

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DEL USO DEL BIODIESEL COMO FASE
CONTINUA EN LODOS DE PERFORACIÓN DE EMULSION INVERSA**

**FABIO ERNESTO BENAVIDES AYALA
JIMMY QUINTERO GÓMEZ**

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

2010

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DEL USO DEL BIODIESEL COMO FASE
CONTINUA EN LODOS DE PERFORACIÓN DE EMULSION INVERSA**

**FABIO ERNESTO BENAVIDES AYALA
JIMMY QUINTERO GÓMEZ**

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

**Director
M.Sc. EMILIANO ARIZA LEÓN
Ingeniero de Petróleos**

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

2010

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresamos nuestros agradecimientos a:

M.Sc. Emiliano Ariza León por su colaboración incondicional, aportando sus conocimientos y orientaciones en este proyecto, igualmente agradecemos a Alex encargado del laboratorio de lodos y cementos de la U.I.S. por todo su tiempo y orientaciones además de contribuir enormemente con las pruebas.

Al grupo GITAH que en su momento contribuyo con las bases y la visión de este proyecto, al Ing. Oscar Casas del I.C.P. por suministrarnos el Biodiesel, a Mario encargado del laboratorio de Fluidos por facilitarnos su experiencia y su tiempo y a la escuela de Ingeniería de Petróleos por habernos dado el conocimiento necesario para que este proyecto sea realidad.

DEDICATORIA

*A mis maravillosos padres **Irma Ayala de Benavides** y **Jesús Benavides Narváez** por darme la gran oportunidad de existir en este hermoso y complicado mundo. Gracias a ellos he logrado entender que los grandes cimientos de la vida es la familia, gracias por su amor, cariño, comprensión, dedicación y paciencia.*

*A mis hermanitos **Ricardo Jesús** y **Omar Eduardo** que siempre han estado a mi lado para darme la confianza de seguir escalando y llegar muy alto sin importar que caiga, porque ellos estarán ahí para levantarme.*

A toda mi familia que me han demostrado su amor y confianza.

*A **Eduardito Rodríguez** que los años me han enseñado a respetarlo y quererlo como hermano.*

*A **Doña Hilda, DUBY, Sandra** y **Oscar** quienes me hicieron sentir como en casa y me soportaron por varios años.*

*A **Jimmy Quintero Gómez** mi compañero de tesis que de no haberlo conocido desde primer semestre, no hubiese terminado mi carrera.
(Le sigo debiendo la cerveza!)*

A todos mis amigos por su compañía y su apoyo incondicional.

*Por último y no menos importante quiero agradecerle a **Dios** y a la **Virgen de Las Lajas** por darme valor en los tiempos de flaqueza y por aquel rayito de **Luz** que guía mis caminos oscuros enviando un **Ángel** a custodia de vida.*

FABIO ERNESTO BENAVIDES AYALA

DEDICATORIA

Muchas, muchas gracias a mi familia, a mi Madre, Yuyis, Alex, Betty y Jair que son los que han hecho esto posible han soportado con mucha tranquilidad todos mis caprichos y serán los que disfrutaran todos mis logros. A mis amigos de carrera y de hogar en Bucaramanga, William, Julian, Melina, Machero, Jeissen, Eusebio, Mauricio, Anderson, Veneco, Manuel, Renzo, Jenny, Rolo, Bielenis y algunos más que se pueden pasar.

A Ernesto que me invito a este proyecto que es un excelente compañero, las cosas no salieron como planeamos pero salieron bien y muy bien gracias Ernest.

A Lineth que me alivio, me consintió, me atendió después de tantas jornadas de laboratorio, y me ha hecho más tolerante XD, Te Amo Negrita malgeniada ;).

