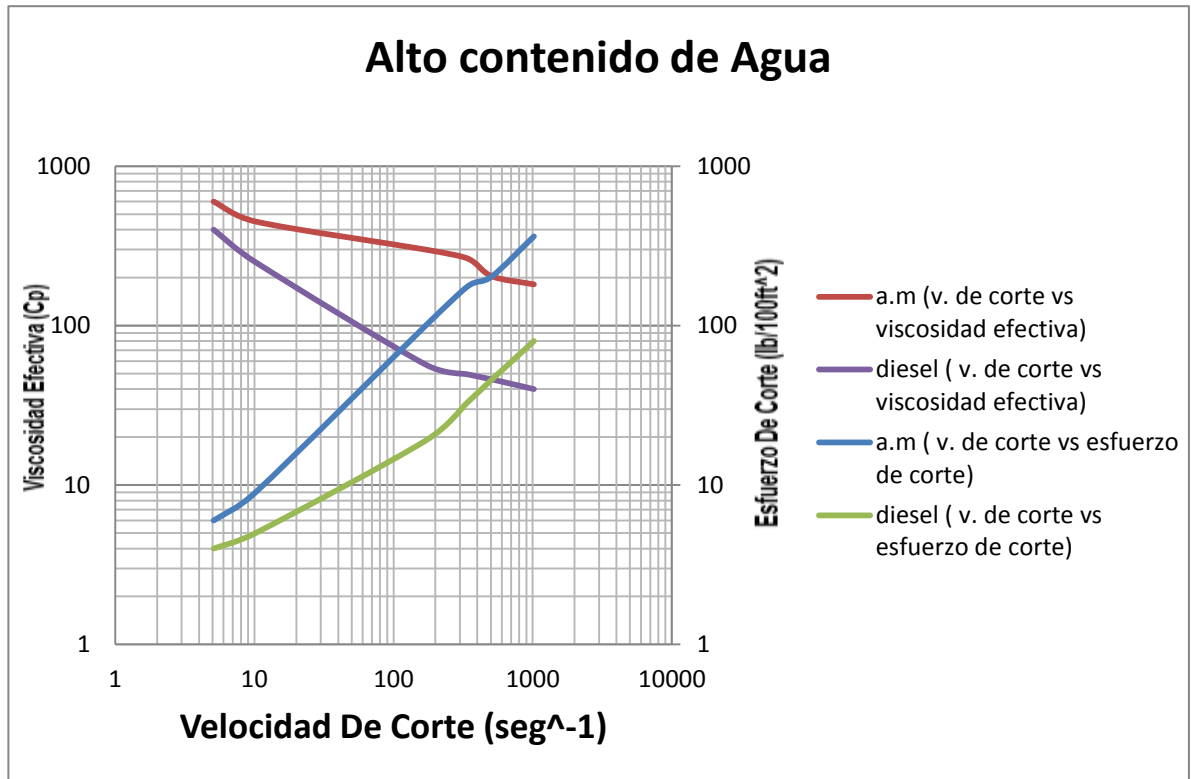
Fuente: Los autores.

Gráfica 15. Velocidad De Corte (seg^{-1}) vs Esfuerzo De Corte ($\text{lb}/100\text{ft}^2$)



Fuente: Los autores.

Gráfica 16. Velocidad De Corte (seg^{-1}) vs Esfuerzo De Corte ($\text{lb}/100\text{ft}^2$) Y Viscosidad Efectiva (C_p)

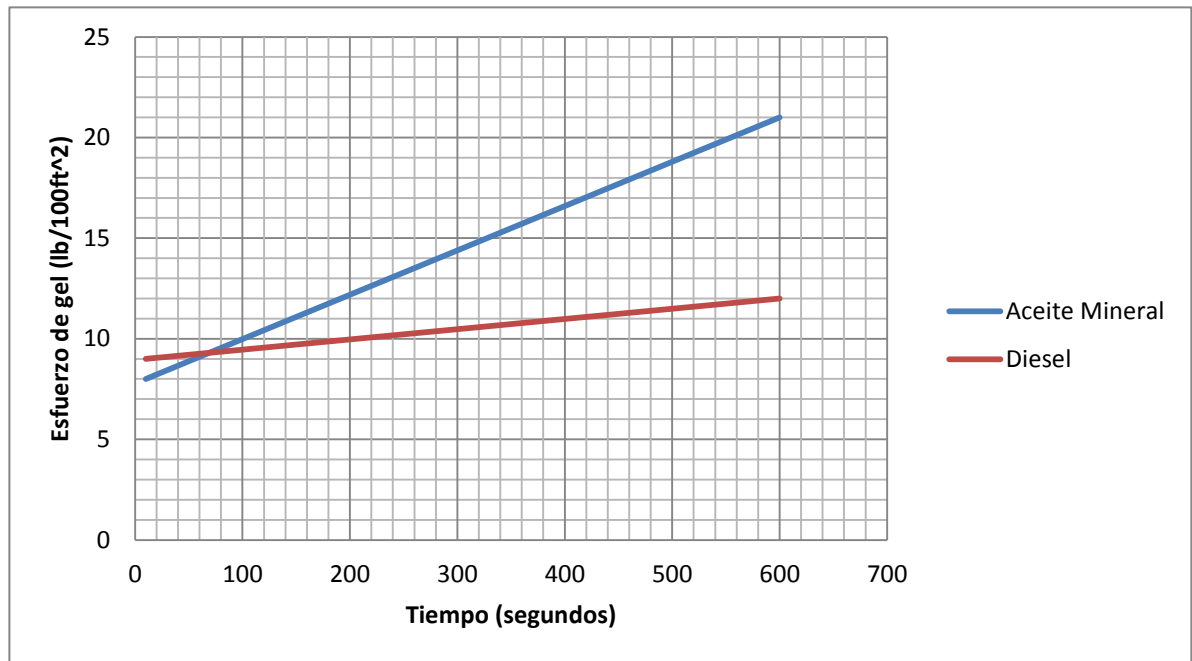


Fuente: Los autores.

Las gráficas 14, 15 y 16 muestran los comportamientos de viscosidad, esfuerzo de corte y velocidad de corte, de la gráfica 14 se observa como varia la viscosidad efectiva para los dos casos con la velocidad de corte, para el lodo base mineral esta variación es casi que gradual lo que representa que la viscosidad decrece muy levemente a medida que las velocidades de corte se hacen mayores lo cual no sucede con el lodo base diesel el cual a aumentos pequeños se logran tasas de decremento en la viscosidad mayores de tal forma que al darle una tendencia potencial a los datos el exponente de decremento para el fluido base diesel es mayor en 2.16 veces lo cual representa que para un mismo aumento en la

velocidad de corte para ambos casos por cada 2.17 Cp de disminución en la viscosidad el aceite mineral lo hace 1 cp.

Gráfica 17. Tiempo (segundos) vs Esfuerzo de gel (lb/100ft²)



Fuente: Los autores.

La *gráfica 17* al trazar una tendencia lineal para ambos casos permite percibir el comportamiento para los dos fluidos, en ella se observa que la tasa de incremento desarrollada para el aceite mineral es superior en 4.3 veces la obtenida para el aceite diesel (por ejemplo si el incremento para el lodo diesel fue de 1 (lb/100 ft²) el lodo aceite mineral lo hace en 4.3 (lb/100 ft²)), cabe señalar que este valor no debe ser lo suficientemente alto más que el necesario para mantener el material suspendido, visto de esta forma el lodo mineral experimenta una gelificación de tipo progresiva (fuerte) la cual no es deseable ya que aumentos de los esfuerzos de gel excesivos con el tiempo no son deseados debido a las altas tasas de energía que hay que suministrar para romper circulación entre otros efectos.

Basados en el modelo de ley exponencial se obtuvieron valores de n y k , índice de ley exponencial e índice de consistencia respectivamente. Estos valores solo son pertinentes cuando están relacionados con una velocidad de corte específica, para el caso se trabajó con velocidades altas ($\Theta 600$, $\Theta 300$), medias ($\Theta 200$, $\Theta 100$), bajas ($\Theta 6$, $\Theta 3$):

Tabla 33. Valores de n y k formulación alto contenido de agua 40/60 aceite Mineral

ACEITE MINERAL			
nb	0.5849	Kb	2.3133
nm	0.8155	Km	1.5167
na	0.8314	Ka	1.1443

Fuente: Los autores.

Tabla 34. Valores de n y k formulación alto contenido de agua 40/60 aceite Diesel.

DIESEL			
nb	0.3219	Kb	2.3674
nm	0.7964	Km	0.3178
na	0.7983	Ka	0.3170

Fuente: Los autores.

Las *tablas 33, y 34* muestran valores de índice ley exponencial “ n ” e índice de consistencia “ k ” para los dos lodos base mineral y diesel relacionados a tres velocidades de corte que están denominadas como bajas, medias y altas. Los datos obtenidos para las formulaciones muestran de manera general que ambos fluidos se comportan como fluidos no newtonianos ya que los valores de “ n ” estuvieron menores a 1 para ambos casos.

FORMULACIÓN ALTO CONTENIDO DE AGUA

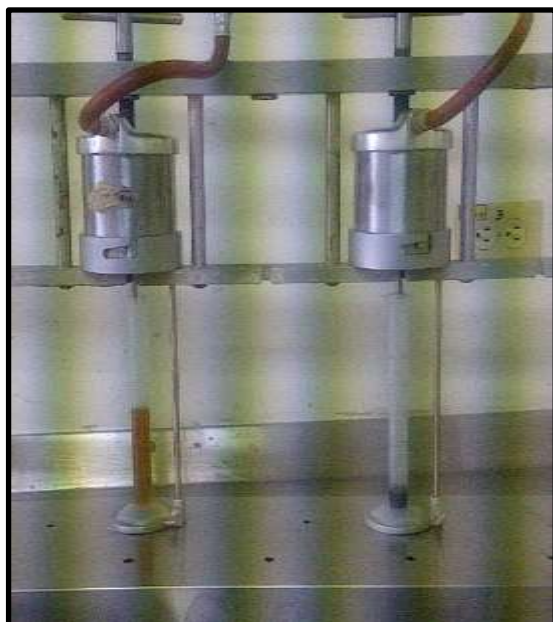
Lodo base mineral



Filtrado API diesel y aceite mineral



Prueba de filtrado API



Retorta aceite diesel y aceite mineral



FORMULACIÓN 100% ACEITE

Tabla 35. Reología formulación 100% aceite.

ACEITE MINERAL GRADO TECNICO					DIESEL			
RPM	VARIABLE	V (1/s)	θ RPM lb/100 ft ²	μ efectiva (Cp)	VARIABLE	V (1/s)	θ RPM lb/100 ft ²	μ efectiva (Cp)
600	θ 600	1020	90	45	θ 600	1020	57	29
300	θ 300	510	47	47	θ 300	510	36	36
200	θ 200	340	34	51	θ 200	340	29	44
100	θ 100	170	22	66	θ 100	170	24	72
6	θ 6	10.2	4	200	θ 6	10.2	16	800
3	θ 3	5.1	3	300	θ 3	5.1	13	1300

Fuente: Los autores.

Tabla 36. Propiedades reológicas formulación 100% aceite.

PROPIEDADES	UNIDADES	ACEITE MINERAL	DIESEL
VP	Cp	43	21
VA	Cp	45	29
YP	lb/100 ft ²	4	15
Filtrado API	MI	53.8	6.8
Resistencia Gel 10 s.	lb/100 ft ²	11	12
Resistencia Gel 10 m.	lb/100 ft ²	13	18
Densidad	LPG	7.1	6.8
		consistente	Inconsistente
Cake		quebradiza	Plástica
		2/32"	<1/32

Fuente: Los autores.

La *tabla 36* muestra resultados de perdida de filtrado API para ambos casos tanto aceite mineral como lodo aceite diesel, los resultados muestran perdidas excesivas de fluido para el aceite mineral superiores casi 9 veces a las permisibles que reporta la literatura de 7 ml, para el aceite de referencia diesel estuvieron en un rango óptimo.

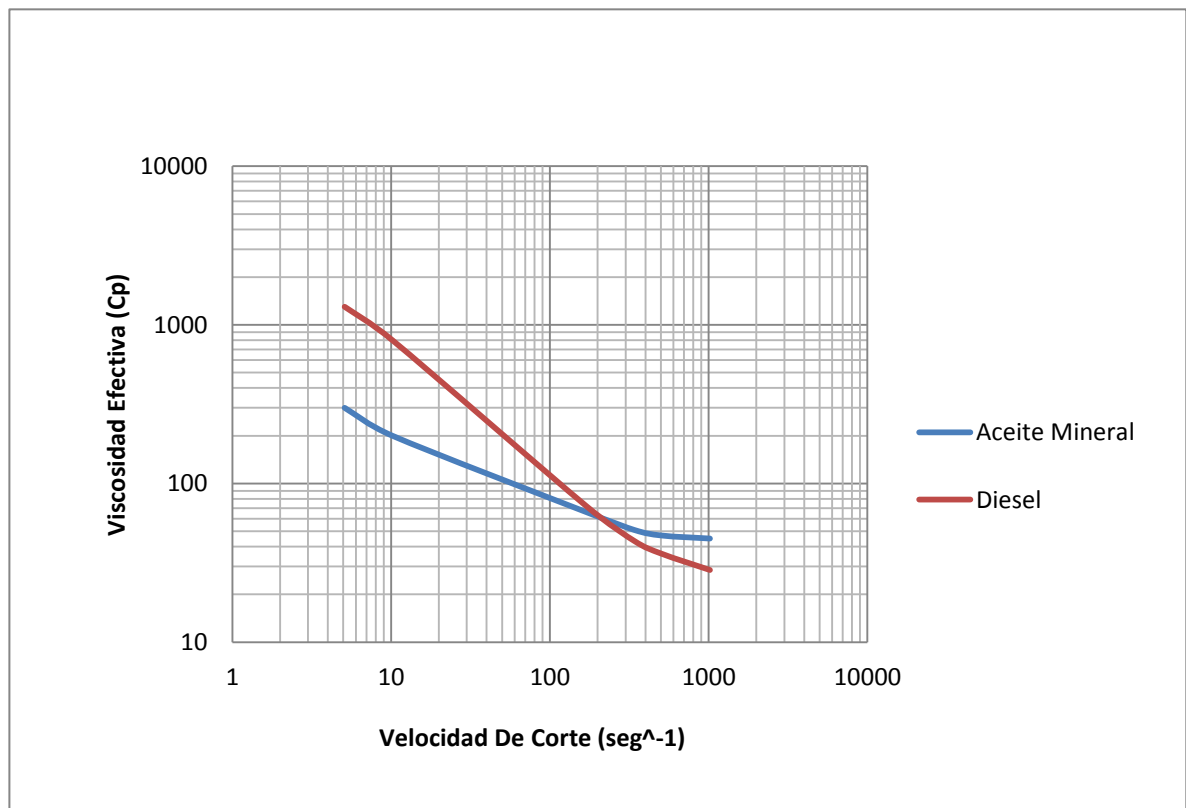
Con respecto a las densidades mostradas en la *tabla 36* se observa que la densidad de la emulsión aceite mineral es mayor esto se debe a que este fluido en estado natural es decir sin la adición de agentes químicos (emulsificantes, viscosificantes, controladores de filtrado etc.) resulta ser mayor que la del diesel de referencia.

los datos reportados por la *tabla 36* para la viscosidad plástica (VP) la cual para el aceite mineral resulto ser mayor en más de dos veces la obtenida para el lodo de referencia, el exceso de este valor refleja que el grado de afectación por la concentración de solidos resultado de los aditivos agregados, y la más importante la viscosidad de la fase continua es mayor para el fluido base mineral en estado

natural lo cual indica que un fluido de este tipo presentara viscosidades altas en relación al lodo de referencia. Otro parámetro importante en el análisis reológico es la viscosidad aparente, en la *tabla 36* se reportan los valores para la formulación aceite mineral y diesel, los valores reportados muestran que la viscosidad a altas velocidades de corte es mayor en casi un 36% comparada con la obtenida para el lodo base diesel.

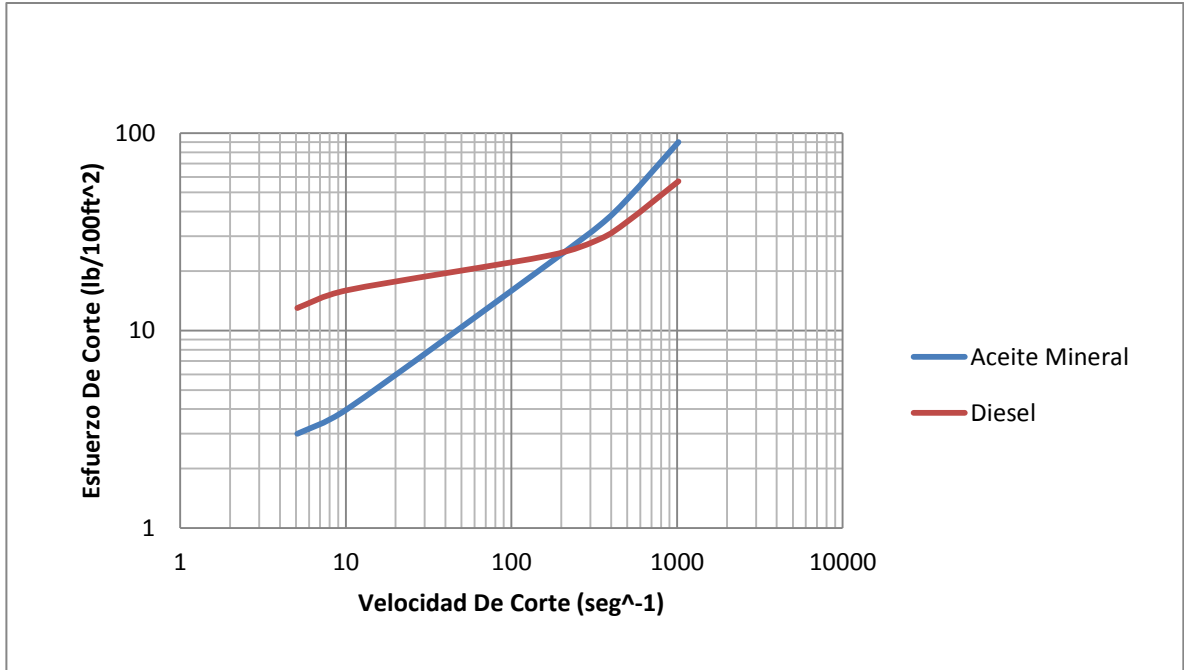
El punto cedente reportado en la *tabla 36* muestra que para el fluido aceite mineral estuvo muy por debajo en lo que referenció el fluido diesel a pesar de que este como se trató anteriormente no tiene mucha relevancia en la suspensión del material y los recortes, un punto cedente tan bajo, más de tres veces menor que el obtenido para el diesel tiene implicaciones en el desempeño del fluido de perforación

Gráfica 18. Velocidad De Corte (seg^{-1}) vs Viscosidad Efectiva (Cp)



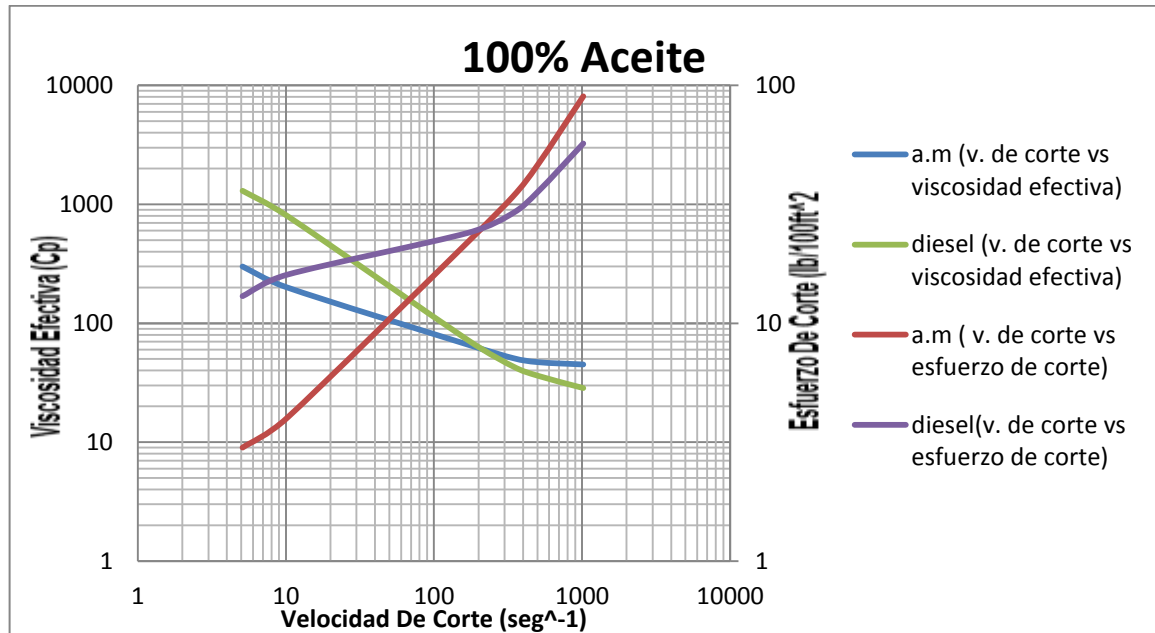
Fuente: Los autores.

Gráfica 19. Velocidad De Corte (seg⁻¹) vs Esfuerzo De Corte (lb/100ft²)



Fuente: Los autores.

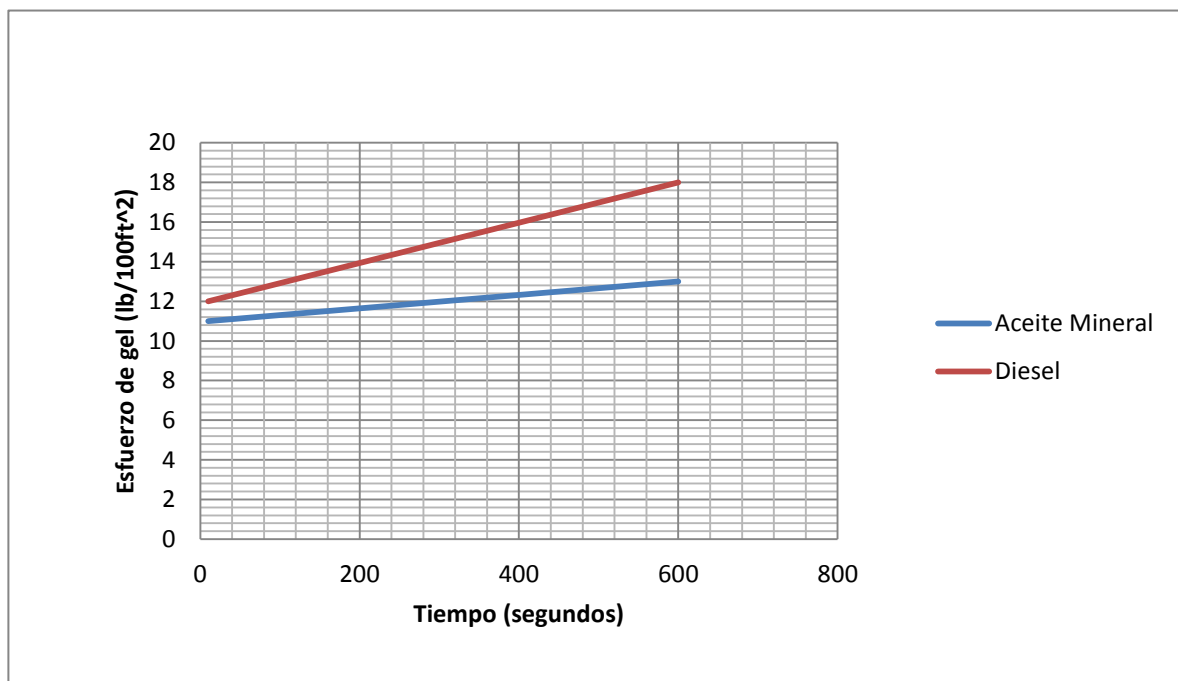
Gráfica 20. Velocidad De Corte (seg⁻¹) vs Esfuerzo De Corte (lb/100ft²) y Viscosidad Efectiva (Cp)



Fuente: Los autores.

Las *gráficas 18, 19 y 20* muestran el comportamiento de la viscosidad efectiva, esfuerzos de corte en función de la velocidad de corte para los dos lodos, en la *gráfica 18* se aprecia el cambio de viscosidad con la velocidad de corte para ambos casos, aunque ambos fluidos disminuyen su viscosidad con la velocidad de corte el aceite mineral lo hace de una manera más lenta, a pesar de que este parte de viscosidades más pequeñas a velocidades de corte bajas, comparado con el lodo base diesel el cual presenta una tasa mayor de decremento y este desarrolla viscosidades más altas a velocidades de corte bajas.

Gráfica 21. Tiempo (segundos) vs Esfuerzo de gel ($\text{lb}/100\text{ft}^2$)



Fuente: Los autores.

Los esfuerzos de gel obtenidos para el lodo base mineral como se percibe en la gráfica 21 dando una línea de tendencia lineal muestran un cambio de magnitud 3 veces mayor que el obtenido para el lodo aceite mineral, esta gelificación representa para el aceite mineral fuerzas de atracción débiles entre partículas a condiciones estáticas lo cual afecta la función de suspensión del material y los recortes.

La *gráfica 19* muestra que el lodo base aceite mineral presenta un crecimiento progresivo en los esfuerzos de corte comparados con los lentos que tiene el lodo base diesel, la *gráfica 20* representa los comportamiento de la viscosidad y los esfuerzos de corte en un solo gráfico de esta se puede ver que ambos fluidos disminuyen su viscosidad con el esfuerzo de corte pero no en la misma proporción, para el caso de lodo aceite mineral al generar grandes aumentos en el esfuerzo de corte estos reflejan variaciones de la viscosidad efectiva gradualmente, mientras que para el lodo diesel pequeños aumentos del esfuerzo de corte generan grandes disminuciones en la viscosidad

Basados en el modelo de ley exponencial se obtuvieron valores de n y k , índice de ley exponencial e índice de consistencia respectivamente. Estos valores solo son pertinentes cuando están relacionados con una velocidad de corte específica, para el caso se trabajó con velocidades altas ($\Theta 600$, $\Theta 300$), medias ($\Theta 200$, $\Theta 100$), bajas ($\Theta 6$, $\Theta 3$):

Tabla 37. Valores de n y k formulación 100% aceite Mineral.