JIMMY QUINTERO GÓMEZ

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. FLUIDOS DE PERFORACIÓN	3
1.1. FUNCIONES DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN	3
1.2. TIPOS DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN	16
2. LODOS BASE ACEITE	22
2.1. EMULSIÓN	24
2.1.1. Evolución de los lodos de emulsión inversa.	25
2.1.2. Ventajas y desventajas de lodos base aceite.	27
2.2. COMPONENTES DEL LODO BASE ACEITE	28
2.2.1. El aceite y sus características.	28
2.2.2. Agua.	29
2.2.3. Emulsificante.	30
2.2.4. Controlador de filtrado.	30
2.2.5. Viscosificante.	30
2.2.6. Surfactante.	31
2.2.7. Densificante.	31
2.2.8. Inhibidores de corrosión.	31
2.2.9. Secuestrante de Oxígeno.	31
2.2.10. Fuente de Alcalinidad.	32
2.2.11. Fuente de Salinidad.	32
2.3. PROPIEDADES FISICOQUIMICAS DE LOS FLUIDOS DE PERFORACION	32
2.3.1. Densidad.	32

2.3.2. Reología.	33
2.3.3. Perdida de filtrado.	37
2.3.4. El pH.	38
2.3.5. Alcalinidad.	38
2.3.6. Estabilidad de la emulsión.	39
2.4. LODOS DE EMULSIÓN INVERSA	39
2.4.1. 100% Aceite.	40
2.4.2. Filtrado relajado.	40
2.4.3. De alto contenido de agua.	40
2.4.4. Emulsión firme.	40
2.5. PREPARACIÓN DE LODOS DE EMULSIÓN INVERSA.	41
3. BODIESEL	43
3.1. CARACTERISTICAS DEL BODIESEL	43
3.2. ASPECTO AMBIENTAL	47
3.3. ASPECTO ECONÓMICO	51
3.4. PRINCIPALES DIFERENCIA ENTRE DIESEL Y BODIESEL	52
3.5. PROBLEMAS DEL BODIESEL FRENTE AL DIESEL	53
4. PROPUESTA PARA USO DEL BODIESEL COMO FASE CONTINUA DE LOS LODOS BASE ACEITE	55
4.1. ANTECEDENTES SOBRE EL USO DE ACEITE VEGETALES PARA LODOS	55
4.2. CARACTERIZACIÓN DEL BODIESEL Y DIESEL	58
5. FORMULACION DE LOS LODOS DE EMULSIÓN INVERSA USANDO BODIESEL COMO FASE CONTINUA	62
5.1. DISEÑO EXPERIMENTAL	62
5.1.1. Reconocimiento y formulación del problema.	62
5.1.2. Selección de los factores.	63

5.2. PRUEBAS DE COMPATIBILIDAD	64
5.3. PREPARACIÓN DE LAS FORMULACIONES Y REALIZACIÓN DE PRUEBAS	69
5.3.1. Formulaciones con diesel y biodiesel.	69
5.3.3. Pruebas	72
5.4. ANALISIS DE RESULTADOS	111
6. CONCLUSIONES	114
7. RECOMENDACIONES	115
BIBLIOGRAFIA	116

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Emulsión de gotas de aceite en agua	24
Figura 2. Comparación de las emisiones de material particulado entre los combustibles diesel y el biodiesel de palma	47
Figura 3. Diferencia de precios entre Diesel y Biodiesel	52
Figura 4. Variación de la viscosidad del Biodiesel y el Diesel a diferentes temperaturas	60
Figura 5. Pruebas de compatibilidad	67
Figura 6. Viscosidad efectiva vs. Velocidad de Corte 100 % Aceite	77
Figura 7. Esfuerzo de Corte vs. Velocidad de Corte 100 % Aceite	78
Figura 8. Vaso 100% Biodiesel y Diesel respectivamente	81
Figura 9. Filtrado 100% Biodiesel y Diesel respectivamente	81
Figura 10. Viscosidad efectiva vs. Velocidad de Corte Formulación Firme 80/20	83
Figura 11. Esfuerzo de Corte vs. Velocidad de Corte Formulación Firme 80/20	84
Figura12. Vaso Formulación Firme 80/20 Biodiesel y Diesel respectivamente	85
Figura 13. Filtrado Formulación Firme 80/20 Biodiesel y Diesel respectivamente	85
Figura 14. Cake Formulación Firme 80/20 Biodiesel y Diesel respectivamente	86
Figura 15. Viscosidad efectiva vs. Velocidad de Corte Formulación Firme 60/40	87
Figura 16. Esfuerzo de Corte vs. Velocidad de Corte Formulación Firme 60/40	88