ACEITE MINERAL			
nb	0.4150	kb	1.5256
nm	0.6280	km	0.8742
na	0.9372	ka	0.1362

Fuente: Los autores.

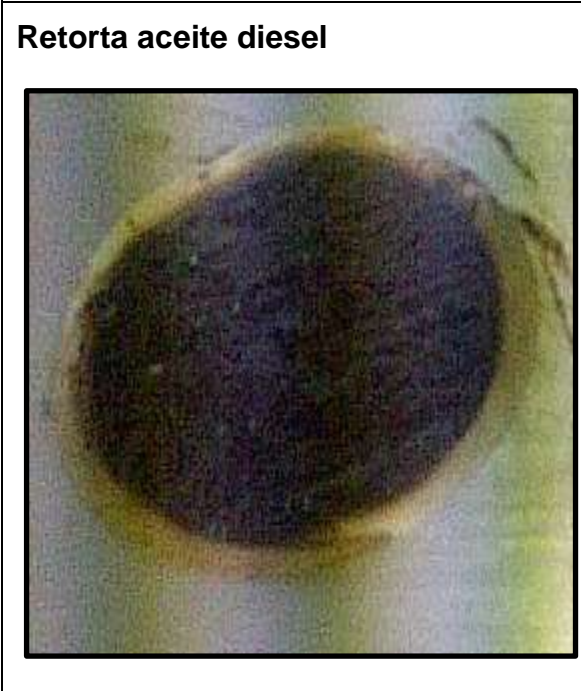
Tabla 38. Valores de n y k formulación 100% aceite Diesel.

DIESEL			
nb	0.2999	kb	7.9796
nm	0.2730	km	5.9055
na	0.6629	ka	0.5771

Fuente: Los autores.

Las *tablas 37, y 38* muestran valores de índice exponencial “n” e índice de consistencia “K” para los fluidos de perforación base mineral y diesel. Los datos obtenidos para las dos formulaciones muestran de una forma general que ambos fluidos tienden a disminuir su viscosidad con los esfuerzos de corte comportándose como fluidos no-newtonianos ya que su n estuvo menor a 1 para los dos casos.

FORMULACIÓN 100% ACEITE



4. ENSAYO DE TOXICIDAD

Este capítulo describe la forma en que fue llevado el ensayo de toxicidad aguda con semillas de lechuga para los dos lodos de referencia uno base Diesel y otro base aceite mineral grado técnico: Diseño experimental, Obtención y conservación de las semillas, Preparación de las diluciones, Realización de pruebas toxicológicas, control de calidad de las pruebas toxicológicas, expresión e interpretación de resultados.

El ensayo de toxicidad con semillas de lechuga es una prueba estática de toxicidad (120 h de exposición) donde se pueden evaluar los efectos fitotóxicos de compuestos puros o de mezclas complejas (aguas residuales) en el proceso de germinación de las semillas de lechuga y en el desarrollo de las plantas durante sus primeros 15 días de crecimiento.

En este proceso de evaluación se determina la inhibición en la germinación. A diferencia de los ensayos tradicionales de germinación de semillas, la evaluación del efecto de la elongación en la radícula y el hipocotilo de las plantas de lechuga, permite la ponderación del efecto tóxico de contaminantes en niveles de concentración tan bajos que no son suficientes para afectar el proceso de germinación, pero que sin embargo pueden retardar o inhibir el proceso de crecimiento de la raíz o el hipocotilo. Este ensayo puede ser aplicado para la evaluación de la toxicidad de compuestos puros solubles, de aguas superficiales (lagos, ríos), aguas subterráneas, aguas para consumo humano, aguas residuales domésticas e industriales, además de lixiviados de suelos, sedimentos, lodos u otras matrices sólidas. Las ventajas de esta prueba de toxicidad biológica son las siguientes:

- Reducido tiempo de exposición de la prueba (120 h).
- No requiere de equipamiento sofisticado
- Bajos costos

A diferencia de otras pruebas en las que se consideran algas o plantas acuáticas sumergidas como organismo diagnóstico, el bioensayo con semillas permite evaluar la fitotoxicidad de muestras coloreadas o con elevada turbiedad de manera directa y sin necesidad de filtración previa, reduciéndose así las interferencias debidas al pre tratamiento, además de simplificar el procedimiento de prueba.

Este bioensayo de toxicidad ha sido recomendado y aplicado por diferentes organismos de protección ambiental para la evaluación ecotoxicológica de muestras ambientales y compuestos puros. (OECD, 1984; US EPA, 1989).

4.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

Durante esta investigación se controlaron y midieron las siguientes variables:

- Variable independiente: la variable manejada en las pruebas fue el porcentaje de lodo diluido en 100 ml de agua desionizada. Con el fin de establecer un efecto sobre la población (semillas de lechuga).
- Variable dependientes : las variables que se obtuvieron fueron la CL50 la concentración letal mínima que causa muerte al 50% de la población puesta en contacto y el porcentaje de inhibición de las diluciones respecto al control en blanco por un tiempo de 120 horas (5 días) lo cual es un tiempo establecido debido a los numerosos procesos fisiológicos que puede provocar la sustancia

tóxica a la plántula como su supervivencia y desarrollo normal, siendo esta una etapa de alta sensibilidad a factores externos y dañinos.

➤ Constantes: Permanecieron constantes, el número de semillas utilizadas (22 por cada porcentaje de dilución), el lote de semillas, el número de concentraciones (5 en total más el blanco de la prueba), el foto periodo (oscuridad), 3 mililitros de volumen de muestra adicionado a las cajas de ensayo y el tiempo de exposición a las diluciones para cada uno de los dos lodos en referencia 120 horas (5días).

4.1.1 Obtención y conservación de las semillas

La obtención de las semillas de lechuga se realiza en sumillerías locales, procurando que sean semillas sin curar (sin fungicidas o plaguicidas), con buen poder germinativo y baja variabilidad en la elongación de la radícula e hipocotilo.

Se conservaron en un lugar fresco y seco donde estas mantengan sus características y poder germinativo en óptimas condiciones para posteriormente llevar a cabo las pruebas toxicológicas. Para esta investigación se trabajó con semillas de lechuga variedad Simpson del centro especializado en producción de semillas “Arroyave” (foto 1).

Si al momento de llevar a cabo la prueba se nota algún cambio en la germinación y desarrollo de las semillas, estas deben ser reemplazadas por un lote de semillas nuevo ya que se puede ver visto afectados los resultados obtenidos.



Fuente: Los autores.

FOTO 1

4.1.2 Preparación de las diluciones

El ensayo de toxicidad con semillas de lechuga requiere de la preparación de 5 diluciones (donde se utiliza agua desionizada para preparar su solución) de manera que se obtengan valores de toxicidad intermedios entre el 100 y 0% de la siguiente forma: 100% agua desionizada,(volumen de lodo/100 ml de agua) así (20 ml lodo/100 ml agua; 15 ml lodo/100ml agua; 10 ml lodo/100 ml agua; 5ml lodo y 1 ml lodo) Para su preparación, con la ayuda de jeringas se llenan las botellas con la cantidad de lodo y luego se completa con agua desionizada(foto 2).



Fuente: Los autores.

FOTO 2

4.2 REALIZACIÓN DE PRUEBAS TOXICOLÓGICAS

4.2.1 Pruebas de sensibilidad

Las pruebas de sensibilidad se realizan con el fin de estandarizar las pruebas toxicológicas en el laboratorio, en estas se establece la sensibilidad de las plántulas y su respuesta frente al tóxico de referencia. En esta investigación se manejó como tóxico de referencia el sulfato de cinc ($ZnSO_4$) (Recomendado por la agencia Environment Canadá como tóxico de referencia). Con estas pruebas se certifica que la respuesta de las plántulas en estudio se debe al efecto del tóxico y no a variaciones de las semillas o fallas operacionales en la aplicación de la metodología. Estas pruebas se deben realizar simultáneamente con la evaluación de la muestra ambiental. Se deben realizar pruebas preliminares y definitivas con el tóxico de referencia, la concentración que se calcula se denomina como la concentración letal de inhibición del 50% de la población (CL50).

Para el caso de las muestras cuya toxicidad es desconocida, previo a la realización de la prueba definitiva, se sugiere hacer una prueba presuntiva (ensayo preliminar) utilizando diluciones logarítmicas (100; 10; 1; 0,1; 0,01) que permitan establecer el intervalo de concentración conveniente para obtener valores de efecto entre 100 y 0% necesarios para calcular la CL50.⁵

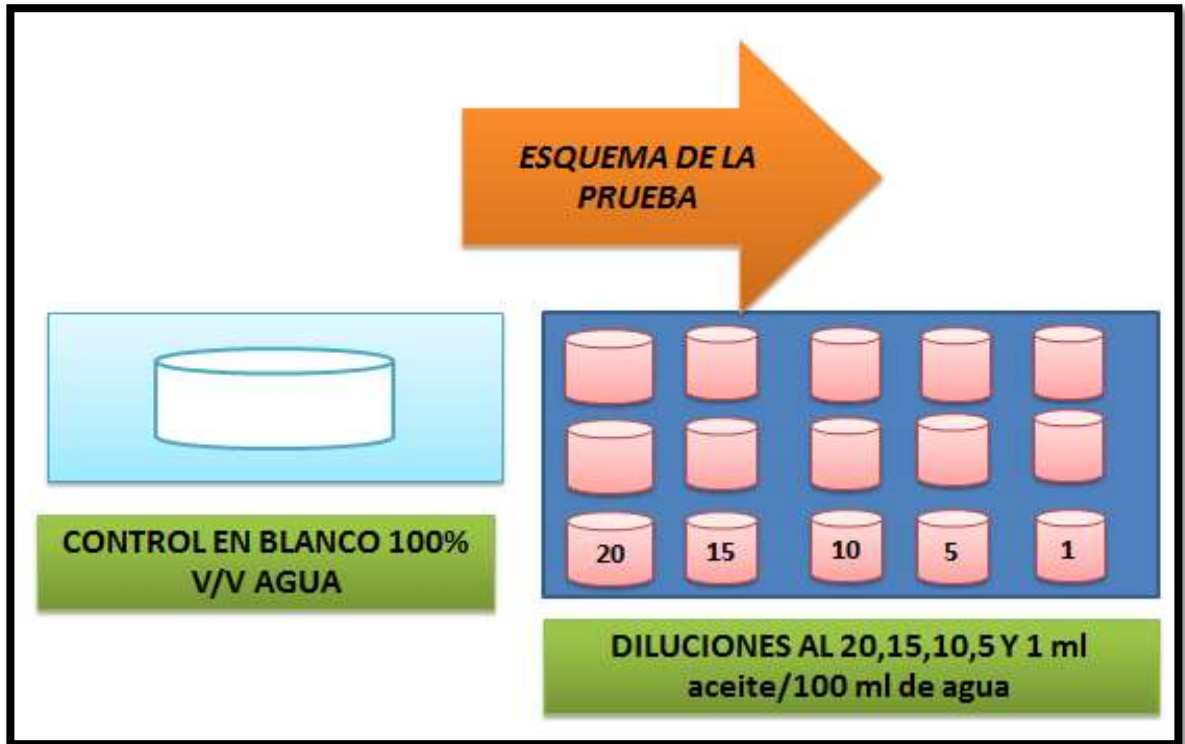
Con el fin de hallar los valores de CL50 para el toxico de referencia se presentan dos modelos uno gráfico en papel probabilístico y el segundo conocido como análisis Spearman – Karber (no paramétrico), los cuales son traídos a relación más adelante en la parte de expresión de resultados.

4.2.2 Montaje y preparación de la batería de ensayo

La batería de ensayo constó de cinco (5) concentraciones de cada lodo de referencia más un control en blanco, y un control positivo con sulfato zinc, para cada prueba de toxicidad se realizaron 3 repeticiones de cada dilución y el blanco (agua desionizada) tal como se muestra en el esquema de la prueba. En cada repetición se manejaron 22 semillas de lechuga, 66 semillas en total por montaje de cada dilución, esto con el fin de obtener resultados representativos. Las pruebas se realizaron en cajas previamente marcadas respectivamente para evitar confusión en el proceso de medición.

[5] Alicia Ronco, María Consuelo Díaz Báez y Yolanda Pica Granados, ENSAYOS TOXICOLÓGICOS Y MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE CALIDAD DE AGUAS. 2004. Pág. 7

ESQUEMA DE LA PRUEBA



Fuente: Los autores.

4.2.3 Adición de las diluciones

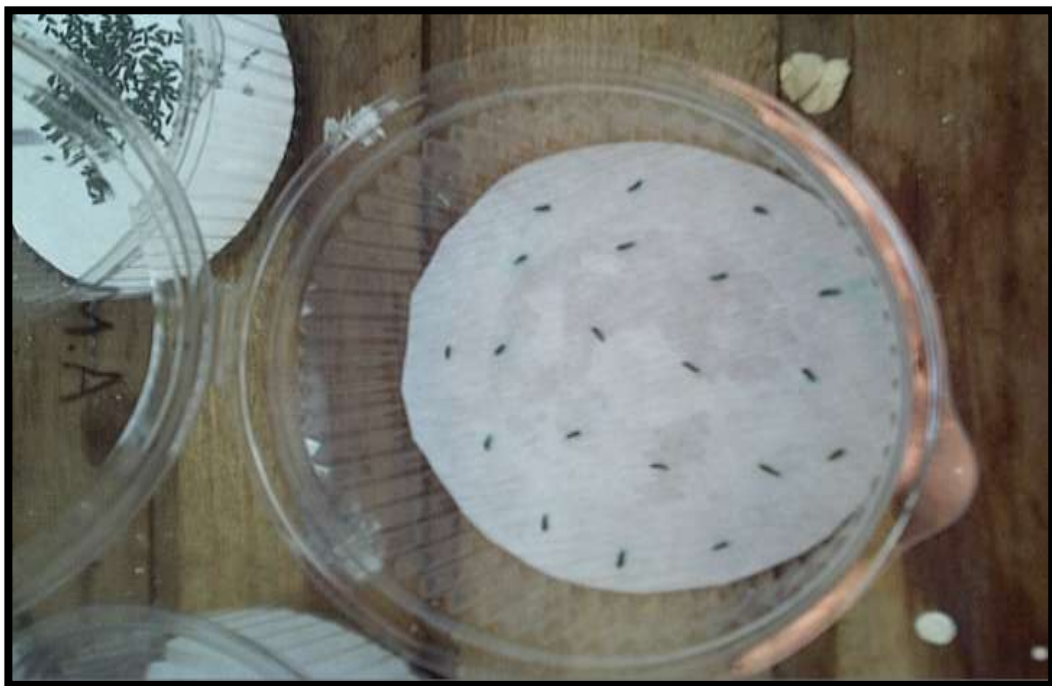
De cada dilución se toma 3 ml de muestra los cuales son adicionados al papel filtro en cada una de las cajas de prueba de la batería de ensayo, teniendo en cuenta también 3 ml para el control en blanco.

4.2.4 Siembra de semillas

En cada una de las cajas de prueba y con sus respectivas diluciones aplicadas al papel filtro se procede a colocar de a 22 semillas por caja, para facilitar y agilizar el

proceso es necesaria una pinza. El procedimiento anterior se repite hasta completar las 5 diluciones y así durante tres repeticiones en total, también es importante al momento de colocar las semillas en las cajas que estas queden distantes una de otras ya que si quedan muy pegadas lo más probable es que esto retrase el crecimiento y elongación de la raíz lo cual resultara en medidas erróneas.

Una vez puestas todas las semillas en las cajas estas se cierran con el fin de que la húmeda se mantenga, estas cajas son puestas en un ambiente escaso de luz y sin pérdida de húmeda como se dijo antes, lo cual resulta muy favorable para el crecimiento de las plantas y así para las medidas obtenidas. Estas cajas deben ser almacenadas en un lugar fresco donde la temperatura oscile entre $22 \pm 2^{\circ}\text{C}$.



Fuente: Los autores.


FOTO 3

4.2.5 Medición

Terminado el periodo de exposición (120 h), se procede a cuantificar el efecto en la germinación, es decir el número de semillas que no nacieron para lo cual se considerando como criterio de germinación la aparición visible de la radícula 5mm. Finalmente los datos obtenidos de germinación se registran inmediatamente en el formato de registro de las plántulas junto mostrados a continuación:

REGISTRÓ DE DATOS DILUCIONES DE LODO Y AGUA

Tabla 39. Registró de datos diluciones de lodo (base mineral y base diesel) y agua.

REGISTRO ENSAYO DE TOXICIDAD AGUDA CON SEMILLAS DE LECHUGA 		ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS 	
REPLICA NUMERO:			
REPETICIONES	FECHA DE REALIZACION	DOSIS V/V	N° DE SEMILLAS NO GERMINADAS
1			

Fuente: Los autores.

4.3 CONTROL DE CALIDAD DE LAS PRUEBAS TOXICOLÓGICAS

Con la finalidad de obtener resultados confiables y representativos durante el ensayo deberá repetirse en el caso que los controles presenten las siguientes características:

- Porcentaje de germinación menor al 90% en el control en blanco.
- Variación de la sensibilidad de las semillas fuera de lo permitido.

4.4 EXPRESIÓN DE RESULTADOS

Los cálculos realizados son la CL_{50} para la formulación con aceite mineral y diesel a partir de cualquiera de los dos métodos traídos a relación, aunque el segundo tiene el mayor intervalo de confianza:

4.4.1 Método gráfico: este consiste en obtener una tendencia dosis-respuesta para lo cual se gráfica en papel probabilístico en la ordenada x (dosis) y en la ordenada (y) el porcentaje de los organismos no germinados. Los puntos se unen con una línea recta y en base a esta se toman valores de dosis para porcentajes de mortalidad del 50% y del 84.1% y mediante la siguiente ecuación se determina el valor de CL_{50} con un intervalo de confianza de 0.84.

$$CL_{50} = \frac{DOSIS\ 50\% - DOSIS\ 84.1\%}{DOSIS\ 50\%}$$

Ecuación 7

4.4.2 Análisis Spearman – Karber: es un método aproximado, no paramétrico, que proporciona una buena estimación de la media y la desviación estándar. Si la distribución es simétrica, se obtiene una estimación de la concentración total mediana (CL_{50}), la siguiente expresión permite determinar la concentración letal :

$$CL_{50} = m = X_t - d(S_1 - 0.5) \quad \text{Ecuación 8}$$

Dónde:

X_t = dosis mínima a partir de la cual todas las reacciones son del 100%

d = distancia entre cada dosis.

S_1 = suma de las fracciones de individuos que presentaron reacción.


La desviación estándar $S_{CL_{50}}$, o mejor dicho S_m se determina de la siguiente ecuación:

$$S_m = d * \sqrt{2 S_2 - S_1 - S_1^2 - \left(\frac{1}{12}\right)} \quad \text{Ecuación 9}$$

S_2 = suma de la fracción acumulada de los individuos que presentaron reacción.

4.4.3 Muestra y análisis de resultados. La tabla 40,41 muestra los resultados obtenidos para la réplica uno y las tres repeticiones llevadas a cabo con los dos fluidos formulados 100% aceite base diesel y aceite mineral blanco grado técnico:

Tabla 40. Resultados de germinación obtenidos bioensayo replica uno aceite Diesel.

DIESEL			
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS	
REPLICA NUMERO:	UNO		
REPETICIONES	FECHA DE REALIZACION	DOSIS ml de A.M./100 ml de agua	N° DE SEMILLAS GERMINADAS
1,2,3	3 de marzo	control blanco	19,19,20
	3 de marzo	1	21,17,22
	3 de marzo	5	19,19,17
	3 de marzo	10	13,16,13
	3 de marzo	15	13,14,17
	3 de marzo	20	3,0,1
	3 de marzo	100 diesel	0,0,0

Fuente: Los autores.


Tabla 41. Resultados de germinación obtenidos bioensayo replica uno aceite Mineral.

ACEITE MINERAL BLANCO GRADO TÉCNICO			
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS	
REPLICA NUMERO:	UNO		
REPETICIONES	FECHA DE REALIZACION	DOSIS ml de A.M/100 ml de agua	N° DE SEMILLAS GERMINADAS
1,2,3	3 de marzo	control blanco	19,21,19
	3 de marzo	1	18,19,16
	3 de marzo	5	20,20,20
	3 de marzo	10	21,18,17
	3 de marzo	15	14,20,17
	3 de marzo	20	17,18,15
	3 de marzo	100Aceite mineral	0

Fuente: Los autores.

La tabla 42, 43 muestra los resultados obtenidos para la réplica dos y las tres repeticiones llevadas a cabo con los dos fluidos formulados 100% aceite base diesel y aceite mineral blanco grado técnico:

Tabla 42. Resultados de germinación obtenidos bioensayo replica dos aceite Diesel.

DIESEL			
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS	
REPLICA NUMERO:	DOS		
REPETICIONES	FECHA DE REALIZACION	DOSIS ml de A.M/100 ml de agua	N° DE SEMILLAS GERMINADAS
1,2,3	11 de marzo	control blanco	17,20,17
	11 de marzo	1	17,20,19
	11 de marzo	5	16,18,20
	11 de marzo	10	15,18,14
	11 de marzo	15	10,11,13
	11 de marzo	20	1,1,0
	11 de marzo	100 diesel	0,0,0

Fuente: Los autores.


Tabla 43. Resultados de germinación obtenidos bioensayo replica dos aceite Mineral.

ACEITE MINERAL BLANCO GRADO TÉCNICO			
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS	
REPLICA NUMERO:	DOS		
REPETICIONES	FECHA DE REALIZACION	DOSIS ml de A.M/100 ml de agua	N° DE SEMILLAS GERMINADAS
1,2,3	11 de marzo	control blanco	21,20,17
	11 de marzo	1	16,20,16
	11 de marzo	5	20,20,19
	11 de marzo	10	17,15,19
	11 de marzo	15	18,18,19
	11 de marzo	20	14,15,14
	11 de marzo	100 Aceite mineral	0,0,0

Fuente: Los autores.


La tabla 44, 45 muestra los resultados obtenidos para la réplica tres y las tres repeticiones llevadas a cabo con los dos fluidos formulados 100% aceite base diesel y aceite mineral blanco grado técnico:

Tabla 44. Resultados de germinación obtenidos bioensayo replica tres aceite Diesel.

DIESEL			
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS	
REPLICA NUMERO:	TRES		
REPETICIONES	FECHA DE REALIZACION	DOSIS ml de A.M/100 ml de agua	N° DE SEMILLAS GERMINADAS
1,2,3	19 de marzo	control blanco	17,20,19
	19 de marzo	1	17,20,19
	19 de marzo	5	17,18,17
	19 de marzo	10	15,16,18
	19 de marzo	15	14,11,13
	19 de marzo	20	1,2,2
	19 de marzo	100 diesel	0,0,0

Fuente: Los autores.

Tabla 45. Resultados de germinación obtenidos bioensayo replica tres aceite Mineral.

ACEITE MINERAL BLANCO GRADO TÉCNICO			
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS	
REPLICA NUMERO:	TRES		
REPETICIONES	FECHA DE REALIZACION	DOSIS ml de A.M/100 ml de agua	N° DE SEMILLAS GERMINADAS
1,2,3	19 de marzo	control blanco	21,20,17
	19 de marzo	1	17,20,17
	19 de marzo	5	20,20,19
	19 de marzo	10	17,15,18
	19 de marzo	15	17,18,19
	19 de marzo	20	14,13,14
	19 de marzo	100 Aceite mineral	0,0,0

Fuente: Los autores.

A partir del método no paramétrico se obtuvieron los intervalos de la CL₅₀ para cada una de las réplicas en ambas formulaciones, la tabla 46, 47 muestra estos resultados:

Tabla 46. Reporte de resultados aceite mineral intervalo de CL50 por el método no paramétrico

INTERVALO	ACEITE MINERAL		
	REPLICA UNO	REPLICA DOS	REPLICA TRES
CL50 LIMITE SUPERIOR(ml aceite/100ml de agua)	32.51	32.33	31.85
CL50 LIMITE INFERIOR(ml aceite/100ml de agua)	3.85	1.76	2.24

Fuente: Los autores.

Tabla 47. Reporte de resultados aceite diesel intervalo de CL50 por el método no paramétrico.

INTERVALO	DIESEL		
	REPLICA UNO	REPLICA DOS	REPLICA TRES
CL50 LIMITE SUPERIOR(ml aceite/100ml de agua)	24.85	24.05	25.51
CL50 LIMITE INFERIOR(ml aceite/100ml de agua)	1.06	0.49	-0.05

Fuente: Los autores.

A partir de la metodología de análisis Spearman – Karber se presenta una concentración letal promedio CL_{50} para el aceite mineral que oscila entre 2.62 ml aceite/100ml de agua @ 32.23 ml aceite/100ml de agua y para el lodo formulado a partir de Diesel esta se encuentra entre 0.50 ml aceite/100ml de agua @ 24.80 ml aceite/100ml de agua con un intervalo de confianza al 90%.

Estos valores indican que con concentraciones entre 0.50 a 24.80 ml Diesel /100ml de agua se provocan efectos fitotóxicos al 50% de la población expuesta, estas consecuencias se ven reflejadas en el efecto de inhibición en los procesos de germinación de las semillas de lechuga. Mientras que para el aceite mineral el intervalo de concentración estuvo en un rango más amplio lo cual indica que es necesaria una mayor concentración para lograr efectos en el 50% de la población puesta en contacto con el fluido base mineral.

Lo anterior permite percibir que los efectos toxicológicos para un lodo base diesel pueden ser más catastróficos que los presentados por un fluido formulado a partir de aceite mineral. Aunque la diferencia entre los intervalos de concentración media CL_{50} no es amplia, esta pequeña diferencia puede significar grandes contribuciones al medio ambiente y a los organismos puestos en contacto durante la ocurrencia de un descontrol en la perforación.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Es importante antes de empezar a plantear los análisis de los resultados a cada uno de los cuatro sistemas filtrado firme, filtrado relajado, alto contenido de agua, y 100% aceite entender la base o función del tipo de fluido.