Figura 17.	Vaso Formulación Firme 60/40	Biodiesel y Diesel	
	respectivamente		90
Figura 18.	Filtrado Formulación Firme 60/40	Biodiesel y Diesel	
	respectivamente		90
Figura19.	Cake Formulación Firme 60/40	Biodiesel y Diesel	
	respectivamente		91
Figura 20.	Viscosidad efectiva vs. Velocidad de Corte Formulación		
	Relajado 80/20		92
Figura 21.	Esfuerzo de Corte vs. Velocidad de Corte Formulación		
	Relajado 80/20		93
Figura 22.	Vaso Formulación Relajado 80/20	Biodiesel y Diesel	
	respectivamente		94
Figura 23.	Filtrado Formulación Relajado 80/20	Biodiesel y Diesel	
	respectivamente		94
Figura 24.	Cake Formulación Relajado 80/20	Biodiesel y Diesel	
	respectivamente		95
Figura 25.	Viscosidad efectiva vs. Velocidad de Corte Formulación		
	Relajado 60/40		96
Figura 26.	Esfuerzo de Corte vs. Velocidad de Corte Formulación		
	Relajado 60/40		97
Figura 27.	Vaso Formulación Relajado 60/40	Biodiesel y Diesel	
	respectivamente		99
Figura28.	Filtrado Formulación Relajado 60/40	Biodiesel y Diesel	
	respectivamente		100
Figura 29.	Cake Formulación Relajado 60/40	Biodiesel y Diesel	
	respectivamente		100
Figura 30.	Viscosidad efectiva vs. Velocidad de Corte Formulación %		
	Agua 50/50		102
Figura 31.	Viscosidad efectiva vs. Velocidad de Corte Formulación %		
	Agua 50/50		103

Figura 32.	Vaso Formulación % Agua 50/50 Biodiesel y Diesel respectivamente	104
Figura 33.	Filtrado Formulación % Agua 50/50 Biodiesel y Diesel respectivamente	104
Figura 34.	Cake Formulación % Agua 50/50 Biodiesel y Diesel respectivamente	105
Figura 35.	Viscosidad efectiva vs. Velocidad de Corte Formulación % Agua 40/60	106
Figura 36.	Viscosidad efectiva vs. Velocidad de Corte Formulación % Agua 40/60	107
Figura 37.	Vaso Formulación % Agua 40/60 Biodiesel y Diesel respectivamente	109
Figura 38.	Filtrado Formulación % Agua 40/60 Biodiesel y Diesel respectivamente	110
Figura 39.	Cake Formulación % Agua 40/60 Biodiesel y Diesel respectivamente	110

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Propiedades típicas de los aceites y líquidos sintéticos	27
Tabla 2. Ventajas y desventajas del uso de lodos base aceite.	28
Tabla 3. Diferentes composiciones de ácidos grasos de diferentes orígenes.	44
Tabla 4. Caracterización del BIODIESEL Y DIESEL	59
Tabla 5. Viscosidad del Biodiesel y Diesel a diferentes temperaturas con el valor medio	60
Tabla 6. Cantidad de aditivo y tiempo de agitación	66
Tabla 7. Resultados de compatibilidad	68
Tabla 8. Formulación de Emulsión Firme	70
Tabla 9. Formulación de Filtrado relajado	71
Tabla 11. Formulación de Sistemas de perforación 100 % Aceite	72
Tabla 12. Resultado de pruebas con Biodiesel	74
Tabla 13. Resultado de pruebas con Diesel	75
Tabla 14. Formulación 100 % Aceite	76
Tabla 15. Reología de Formulación 100 % Aceite	77
Tabla 16. Formulación de emulsión firme 80/20	82
Tabla 17. Reología de Formulación de emulsión firme 80/20	82
Tabla 18. Formulación firme 60/40	86
Tabla 19. Reología de Formulación de emulsión firme 60/40	87
Tabla 20. Formulación relajado 80/20	91
Tabla 21. Reología de Formulación relajado 80/20	92
Tabla 22. Formulación relajado 60/40	95
Tabla 23. Reología de Formulación relajado 60/40	96
Tabla 24. Formulación % agua 50/50	101
Tabla 25. Reología de Formulación % agua 50/50	101

Tabla 26. Formulación % agua 40/60	105
Tabla 27. Reología de Formulación % agua 40/60	106

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DEL USO DEL BODIESEL COMO FASE CONTINUA EN LODOS DE PERFORACIÓN DE EMULSION INVERSA *

**AUTORES: FABIO ERNESTO BENAVIDES AYALA
JIMMY QUINTERO GÓMEZ****

PALABRAS CLAVES: Estudio de factibilidad, Fluidos, Biodiesel, Emulsión Inversa.