Este capítulo describe el análisis de los datos obtenidos para cada uno de los 4 sistemas de lodos base aceite, empezando con la función de dicho sistema posteriormente se presenta el análisis a cada una de las propiedades examinadas durante las pruebas de laboratorio como lo son la reología, filtrado API, análisis de la retorta, densidad, y esfuerzos de gel. Finalmente se compara con resultados de estudios similares llevados a cabo en la Universidad Industrial de Santander como (Estudio de la factibilidad del uso del aceite de palma como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa), (Estudio de la factibilidad del uso de la glicerina como fase continua en fluidos de perforación de emulsión inversa), (Estudio de la factibilidad del uso del biodiesel como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa).

5.1 FORMULACIONES LLEVADAS A CABO EN ESTE ESTUDIO

5.1.1 Formulación filtrado firme (80/20 y 60/40)

La base o función de un fluido base aceite (Emulsión firme) radica en su capacidad para ejercer buen control de filtrado, son utilizados principalmente en formaciones a altas temperaturas (hasta 500°F) y pozos profundos. Estos sistemas usan altas concentraciones de emulsificantes y agentes controladores de pérdida de fluido para dar mayor estabilidad a la emulsión y reducir la pérdida de filtrado en zonas de perforación donde este problema puede estar asociado a

cavernas, formaciones con alta permeabilidad o fracturadas, ya sean fracturas inducidas durante la perforación las cuales tienden a propagarse ya que a menudo es más baja la presión de propagación que la para iniciar la fractura.

Las pérdidas de fluido son unos de los inconvenientes que más contribuyen a los problemas relacionados con la integridad de los pozos, tan solo en el golfo de México junto con el atascamiento de tuberías, el colapso del pozo, la presencia de lutitas desmoronables, dan cuenta del 44% de tiempo no productivo que impide el avance de la barrena de perforación hacia su objetivo (Estabilización del pozo para prevenir perdidas de circulación. John Cook, Fred Growcock, Quan Guo, Mike Hodder, Eric van Oort.Schlumberger.2012).

La descripción anterior se hizo con el fin de mostrar las condiciones a las que estos fluidos van a tener que operar, condiciones que van desde las altas temperaturas, zonas ladronas y las altas profundidades; donde es importante el régimen de flujo del fluido empleado para llevar a cabo la perforación, este va a tener efecto sobre las pérdidas de presión en el sistema, limpieza del pozo y la estabilidad del agujero aspectos que fueron los pilares más relevantes de este estudio.

Filtrado API: los resultados para esta formulación muestran que para ambos casos estuvieron menores a 7 ml sin embargo, la emulsión con aceite mineral tiene mayor tendencia de incurrir en pérdidas de fluido a la formación y si se tiene en cuenta las condiciones de presión a las que tendría que operar en condiciones reales estas podrían ser peores comparadas con los datos reportados para el diesel.

Análisis de la retorta: las retortas mostraron las mismas características lo cual indica que su comportamiento estará muy similar a condiciones reales de operación.

Densidad: la densidad para la formulación aceite mineral resulto ser mayor que para el diesel, lo cual es una ventaja para el aceite mineral ya que no necesitará la misma cantidad de densificante que una emulsión con diesel. cabe hacer la observación que todas las emulsiones se llevaron a cabo sin la presencia de un agente densificante ya que se contó con un fluido de referencia (diesel) y en base a este se llevaron a cabo las comparaciones.

Reología: los valores reportados son un indicativo de que a velocidades de corte altas el fluido base mineral desarrolla viscosidades progresivas que desfavorecen alcanzar altas tasas de penetración bajo estas condiciones.

Debido a la alta viscosidad plástica reportada, el fluido aceite mineral denotará un fluido deficiente que disminuye la energía proporcionada a la barrena resultando en bajas tasas de penetración ROP, dificulta el flujo en el espacio anular y la limpieza del pozo, aunque esta propiedad la describe mejor las viscosidades a baja velocidad de corte, también aumentará el uso y desgaste de los equipos.

Comparadas con las características más favorables que tendría la formulación con diesel gracias a su baja viscosidad plástica, el aceite mineral no tendría resultados favorables en cuanto a esta propiedad se refiere, si a esto le sumamos las condiciones de operación reales como las altas profundidades, las cuales requieren de una limpieza de pozo bastante exigente así como la fricción a la que estará sometida la sarta de perforación y las altas temperaturas , estos factores contribuyen a que la eficacia de un fluido a base mineral sea cada vez más desfavorable.

Otro indicativo es el punto cedente que junto con la viscosidad plástica juega un papel importante para cualquier análisis que se haga a un fluido de perforación, la tabla 20 muestra valores de punto cedente para los dos casos, base mineral y base diesel respectivamente, lo cual indica que el efecto de la interacción entre las fuerzas electroquímicas en los dos fluidos va a ser similar, por lo que su capacidad para suspender material densificante y retirar los recortes del pozo estará en igualdad de condiciones, sin embargo y a pesar de que el punto cedente es un indicativo de los aspectos anteriores esto puede inducir a un error, pues todo fluido con un punto cedente mayor a cero disminuye en cierta medida su viscosidad con el esfuerzo de corte, es decir, a esfuerzos de corte bajos y a velocidades de corte bajas el fluido aumentara su viscosidad y de esta forma la capacidad de limpieza y suspensión de material densificante, de esta manera fluidos con bajos puntos cedentes no suspenderán el material densificante, pero es posible que los fluidos con altos puntos cedentes tampoco suspendan el material.

La capacidad de un fluido para suspender el material densificante y limpieza de pozo dependen más de los esfuerzos de gel, de la viscosidad a baja velocidad de corte y de la tixotropía de un fluido que del punto cedente ([2] reología e hidráulica), por lo tanto no es un factor relevante durante este análisis en cuanto a lo que tiene que ver si es mejor o no respecto a capacidad de limpieza y suspensión de material.

Como se mencionó anteriormente, los esfuerzos de gel es la propiedad que mejor define la capacidad de suspensión del material densificante y los recortes, los datos reportados para el caso de aceite mineral muestran que se presenta un tipo de gelificación progresiva (fuerte) en la cual los esfuerzos de gel tienden a incrementar progresivamente con el tiempo y este tipo de gelificación es poco

deseado ya que ocasiona altas tasas de bombeo para romper la circulación, perdida de circulación y suabeo en el pozo, Caso contrario se presentó con el diésel, donde este tiende a presentar un tipo de gelificación frágil la cual se caracteriza porque los esfuerzos de gel crecen paulatinamente a través del tiempo, lo que permite a parte de cumplir con las funciones de suspensión, garantizar tasas de bombeo bajas, ya que no es necesario de esfuerzos de corte altos para romper circulación, disminución del entrapamiento de gas en el fluido y el efecto de suabeo en el pozo.

Si a esto le sumamos que a velocidades bajas, el aceite mineral mantiene viscosidades bajas comparadas con el diésel, lo cual no es favorable para la limpieza del pozo donde va a estar más influenciada por el desarrollo progresivo de viscosidades a velocidades de corte inferiores (3 y 6 RPM). Mientras tanto para velocidades de corte altas (300 y 600 RPM) el aceite mineral disminuye la viscosidad paulatinamente comparado con el diesel el cual experimenta una disminución progresiva de su viscosidad efectiva lo cual es favorable para alcanzar altas tasas de penetración.

La disminución de la viscosidad con la velocidad de corte tiene implicaciones importantes en los fluidos de perforación, considerando esto el fluido base mineral se comporta de una manera inversa al fluido de referencia ya que a velocidades de corte bajas cuando el fluido tiene que desarrollar las máximas viscosidades este desarrolla viscosidades más bajas que las desarrolladas por el lodo base diesel y a altas velocidades de corte cuando el fluido tiene que desarrollar viscosidades bajas, el aceite mineral desarrolla viscosidades más altas que las mostradas por el lodo de referencia.

Todo esto hace que el fluido de perforación base mineral no proporcione lo que más se desea, que es a altas velocidades (en la columna de perforación y a través de la barrena) disminuya su viscosidad con el esfuerzo de corte lo cual reduce la presión de circulación y las pérdidas de presión, por otra parte para velocidades de corte más bajas (dentro del espacio anular) la viscosidad tiene valores más altos que facilitan la limpieza del pozo.

Análisis del índice de ley exponencial: Sí bien entre menor es el índice de ley exponencial del fluido, mas este disminuye su viscosidad con el esfuerzo de corte de esta manera es posible notar que para el aceite mineral el “n” empieza a variar progresivamente hasta llegar a cerca de 0.9 lo cual representa que un fluido de este tipo a velocidades de corte altas va a tener poca reducción de su viscosidad lo cual no es favorable, casó contrario lo que sucedió con el diesel el cual varia paulatinamente su índice de ley exponencial.

El efecto del índice “n” sobre el perfil de velocidad es muy importante ya que entre más bajo sea este valor el perfil va a ser más aplanado lo cual le permite aumentar su velocidad sobre una área más grande lo cual aumenta considerablemente la limpieza del pozo, visto de esta forma el aceite mineral tendría un perfil de velocidad menos aplanado que para el de diesel lo cual se verá reflejado en una deficiente limpieza de pozo como ya se había mencionado anteriormente mediante el análisis de otros parámetros.

El análisis de un segundo reciproco el índice de consistencia “k” permite relacionar la viscosidad de un fluido a velocidades de corte bajas. Los resultados obtenidos muestran que este valor a velocidades bajas para el aceite mineral es menor comparado con el obtenido para el diesel lo que representa que va a mantener viscosidades bajas lo cual no es conveniente, entre mayor sea “k” el fluido

presentará mejores características de suspensión de material densificante y de los recortes.

5.1.2 Formulación filtrado relajado (80/20)

Antes de empezar con el análisis de resultados para este sistema es importante traer a relación la importancia y el fin del tipo de sistema base aceite filtrado relajado el cual tiene bajas concentraciones de emulsificante y agente controlador de filtrado. El aumento de filtrado de estos sistemas provee velocidades más rápidas de perforación, son sistemas diseñados para ser rentables gracias a su baja concentración de aditivos y lograr altas tasas de penetración.

Filtrado API: los valores de pérdida de filtrado estuvieron por encima a los reportados para el diesel, aunque el objetivo de este sistema se basa en la pérdida de filtrado para alcanzar altas tasas de penetración, las pérdidas muy altas no garantizan altas tasas necesariamente y las bajas pérdidas de fluido tampoco son garantía de que no se logren avances en la penetración. De esta manera el lodo base mineral presenta una tendencia a aumentar su filtrado lo cual no representa necesariamente que este fluido se comporte mejor ya que las pérdidas progresivas tienden a presentar uno de los principales inconvenientes que afectan la estabilidad del pozo.

Análisis de la retorta: con el análisis del cake se observa que este presenta las mismas características para los dos lodos, lo cual permite percibir que bajo estas condiciones su comportamiento va a ser muy similar además corrobora que no necesariamente el fluido con más pérdida por filtrado se comporte mejor.

Densidad: Las densidades reportadas muestran que para el aceite mineral es mayor que para el diesel, lo cual representa que debido a que el aceite mineral en estado natural es más denso que el diesel y al no haber presencia de un material densificante esta sigue siendo mayor aunque no desproporcionadamente.

Reología: La alta viscosidad plástica desarrollada por el lodo base mineral representa un fluido de perforación deficiente que disminuye la energía proporcionada a la barrena resultando en bajas tasas de penetración ROP, dificulta el flujo en el espacio anular y la limpieza del pozo aunque esta propiedad la describe mejor las viscosidades a baja velocidad de corte, también aumentará el uso y desgaste de los equipos.

Comparado con las características más favorables que tendría la formulación con diesel gracias a su baja viscosidad plástica, el fluido aceite mineral no representa un buen comportamiento en lo que referencia a esta propiedad reológica, si a esto le sumamos que para alcanzar buenas tasas de penetración es necesario que el fluido desarrolle viscosidades bajas a altas velocidades de corte y la viscosidad plástica es un indicativo del desarrollo o no de estas.

Otro parámetro importante en el análisis reológico es la viscosidad aparente la cual comparada con la obtenida para el diesel resulto ser mayor casi en un 77% para el lodo aceite mineral, este valor es un indicativo de que a velocidades de corte altas el fluido base mineral desarrolla viscosidades progresivas que desfavorecen alcanzar altas tasas de penetración bajo estas condiciones.

El punto cedente junto con la viscosidad plástica juega un papel importante para cualquier análisis que se haga a un fluido de perforación, los valores reportados muestran indican que el efecto de la interacción entre las fuerzas electroquímicas

en los dos fluidos va a ser superior para el aceite mineral, y así su capacidad para suspender material densificante y retirar los recortes del pozo.

Sin embargo y a pesar de que el punto cedente es un indicativo de los aspectos anteriores esto puede inducir a un error pues todo fluido con un punto cedente mayor a cero disminuye en cierta medida su viscosidad con el esfuerzo de corte, es decir a esfuerzos de corte bajos como lo son a velocidades de corte bajas el fluido aumentara su viscosidad y de esta forma la capacidad de limpieza y suspensión de material densificante, de esta manera fluidos con bajos puntos cedentes no suspenderán el material densificante, pero es posible que los fluidos con altos puntos cedentes tampoco suspendan el material. La capacidad de un fluido para suspender el material densificante. y limpieza de pozo dependen más de los esfuerzos de gel, de la viscosidad a baja velocidad de corte y de la tixotropía de un fluido que del punto cedente por lo tanto no es un factor relevante durante este análisis en cuanto a lo que tiene que ver si es mejor o no respecto a capacidad de limpieza y suspensión de material.