DESCRIPCIÓN

En la perforación de pozos cobra mucha importancia los lodos de perforación de emulsión inversa, debido al sustancial incremento de la rata de perforación y a la estabilidad de la formación que estos proporcionan, pero con el agravante económico y ambiental que estos conllevan. Este trabajo de grado tiene como propósito fundamental investigar tecnologías alternativas como el Biodiesel que proporcionen más eficiencia, menos costos y por supuesto menor impacto ambiental.

Este proyecto se fundamenta en la investigación y elaboración de un paralelo de ventajas y desventajas que se tiene utilizando biodiesel como fase continúa en los lodos de perforación, con respecto a los fluidos tradicionales que usan base diesel. Dentro de las pruebas se incluyeron ensayos de filtración a alta presión y alta temperatura (HPHT), pruebas de reología, densidad, filtrado API y pruebas químicas para lodos base aceite.

En el capítulo 1 describe todas las funciones y tipos de fluidos de perforación. El Capitulo 2 hace referencia a los lodos base aceite. El Capitulo 3, contiene información del Biodiesel, sus características, aspecto ambiental y económico. El Capitulo 4 se hace la propuesta para el uso del Biodiesel. El Capitulo 5, se realiza las diferentes formulaciones usando Biodiesel, el diseño experimental, pruebas de compatibilidad preparación de las formulaciones, análisis de resultados.

En los resultados de pruebas se pudo determinar que el Biodiesel desde el punto de vista técnico es factible emplearlo como fase continúa en lodos de emulsión inversa y aunque la viscosidad es mayor que la base Diesel, presenta buenas propiedades para lodos de perforación y teniendo en cuenta que el Biodiesel es ambientalmente amigable se generarían para la industria enormes ahorros y mayor seguridad en aplicarlos costa fuera y en tierra.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Msc. Emiliano Ariza León.

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF FACTIBILITY ABOUT THE USE BIODIESEL AS CONTINUOUS PHASE IN DRILLING FLUIDS OF INVERSE EMULSION*

**AUTORS: FABIO ERNESTO BENAVIDES AYALA
JIMMY QUINTERO GÓMEZ****

KEY WORDS: Study of Factibility, Fluids, Biodiesel, Inverse Emulsion.

DESCRIPTION

In drilling of wells is a lot of importance the drilling fluids of inverse emulsion, due to the substantial increase in the rate of drilling and the stability of the formation they provide but with the economic and environmental aggravating that these entail. This undergraduate work is intended as crucial to investigate alternative technologies that provide biodiesel more efficiently, lower costs and less environmental impact.

This project is based on research and development of a parallel advantages and disadvantages to using biodiesel as continue phase in drilling fluids, with respect to traditional fluids that this used diesel as continue phase. Among the tests included tests of filtration high pressure high temperature (HPHT), rheology testing, density, filtration and chemical tests for API oil-based muds.

The chapter 1 describes all the functions and types of drilling fluids. The chapter 2 refers to oil-based muds. The chapter 3 contains information of Biodiesel, its characteristics, environmental and economic aspect. The chapter 4 is the proposal for the use of biodiesel. The chapter 5 is performed using different formulations Biodiesel, experimental design, compatibility testing preparation of the formulations and results analysis.

The results of tests it was determined that biodiesel from a technical standpoint it is feasible to use it as a continuous phase in invert emulsion fluid and although the viscosity is greater than the base diesel, has good properties for drilling fluids and given that the Biodiesel is friendly environmentally would industry generate huge savings and safer to apply offshore and onshore.