Como se mencionó anteriormente los esfuerzos de gel es la propiedad que mejor define la capacidad de suspensión del material densificante y los recortes, para el aceite mineral se presenta un tipo de gelificación progresiva (fuerte) en la cual los esfuerzos de gel tienden a incrementar progresivamente con el tiempo ;caso contrario se presentó con el diesel donde este tiende a presentar un tipo de gelificación frágil la cual se caracteriza porque los esfuerzos de gel crecen paulatinamente a través del tiempo, lo que permite a parte de cumplir con las funciones de suspensión, garantizar tasas de bombeo bajas ya que no es necesario de esfuerzos de corte altos para romper circulación, disminución del entrapamiento de gas en el fluido y el efecto de suabeo en el pozo.

La disminución de la viscosidad con el esfuerzo de corte tiene implicaciones importantes en los fluidos de perforación, considerando esto el fluido base mineral se comporta de una manera inversa al fluido de referencia ya que a velocidades de corte bajas cuando el fluido tiene que desarrollar las máximas viscosidades este desarrolla viscosidades más bajas que las desarrolladas por el lodo base diesel y a altas velocidades de corte cuando el fluido tiene que desarrollar viscosidades bajas, el aceite mineral desarrolla viscosidades más altas que las mostradas por el lodo de referencia.

Todo esto hace que el fluido de perforación base mineral no proporcione lo que más se desea que es a altas velocidades (en la columna de perforación y a través de la barrena) disminuya su viscosidad con el esfuerzo de corte lo cual reduce la presión de circulación y las pérdidas de presión, por otra parte para velocidades de corte más bajas (dentro del espacio anular) la viscosidad tiene valores más altos que facilitan la limpieza del pozo y suspensión del material y los recortes aunque estos se ven más representados en los esfuerzos de gel.

Análisis del índice de ley exponencial: Sí bien entre menor es el índice de ley exponencial del fluido, mas este disminuye su viscosidad con el esfuerzo de corte de esta manera es posible notar que para el aceite mineral el “n” empezó a variar progresivamente hasta llegar a cerca de 0.86 lo cual representa que un fluido de este tipo a velocidades de corte altas va a tener poca reducción de su viscosidad lo cual no es favorable, casó contrario lo que sucedió con el diesel el cual varia paulatinamente su índice de ley exponencial.

El efecto del índice “n” sobre el perfil de velocidad es muy importante ya que entre más bajo sea este valor el perfil va a ser más aplanado lo cual le permite aumentar su velocidad sobre una área más grande lo cual aumenta considerablemente la

limpieza del pozo, visto de esta forma el aceite mineral tendría un perfil de velocidad menos aplanado que para el de diesel lo cual se verá reflejado en una deficiente limpieza de pozo como ya se había mencionado anteriormente mediante el análisis de otros parámetros.

El análisis de un segundo recíproco el índice de consistencia “k” permite relacionar la viscosidad de un fluido a velocidades de corte bajas. Los resultados obtenidos muestran que este valor a velocidades bajas para el aceite mineral es menor cerca de un 23% comparado con el obtenido para el diesel lo que representa que va a mantener viscosidades bajas lo cual no es conveniente, entre mayor sea “k” el fluido presentará mejores características de suspensión de material densificante y de los recortes.

5.1.3 Formulación alto contenido de agua (40/60)

Los sistemas de alto porcentaje de agua fueron desarrolladas para cumplir ciertas reglamentaciones ambientales en zonas ambientalmente sensibles como costa fuera. Estos sistemas que tienen una relación agua aceite 50/50, pueden reducir hasta un 45% el aceite remanente en los recortes. Los sistemas de alto porcentaje de agua no son recomendados a temperaturas superiores 250°F.

Filtrado API: a pesar de que para ambos fluidos las pérdida de filtrado estuvieron en el rango que recomienda la literatura los valores representan que el fluido base mineral presenta una tendencia alta al problema de pérdida de fluido hacia la formación, que puede empeorar cuando este sea llevado a condiciones reales de perforación, lo que pone en riesgo la integridad del pozo, la contaminación de fuentes de agua subterráneas y finalmente la economía de un proyecto de perforación.

Análisis de la retorta: Analizando las características del cake reportada, la retorta para el lodo aceite mineral tuvo mayor espesor lo que pudo ser debido a sus altas pérdidas de filtrado o la precipitación de algún aditivo durante la prueba de filtrado API. Por lo tanto no es una garantía de que su comportamiento sea mejor que el lodo de referencia ya que en los estudios preliminares de compatibilidad estos dieron como resultado que algunos aditivos se precipitaban en el aceite mineral.

Densidad: Las densidades reportadas muestran que esta se mantiene mayor para el lodo base mineral, recordemos que este presenta mayor densidad en su estado natural y durante las pruebas no se utilizó ningún tipo de agente densificante.

Reología: El estudio de la reología nos proporciona la deformación y como se presenta el flujo para un tipo de sistema alto contenido de agua, la viscosidad plástica es un indicativo crucial del comportamiento de la viscosidad altas velocidades de corte de que tan bajo se mantenga depende la cantidad de energía suministrada a la barrena, de la disminución en uso y desgaste de los equipos, mejoras del flujo en el espacio anular para la limpieza del pozo, aspectos se ven puestos en riesgo ya que el valor obtenido para el lodo aceite mineral representa que un fluido de este tipo estará afectado por la concentración de sólidos, la relación aceite/agua, y la viscosidad de la fase fluida, factores que son más evidentes en un fluido base mineral y menos catastróficos en el lodo base aceite.

Otro parámetro reológico importante en el comportamiento de la viscosidad a altas velocidades de corte es la viscosidad aparente (v_a), los valores reportados muestran que para el aceite mineral está por encima en un 78% comparado con el lodo diesel, esto corrobora lo que se dijo anteriormente que el fluido base aceite

mineral desarrolla viscosidades altas a velocidades de corte altas lo cual no es lo deseado para lograr altas tasas de penetración durante la perforación.

El punto cedente es un parámetro que describe de una manera subjetiva la capacidad de limpieza del fluido, siendo el lodo aceite mineral el que desarrolló el valor más alto lo cual no representa que este fluido tenga mejores características en cuanto a lo que se dijo anteriormente pues cualquier fluido que disminuya su viscosidad con el esfuerzo de corte tendrá la capacidad de limpieza y suspensión, estas características están más influenciadas por el comportamiento de los esfuerzos de gel y la viscosidad a bajas velocidades de corte.

El valor obtenido para el lodo base mineral representa que este va a desarrollar mayores fuerzas de atracción bajo condiciones de flujo que las desarrolladas por el lodo base diesel, el aumento de estas fuerzas se ve reflejado en el desarrollo de una alta viscosidad que a pesar de que favorezca no dejar precipitar los recortes y el material densificante en condiciones de flujo, es desfavorable para mantener un buen flujo en el anular que permita llevar los recortes hacia arriba, aparte de los aumentos en los esfuerzos de corte y por ende el desgaste del equipo. Todo esto afecta la economía de un proyecto ya que aumentan las pérdidas de energía y los tiempos de perforación debido a las tasas bajas de penetración resultantes.

Una propiedad que describe mejor la capacidad de suspensión del material y los recortes es el esfuerzo de gel visto de esta forma el lodo mineral experimenta una gelificación de tipo progresiva (fuerte) la cual a condiciones estáticas las fuerzas de atracción entre partículas son más severas para el lodo mineral a través del tiempo, mientras que para el lodo diesel estas se desarrollan paulatinamente lo cual permite cumplir con la propiedad de suspensión y mejorar las condiciones para romper circulación ,aumentos de los esfuerzos de gel excesivos con el

tiempo no son deseados debido a las altas tasas de energía que hay que suministrar para romper circulación entre otros efectos.

De una forma general el lodo aceite mineral se comportó inversamente con el lodo diesel, mientras que el diesel disminuye su viscosidad aceleradamente y mantiene paulatinamente los esfuerzos de corte, el lodo base aceite mineral decrece su viscosidad paulatinamente y los esfuerzos de corte los aumenta progresivamente.

A altas velocidades de corte el fluido aceite mineral es deficiente ya que no permitiría lograr tasas de penetración altas debido a que su reducción en la viscosidad es mínima, por otra parte lo que si aumenta son los esfuerzos de corte lo cual implica mayores gastos de energía, de uso y desgaste del equipo y por ultimo lo que engloba todo la economía del proyecto.

A velocidades bajas el fluido aceite mineral desarrolla mayores viscosidades que el lodo diesel, pero esto no es garantía de que este cumpla mejor con las funciones de limpieza de pozo y suspensión del material y los recortes ya que como se dijo anteriormente en otros análisis esta viscosidad debe ser lo suficientemente baja para cumplir con las funciones, y lo suficientemente alta para no incurrir en altas tasas para romper circulación.

Todo esto hace que el fluido de perforación base mineral no proporcione lo que más se desea que es a altas velocidades (en la columna de perforación y a través de la barrena) disminuya su viscosidad con el esfuerzo de corte lo cual reduce la presión de circulación y las pérdidas de presión, por otra parte para velocidades de corte más bajas (dentro del espacio anular) la viscosidad tiene valores más altos que los del lodo diesel que si bien facilitan la limpieza del pozo pero incurren en la facilidad de romper circulación.

Análisis del índice de ley exponencial: Sí bien entre menor es el índice de ley exponencial del fluido, mas este disminuye su viscosidad con el esfuerzo de corte de esta manera es posible notar que para el aceite mineral el “n” empieza a variar progresivamente hasta llegar a cerca de 0.84 lo cual representa que un fluido de este tipo a velocidades de corte altas va a tener poca reducción de su viscosidad lo cual no es favorable, casó contrario lo que sucedió con el diesel el cual varia paulatinamente su índice de ley exponencial.

El efecto del índice “n” sobre el perfil de velocidad es muy importante ya que entre más bajo sea este valor el perfil va a ser más aplanado lo cual le permite aumentar su velocidad sobre una área más grande lo cual aumenta considerablemente la limpieza del pozo, visto de esta forma el aceite mineral tendría un perfil de velocidad menos aplanado que para el de diesel lo cual se verá reflejado en una deficiente limpieza de pozo como ya se había mencionado anteriormente mediante el análisis de otros parámetros.

El análisis de un segundo reciproco el índice de consistencia “k” permite relacionar la viscosidad de un fluido a velocidades de corte bajas. Los resultados obtenidos muestran que este valor a las tres velocidades vario paulatinamente para el aceite mineral comparado con el obtenido para el diesel este estuvo menor, lo que representa que va a desarrollar viscosidades altas a baja velocidad de corte lo cual no es garantía de buen desempeño como se dijo anteriormente. Si bien entre mayor sea “k” el fluido presentará mejores características de suspensión de material densificante y de los recortes este no puede ser lo suficientemente grande ya que incurre en problemas al momento de iniciar circulación.

5.1.4 Formulación 100% aceite

Antes de empezar con el análisis de los resultados obtenidos para este sistema 100% aceite es de vital importancia nombrar que este tipo de sistema es formulado solo con aceite en la fase continua, son usados con frecuencia como fluidos de corazonamiento, estos sistemas no deben usarse donde existan fuentes de agua que puedan ser contaminadas debido a que está constituido netamente por aceite en un 100% .Este sistema permite extraer corazones de formaciones que tienen problemas de arcillas, arenas desmoronables gracias a su alto poder inhibitorio y estabilizador de arcillolitas y las bajas densidades que se pueden obtener.

Filtrado API: los resultados muestran perdidas excesivas de filtrado para el aceite mineral superiores casi 9 veces que las recomendadas por la literatura mientras que para el lodo de referencia con diesel estas se mantuvieron en un rango óptimo. Los datos obtenidos representan que bajo estas condiciones un fluido aceite mineral va a incurrir en grandes pérdidas de filtrado lo cual no es conveniente para un lodo de corazonamiento ya que complica el proceso y la integridad de las muestras que se obtengan van a ser de baja calidad es decir poco representativas.

Análisis de retorta: Continuando con el análisis del cake este tuvo un mayor espesor para el lodo base mineral comparado con el diesel lo cual no es tan relevante ya que es posible que debido a su altas perdidas de filtrado o a la precipitación de algunos aditivos se haya obtenido unas mejores características en la retorta.

Densidad: respecto a las densidades desarrolladas para los dos fluidos se observa que la formulación con aceite mineral mantiene una mayor densidad gracias a su peso en estado natural del aceite mineral, lo cual puede ser una ventaja para el aceite mineral ya que no necesitará la misma cantidad de densificante que una emulsión con diesel pero a la vez una desventaja en zonas de cuidado donde se requiera un lodo liviano.

Reología: El estudio de la parte reológica, la manera en que se presenta la deformación y el flujo para ambas emulsiones (diesel, aceite mineral) permite observar en los datos reportados para la viscosidad plástica la cual resulto ser mayor más de dos veces la obtenida para el fluido de referencia , el exceso de este valor refleja que el grado de afectación por la concentración de solidos resultado de los aditivos agregados, y la más importante la viscosidad de la fase continua es mayor para el fluido base mineral en estado natural lo cual indica que un fluido de este tipo presentara viscosidades altas en relación al lodo de referencia ,lo cual no es conveniente si lo que se desea es que estas estén acorde con las del fluido base diesel de lo contrario denotará un fluido deficiente que aumenta el uso y desgaste de los equipos, disminuye la energía proporcionada a la barrena resultando en bajas tasas de penetración ROP lo que genera mayores tiempos para extraer núcleos lo que aumenta la posibilidad de que estos se contaminen y se desintegren en el interior de la tubería .

Otro parámetro importante es la viscosidad aparente la cual estuvo por encima que la obtenida con el aceite diesel, este valor es un indicativo de que a velocidades de corte altas el fluido base mineral desarrolla viscosidades progresivas que desfavorecen alcanzar altas tasas de penetración bajo estas condiciones; lo que genera retardos en el proceso de extracción de núcleos y aumenta la exposición de estos a contaminación y desintegro.

El punto cedente mostrado por el fluido base mineral estuvo para este caso por debajo del obtenido para el lodo de referencia a pesar de que este como se trató anteriormente no tiene mucha relevancia en la suspensión del material y los recortes, un punto cedente tan bajo, más de tres veces menor que el obtenido para el diesel tiene implicaciones en el desempeño del fluido de perforación. Si bien fluidos con bajos puntos cedentes no suspenderán el material densificante, pero es posible que los fluidos con altos puntos cedentes tampoco suspendan el material cabe resaltar que este por lo menos, según la literatura debe ser mantenido a dos veces la densidad del fluido, por lo tanto el valor obtenido representa que el fluido base mineral desarrolla fuerzas de atracción leves que dificultan en condiciones dinámicas la atracción entre partículas lo que presenta que el material y los recortes se precipiten y generen taponamientos en la broca.

Como se definió anteriormente los esfuerzos de gel es la propiedad que mejor define la capacidad de suspensión del material densificante y los recortes los esfuerzos de gel obtenidos para el lodo aceite mineral muestran fuerzas de atracción débiles entre partículas a condiciones estáticas lo cual afecta la función de suspensión del material y los recortes. Caso contrario presenta el lodo formulado con diesel el cual desarrolla mayores fuerzas de atracción que le permiten tener esfuerzos de gel más grandes y su crecimiento a través del tiempo es considerable tanto como para cumplir con la función de limpieza y suspensión como para no incurrir en altas tasas de energía para romper circulación, lo que no ocurre con el lodo formulado con aceite mineral blanco grado técnico el cual desarrolla esfuerzos de gel frágiles y débiles que a través del tiempo tienden a fortalecerse paulatinamente pero sin efectos importantes.

Las gráficas de viscosidad efectiva en función de la velocidad de corte y esfuerzo de corte muestran que el fluido base mineral se comporta de una manera inversa y esto hace que el fluido no proporcione lo que más se desea que es a altas velocidades (en la columna de perforación y a través de la barrena) disminuya su viscosidad con el esfuerzo de corte lo cual reduce la presión de circulación y las pérdidas de presión, por otra parte para velocidades de corte más bajas (dentro del espacio anular) la viscosidad tiene valores más altos que facilitan la limpieza del pozo.

Análisis del índice de ley exponencial: para ambos casos el exponente n se mantiene menor a 1 lo cual denota comportamiento de fluidos no-newtonianos sin embargo se observa para el aceite mineral que el índice exponencial crece progresivamente hasta llegar casi a 0.94 lo cual representa que este fluido disminuye muy levemente la viscosidad efectiva con el esfuerzo de corte, resultando en un perfil de velocidad poco aplanado que dificulta el proceso de limpieza en el pozo. Para el diesel el “ n ” se mantiene paulatino, empieza con valores más pequeños de n y a medida que aumentan las velocidades de corte crece lentamente hasta llegar a 0.66 el efecto es un perfil más aplanado que permite aumentar la velocidad sobre un área más grande lo cual refleja una eficiente limpieza de pozo.

Un análisis de un segundo recíproco el índice de consistencia “ k ” permite relacionar la viscosidad de un fluido a velocidades de corte bajas. Los resultados obtenidos muestran que este valor para el aceite mineral estuvo muy por debajo del obtenido para el diesel a velocidades de corte bajas y luego disminuye rápidamente, esto representa que este fluido a esfuerzos de corte bajos desarrolla bajas viscosidades efectivas lo cual impide la suspensión del material y los recortes, algo que ya había resultado anteriormente del análisis de otros parámetros este recíproco lo corrobora nuevamente.

5.2 RESULTADOS COMPARADOS CON OTROS TRABAJOS REALIZADOS EN LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

5.2.1 Comparación frente al Estudio de la factibilidad del uso de la glicerina como fase continua en fluidos de perforación de emulsión inversa.

Entre la glicerina y el Aceite Mineral Blanco Grado Técnico, se aprecia que ambos no son factible técnicamente, la glicerina por su parte por la excesiva viscosidad que se genera en las diferentes formulaciones y para el caso en estudio por los comportamientos inversos que presenta en comparación con un lodo de referencia formulado con Diesel.

Las pérdidas de filtrado empleando la Glicerina son muy altos independientemente de la cantidad de filtrado que se maneje en cada formulación al contrario en el Aceite Mineral está en algunas formulaciones cumple con los requerimientos de mantenerse por debajo de 7ml exceptuando en la prueba de 100% aceite, donde este se incrementa notablemente.

El Aceite Mineral resulta ser incompatible con varios aditivos en cambio según el estudio realizado para la glicerina esta es compatible con los aditivos empleados en ese estudio.

5.2.2 Comparación frente al Estudio de la factibilidad del uso del biodiesel como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa.

El Aceite Mineral como ya se ha determinado en el transcurso de este proyecto no es técnicamente recomendado para ser utilizado como fase continua en los lodos de perforación Base Inversa, al contrario del Biodiesel que resulta ser Factible,

presentando excelentes propiedades reológicas para la limpieza del pozo, aún mejores que con el Diesel, lo que no ocurre con el Aceite Mineral pues no genera las viscosidades eficaces para tener una buena limpieza del hueco.

5.2.3 Comparación frente a la Estudio de Factibilidad y Económica del uso del biodiesel de soya como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa.

Como al igual que el estudio de Biodiesel este es técnicamente factible, al contrario que el Aceite Mineral; resulta ser compatible con los diferentes aditivos agregados en las formulaciones, como se había mencionado anteriormente en el estudio del Aceite Mineral este resulta ser incompatible con varios aditivos, generándose precipitaciones en el ensayo.

Al contrario de este estudio en el que se predice que no hay diferencias significativas entre las formulaciones de Biodiesel de soya y el Diesel, el Aceite Mineral Presenta muchas diferencias con el aceite de referencia verificándose en las diferentes pruebas realizadas con anterioridad.

De acuerdo a lo mencionado en el estudio del Biodiesel de soya resulta ser toxicológicamente seguro, de la misma forma el Aceite Mineral gracias al estudio realizado resulta ser menos toxico que el formulado de referencia con el Diesel.

CONCLUSIONES

- ❖ El aceite resulta ser incompatible con varios aditivos utilizados en la formulación de los O.M.B. lo cual genera que se creen precipitaciones y los agregados no generen las propiedades y características que debe tener el lodo para que realice un trabajo eficaz durante la perforación.

- ❖ Basados en las especificaciones recomendadas por la literatura como: punto de anilina, punto de inflamación, no debe ser tóxico, no corrosivo, teniendo en cuenta estos aspectos el aceite mineral resultó ser una excelente opción para trabajar como fase continúa en la formulación de lodos base aceite.

- ❖ No se desarrolla emulsión entre el aceite mineral y el agua esto se puede apreciar en la prueba de Estabilidad de la emulsión, por ende se infiere que se deba agregar grandes concentraciones de emulsificante con el fin de obtener una fase homogénea.

- ❖ El aceite mineral Blanco Grado Técnico Blanco, resultó técnicamente no ser factible para ser empleado como fase continua en la formulación de lodos Base Aceite.

- ❖ El aceite en estudio desarrolla viscosidades altas a velocidades de corte altas cuando estas deben ser bajas y a velocidades de corte bajas desarrolla bajas viscosidades cuando lo que se requiere es que estas sean altas.

- ❖ Para el sistema de lodo 100% aceite el fluido base mineral desarrolla viscosidades bajas comparadas con las obtenidas para el fluido de referencia a

bajas velocidades de corte, por lo que su comportamiento se va a ver reflejado en una limpieza de pozo deficiente, como también su capacidad para suspender el material y los recortes

❖ A velocidades de corte altas el fluido preparado a partir de aceite mineral blanco grado técnico presenta viscosidades excesivas lo cual representa grandes desventajas durante el desarrollo de la perforación como: bajas tasas de penetración, alto uso y desgaste de los equipos. Por lo que el fluido base aceite mineral no resulta tener buen desempeño en ninguno de los cuatro sistemas de lodo más comunes y formulados en este estudio.

❖ La prueba toxicológica demuestra que un fluido formulado a partir de diesel resulta ser más toxico que uno generado a partir del Aceite Mineral Blanco Grado Técnico.

RECOMENDACIONES

- ✓ Llevar a cabo un estudio similar con aceites minerales del mercado que presenten menores viscosidades que las obtenidas por un aceite mineral blanco grado técnico.

- ✓ Llevar a cabo formulaciones para cada uno de los cuatro sistemas traídos a relación durante este estudio empleando otra variedad de aditivos químicos para todos base aceite producidos por otro fabricante.

- ✓ Es recomendable que las industrias puedan incorporar las pruebas biológicas a su proceso de toma de decisiones con respecto al desarrollo, manufactura y comercialización de sus productos. Por lo que se hace necesario que la academia se involucre directamente promoviendo desde las diferentes facultades, pruebas de efecto toxicológico las cuales junto con las pruebas físicas son una buena herramienta para el monitoreo e inspección de cualquier sustancia química con la que se adelanten estudios ya sea para proyectos de grado o posgrado.

- ✓ Llevar a cabo el estudio sobre la factibilidad del montaje de una batería de ensayos para pruebas fitotoxicológicas, llevando a cabo una investigación bibliográfica de las diferentes pruebas que existen en la literatura como las publicaciones de la EPA y la GTC 31 entre otras y de acuerdo a esto escoger las más representativas y apropiadas para hacer parte de la batería de ensayos, la cual debe estar respaldada por un lugar que permita controlar variables como la temperatura, la luz y la húmeda.

SÍNTESIS BIBLIOGRÁFICA

- ♦ Abu Azam M. Yassin and Azmi Kamis, Universiti Teknologi Malaysia. Palm oil derivate as a based fluid in formulating oil based drilling mud. Society of Petroleum Engineers, 1990.
- ♦ American Petroleum Institute. Redcomended Practice for field testing oil-based. Drilling fluids, API recommended practice 13B-2 Fifth Edition. API, 2012.
- ♦ Baker Hughes. Fluidos Manual de Ingeniería. Agosto 1998.
- ♦ Baroid Drilling Fluids, Inc. Baroid Fluids Handbook. 2005.
- ♦ Berna Arteaga, Tatiana. Ilias Melgarejo, Ibis. Estudio de factibilidad del uso de la glicerina como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander, 2008.
- ♦ Benavides Ayala, Fabio Ernesto. Quintero Gómez Jimmy. Estudio de la factibilidad del uso del uso del biodiesel como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander, 2010.
- ♦ Boyd, Phil A., Conoco Inc.; Whitfill, Donald L., Conoco Inc.; Carter, T.S., Conoco Inc.; Allamon, J.P., Conoco Inc. Low-Viscosity Base Fluid for Low-Toxicity Oil-Mud Systems. Septiembre 1987.
- ♦ Centro Internacional de Educación y Desarrollo (CIED). Fluidos de Perforación PDVSA. 2002.

- ♦ Energy API. Manual de fluidos de perforación. Fluidos de Perforación 2001.
- ♦ Horace W. Hindry Shell Oil Company, Inc. Characteristics and Application of an Oil-base Mud. December 1941.
- ♦ Cook John, Growcock Fred, Guo Quan, Hodder Mike, Van Oort Eric. Estabilización del pozo para prevenir pérdidas de circulación. Schlumberger.2012.
- ♦ Linares Rosbely, Tarrifa Marilin. Naranjo, Andry. Quintero, Leonardo. García, Oscar. Clasificación de los fluidos de perforación. Venezuela.: Universidad del Zulia, 2013.
- ♦ Md. Amanullah, SPE, CSIRO Petroleum. Physic-Chemical Characterization of Vegetable Oils and Preliminary Test Results of Vegetable Oil-based Muds. Society of Petroleum Engineers, 2005.
- ♦ Muñoz Hernández, Oscar Leonardo. Manrique Cárdenas, Jorge Luis. Factibilidad técnica y económica del uso del biodiesel de soya como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander, 2012.
- ♦ Prof. Adewale Dosunmu, SPE and Ogunrinde Josuha, SPE; University Of PorthHarcort Nigeria. Development of environmentally friendly oil based mud using palm-oil and groundnout-oil. SPE, 2010.
- ♦ O. Kuehl, Robert. Diseño de Experimentos. 2da edición. International Thomson Editores, S.A. México, 2001.

- ♦ Rodríguez Bermúdez, Eliserio. Reestructuración teórico práctica de la guía de lodos y cementos. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander, 2007.

- ♦ Solano Padilla, Andrés Emilio. Ensayo de toxicidad aguda al efluente de la ptar del municipio de chía mediante la utilización de semillas de lactuca sativa l y propuesta para su utilización como agua de riego para hortalizas. Universidad de la Salle Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Bogotá D.C 2007.