* Undergraduate Project

** Physical-Chemical Sciences Faculty, Petroleum Engineering. Msc. Emiliano Ariza León

INTRODUCCIÓN

Una de las principales causas de contaminación en la perforación de pozos es el uso de lodos de emulsión inversa, pero también este tipo de lodo es beneficioso para la eficiencia de la perforación; se utilizan en casos donde se requiera de una alta estabilidad del fluido para inhibición de arcillas, en pozos de alta temperatura, huecos profundos, para evitar pegas y desestabilización del hueco, son altamente tolerantes a los contaminantes debido a la baja interacción entre el aceite y la formación. Estos lodos ofrecen máxima lubricidad reduciendo torque y arrastre, protección excepcional contra la corrosión, al mismo tiempo que sus productos son estables térmicamente y resistentes a las bacterias.

Generalmente el aceite que se utiliza es el diesel o aceites minerales de origen hidrocarburos, pero son contaminantes al medio ambiente. En las últimas décadas se ha enfocado la investigación con aceites vegetales que son biodegradables y reducen la contaminación al medio ambiente. En la escuela de Ingeniería de Petróleos se han desarrollado tesis sobre el uso de esos aceites: En 2002 se realizaron pruebas con aceite de palma y en 2008 con glicerina dando propiedades reológicas muy altas.

Teniendo en cuenta el incremento de la producción de biodiesel en Colombia y los bajos índices de contaminación que este producto de origen vegetal maneja, es posible que su uso como fase continua nos genere más beneficios que los obtenidos con lodos de emulsión inversa usados actualmente sin que esto implique un aumento de los costos de la operación: Con las experiencias de las anteriores investigaciones se decidió estudiar la factibilidad del uso del biodiesel como fluido base, a través de la realización de una serie de pruebas para evaluar si el comportamiento de sus propiedades está dentro de las especificaciones que debe cumplir un fluido de perforación.

Este estudio es una nueva opción para industria petrolera y el logro de una iniciativa a la investigación que le permita a la academia desarrollar o ampliar estudios que resalten la importancia de las tecnologías alternativas, utilizando productos naturales y biodegradables.

1. FLUIDOS DE PERFORACIÓN

El fluido de perforación posee características fisicoquímicas apropiadas y puede tener como fase continua aire, gas, agua, petróleo o una combinación de agua y aceite. Los fluidos de perforación cumplen varias funciones dentro del proceso de perforación para garantizar la seguridad, rapidez y efectividad en esta operación.

1.1. FUNCIONES DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN

Las funciones del fluido de perforación describen las tareas que el fluido de perforación es capaz de desempeñar aunque algunas no sean esenciales en cada pozo.

Las funciones del fluido de perforación más comunes son nombradas a continuación:

Remoción de los recortes del pozo. La remoción de los recortes de perforación (limpieza del pozo) deben ser retirados a medida que son generados por la broca. Con este fin, se hace circular un fluido de perforación dentro de la columna de perforación, a través de la broca, el cual arrastra y transporta los recortes hasta superficie, dependiendo del tamaño, forma y densidad de los recortes que suben por el espacio anular.

Controlar las presiones de la formación. El fluido de perforación se prepara con la finalidad de contrarrestar la presión natural de los fluidos en las formaciones garantizando una operación de perforación segura.

A medida que la presión de la formación aumenta, se aumenta la densidad del fluido de perforación para equilibrar las presiones y mantener la estabilidad de las

paredes, impidiendo así que los fluidos de perforación fluyan hacia el pozo y que los fluidos de perforación presurizados causen un reventón. La presión ejercida por la columna de fluido de perforación mientras está estática (no circulando) se llama presión hidrostática y depende de la densidad (peso del lodo) y de la Profundidad Vertical Verdadera (TVD) del pozo. Si la presión hidrostática del lodo es igual o superior a la presión de la formación, los fluidos de la formación no fluirán dentro del pozo.

El peso de lodo usado para perforar un pozo está limitado por el peso mínimo necesario para controlar las presiones de la formación y el peso máximo del lodo que no fracturará la formación. En la práctica, conviene limitar el peso del lodo al mínimo necesario para asegurar el control del pozo y la estabilidad del mismo.

Suspender y descargar los recortes. Cuando el lodo no está circulando, la fuerza de elevación por flujo ascendente es eliminada. Los recortes y derrumbes caerán hacia el fondo del pozo a menos que el lodo tenga la capacidad de formar una estructura de tipo gel cuando no está fluyendo. Los recortes de perforación que se sedimentan durante condiciones estáticas pueden causar puentes y rellenos, lo cuales, por su parte, pueden producir el atascamiento de la tubería o la pérdida de circulación. El lodo recupera su fluidez cuando se reinicia la circulación.