- ♦ Tamayo y Tamayo, Mario. El proceso de la investigación científica. Cuarta edición. México: Limusa Noriega Editores. México, 2013.

ANEXOS

Anexo A. Informe citotoxicidad de formulaciones a base de aceite mineral y diesel en células vero (Tesis – Ing. Petróleos) por Patricia Escobar, PhD; Laura Fernanda Neira, Bact.

CITOTOXICIDAD DE FORMULACIONES A BASE DE ACEITE MINERAL Y DIESEL EN CELULAS VERO (Tesis – Ing. Petróleos)

Por Patricia Escobar, PhD; Laura Fernanda Neira, Bact.

1. Metodología

1.1 Muestras y soluciones stock

Las formulaciones utilizadas, sus componentes y sus características macroscópicas se muestran en la tabla 1, Se prepararon soluciones solución stock de 5 mg- 5 μ L diluidas en 300 uL de dimetilsulfoxido (DMSO).

Tabla 1. Formulaciones y sus componentes. Se muestras las formulaciones utilizadas y sus características macroscópicas.

MUESTRA		CARACTERISTICAS
1	Formulación 100% Aceite mineral	Liquida viscosa
2	Formulación 100% Diesel	Liquida viscosa
3	Formulación 80/20 (80% Aceite mineral – 20% agua)	Liquida viscosa
4	Formulación 80/20 (80% Diesel – 20% agua)	Liquida viscosa
5	Aceite mineral Puro	Liquida viscosa
6	Aceite Diesel Puro	Liquida viscosa
7	Emulsificante	Liquida viscosa
8	Viscosificante	Polvo Blanco
9	Controlador de Filtrado	Polvo café
10	Alcalinizante	Polvo Blanco

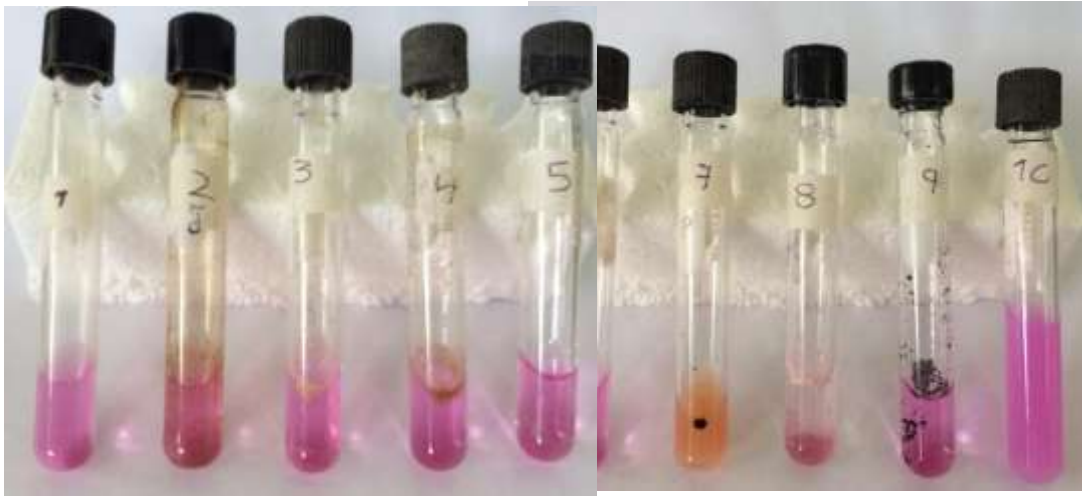
1.2 Solubilidad y pH en medio de cultivo

Se realizaron soluciones pesando 20 mg- 20 μ L los cuales se diluyeron en 2 mL medio de cultivo RPMI 1640 (Gibco) sin suero fetal bovino. Las soluciones fueron homogenizadas mediante vortex por 15 min. Se determinó la solubilidad y su cambio de pH en medio de cultivo RPMI 1640 (pH 7,4). La tabla 2 y la imagen 1 muestran la solubilidad y los cambios de color en el medio de cultivo.

Tabla 2. Solubilidad y cambios de pH del medio de cultivo:

MUESTRA	SOLUBILIDAD	pH
1	No soluble	Estable (no viró)
2	No soluble	Estable (no viró)
3	No soluble	Estable (no viró)
4	No soluble	Estable (no viró)
5	No soluble	Estable (no viró)
6	No soluble	Estable (no viró)
7	No soluble	Acido (viro amarillo)
8	No soluble	Estable (no viró)
9	No soluble	Estable (no viró)
10	Soluble	Estable (no viró)

Imagen 1. Solubilidad y cambios de pH del medio de cultivo. La foto muestra la solubilidad de las muestra en medio de cultivo. El medio de cultivo a pH 7,4 es rosado, A pH ácido se torna amarillo.



1.3 Células de Mamífero

Se utilizaron células epiteliales de riñón de mono verde africano Vero (CCL1-81 ATCC) las cuales fueron mantenidas en medio de cultivo RPMI 1640 (Gibco) suplementado 5% de suero fetal bovino inactivo (SFBi, Hyclone) a 37°C, 5% de CO₂ y 95% de humedad.

1.4 Ensayo de toxicidad en Células

Las células Vero fueron tratadas con diferentes concentraciones de los compuestos (0,2-1000 µg/mL). Células control fueron mantenidas sin compuesto, Para determinar la toxicidad inducida por el DMSO (solvente utilizado para preparar las soluciones stock), las células fueron tratadas con diluciones de DMSO (0,003-0,1%). La toxicidad fue determinada por el método de colorimétrico de MTT (3-(4,5-dimetiltiazol-2-il)-2,5difenil-tetrazolio bromuro). La densidad óptica se determinó por espectrofotometría a 580 nm usando un lector de microplacas (Multiskan Go). El porcentaje de citotoxicidad fue calculado mediante la fórmula: % citotoxicidad =100 * (DO grupo control-DO grupo tratado)/ DO grupo control.

1.5 Análisis de resultados:

La citotoxicidad fue expresada como la concentración toxica de la muestra para el 50% y 90% de las células (CC₅₀,CC₉₀) calculados por regresión sigmoideal utilizando el software MxslfitTM (ID Business Solution, UK). Los ensayos fueron realizados por triplicado en dos experimentos independientes.

2. Resultados

Se realizaron 2 experimentos independientes. En el Exp1 se evaluaron 3 concentraciones realizando diluciones 1:50 (0,2–500 µg/mL). En el Exp2 se evaluaron 4 concentraciones utilizando diluciones 1:3 (33–1000 µg/mL).

En el Exp1 se observó que todas las muestras exceptuando el aceite mineral (muestra 5) y el alcalinizante (muestra 10) presentaron una toxicidad mayor del 50% (Tabla 3, Figura 1) cuando eran tratadas con 500 µg/mL.

Cuando se repitió el experimento utilizando concentraciones mayores (1000 µg/mL) y además un control con el solvente utilizado en la preparación de las soluciones stock (DMSO), todos los compuestos alcanzaron un porcentaje de citotoxicidad del 64 al 90% (Tabla 4, Figura 2a y 2b), sin embargo al comparar con el control DMSO proporción

1:10 se obtuvo una citotoxicidad del 79%, lo que indica que la toxicidad obtenida se debe al solvente orgánico utilizado para disolver la solución stock de los compuestos.

Al realizar comparaciones entre los dos experimentos, además teniendo en cuenta la toxicidad del solvente DMSO, se puede sugerir que las formulaciones a base de aceite mineral presentaron una baja toxicidad en las concentraciones evaluadas (figura 2ª, ver barras azul y verde a 300, 100 y 33,3 µg/mL). Por lo contrario, las formulaciones a base de Diesel presentaron toxicidad (figura 2a, ver barras purpura y morada a 300, 100 y 33,3 µg/mL). En cuanto a los aditivos de las formulaciones el emulsificante fue el compuesto de mayor toxicidad debido a que se obtuvo un porcentaje de citotoxicidad del 83% en a una concentración de 33,3µg/mL. Los otros aditivos como el viscosificante, alcalinizante y el controlador de filtrado alcanzaron tan solo un máximo del 12% de toxicidad en esta misma concentración de 33,3µg/mL (Figura 2b).

Tabla 3. Citotoxicidad de las muestras en células Vero (Exp1). La tabla muestra el porcentaje de citotoxicidad en cada una de las diluciones evaluadas. Igualmente muestra la actividad de los compuestos en términos de CC₅₀ y CC₉₀ definida como la concentración de la muestra tóxica para el 50 o 90% de las células. DS: Desviación estándar.

		Experimento 1				
		% de citotoxicidad			CC ₅₀ (µg/mL±SD)	CC ₉₀ (µg/mL±SD)
		Concentración				
No	Nombre	500	10	0,2		
1	Formulación 100% Aceite mineral	74,89	0	1,77	292,53±41,7	>500
2	Formulación 100% Diesel	87,2	3,13	0,68	138,26±22,76	>500
3	Formulación 80/20 (80% Aceite mineral – 20% agua)	72,11	0,11	1,12	266,11±49,96	>500
4	Formulación 80/20 (80% Diesel – 20% agua)	75,06	12,62	6,23	134,48±37,61	>500
5	Aceite mineral Puro	34,73	0	0	>500	>500
6	Aceite Diesel Puro	86,94	8,23	6,9	112,04±34,69	>500
7	Emulsificante	81,8	0	3,68	336,66±1,82	>500
8	Viscosificante	69,2	0	0	438,30±12,64	>500
9	Controlador de Filtrado	72,76	8,48	0	160,21±2,45	>500
10	Alcalinizante	30,12	2,35	0	>500	>500

Figura 1. Porcentajes de citotoxicidad en células Vero (Exp1)

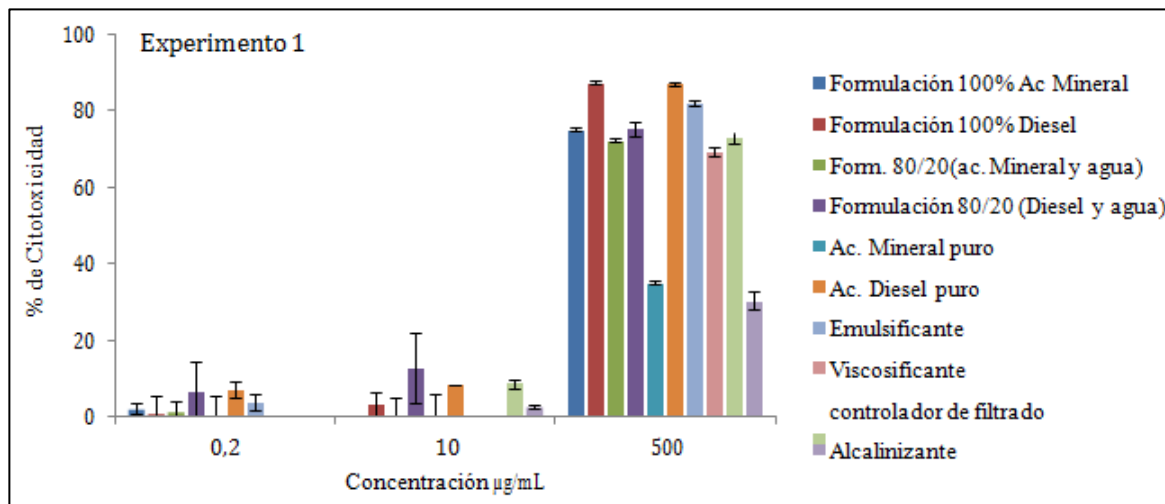


Tabla 4. Citotoxicidad de las muestras en células Vero (Exp2). La tabla muestra el porcentaje de citotoxicidad en cada de las diluciones evaluadas. Igualmente muestra la actividad del dimetilsulfoxdo (DMSO) utilizado como solvente. La actividad también se muestra en términos de CC50 y CC90 definida como la concentración de la muestra tóxica para el 50 o 90% de las células. DS: Desviación estándar

No	Nombre	Experimento 2					
		% de citotoxicidad				CC ₅₀ (µg/mL±SD)	CC ₉₀ (µg/mL±SD)
		Concentración					
		1000	300	100	33,3		
1	Formulación 100% Aceite mineral	83,96	13,89	2,98	0	563,14,47	>1000
2	Formulación 100% Diesel	90,01	89,13	69,35	0	83,91 ±1,7	135,09 ±7,62
3	Formulación 80/20 (80% Aceite mineral – 20% agua)	85,03	28,29	12,59	11,26	442,44 ± 27,18	>1000
4	Formulación 80/20 (80% Diesel – 20% agua)	85,56	84,86	64,43	18,12	77,53 ± 8,44	>1000
5	Aceite mineral Puro	77,77	15,03	0	0	605,32 ± 4,92	>1000
6	Aceite Diesel Puro	88,7	88,5	82,4	0	78,81 ±3,73	113,81
7	Emulsificante	88,66	88,13	85,74	83,64	<33,3	>1000
8	Viscosificante	84,32	42,89	9,23	8,75	358,96 ± 17,65	>1000
9	Controlador de Filtrado	78,69	36,13	27,17	11,65	365,03 ± 17,65	>1000
10	Alcalinizante	64,83	25,62	27,42	12,21	651,89 ± 11,85	>1000
11	DMSO	79,05	29,73	6,65	2,03	0,04±0,0002	>0,1

Figura 2. Porcentajes de citotoxicidad en células Vero (Exp2)