Los recortes son más pesados que el lodo. Por lo tanto, al mismo tiempo que el flujo del lodo en el anular los empuja hacia arriba, están sometidos a la fuerza de gravedad, que hace el efecto contrario impulsándolos a caer al fondo del pozo. La velocidad de las partículas al caer depende principalmente de la viscosidad y la densidad del fluido y del tamaño, forma y densidad de las partículas.

La eficacia en la operación de perforación y la velocidad de penetración (ROP) se ven afectadas cuando se presentan altas concentraciones de sólidos, aumentando

el peso y la viscosidad del lodo, generando mayores costos de mantenimiento y una mayor necesidad de dilución.

También aumenta la potencia requerida para la circulación, el espesor del revoque, el torque y el arrastre, y la probabilidad de pega por presión diferencial.

Es necesario mantener en equilibrio las propiedades del fluido de perforación que suspenden los recortes y las propiedades que facilitan la remoción de los recortes por el equipo de control de sólidos. La suspensión de los recortes requiere fluidos de alta viscosidad que disminuyen su viscosidad con el esfuerzo de corte con propiedades tixotrópicas, mientras el equipo de remoción de sólidos trabaja eficazmente con viscosidades bajas. El equipo de control de sólidos no es eficaz con fluidos de perforación que no disminuyen su viscosidad con el esfuerzo de corte, los cuales tiene un alto contenido de sólidos y una alta viscosidad plástica.

Para lograr un control de sólidos eficaz, los sólidos de perforación deben ser extraídos del fluido de perforación durante la primera circulación proveniente del pozo. Al ser circulados de nuevo, los recortes se descomponen en partículas más pequeñas que son más difíciles de retirar. Un simple método para confirmar la remoción de los sólidos de perforación consiste en comparar el porcentaje de arena en el lodo en la línea de flujo y en el tanque de succión.

Mantener la estabilidad del hueco. La estabilidad del pozo constituye un equilibrio complejo de factores mecánico (presión y esfuerzo) y químicos. La composición química y las propiedades del lodo deben combinarse para proporcionar un pozo estable hasta que se pueda introducir y cementar la tubería de revestimiento.

A medida que la broca penetra en una formación subterránea se suprime parte del apoyo lateral que ofrecen las paredes del pozo. A menos que ese sostén sea reemplazado por el lodo de perforación hasta que el revestimiento haya sido colocado, la formación caerá en el interior del pozo. Los mecanismos que evitan a que esto ocurra dependen de la naturaleza de la formación. Si la formación es muy firme (el granito sería un ejemplo extremo) se necesita poco sostén por parte del lodo. Si la formación es moderadamente firme y consolidada (lutitas es un ejemplo), la densidad del lodo puede ofrecer un apoyo suficiente. Si la formación es débil y no consolidada (como en el caso de la arena) el lodo debe ser suficiente denso y debe, además tener la capacidad de formar una capa delgada pero resistente de partículas sobre las paredes.

Minimizar los daños a la formación. La protección del yacimiento contra daños que podrían perjudicar la producción es muy importante.

Cualquier reducción de la porosidad o permeabilidad natural de una formación productiva es considerada como daño a la formación. Estos daños pueden producirse como resultado de la obturación causada por el lodo o los sólidos de perforación, o de las interacciones químicas (lodo) y mecánicas (conjunto de perforación) con la formación. El daño a la formación es generalmente indicado por un valor de daño superficial o por la caída de presión que ocurre mientras el pozo está produciendo (diferencial de presiones del yacimiento al pozo).

El tipo de procedimiento y método de completamiento determinará el nivel de protección requerido para la formación. Por ejemplo, cuando un pozo está perforado, entubado y cementado, la profundidad de perforación permite una producción eficaz, a pesar de los daños que puedan existir cerca del hueco.

En cambio, cuando se determina un pozo horizontal usando uno de los métodos de completamiento en pozo abierto, se requiere usar un fluido de perforación del yacimiento diseñado especialmente para minimizar los daños. Aunque los daños causados por el fluido de perforación no sean casi nunca tan importantes que no se pueda producir el petróleo y/o gas, sería prudente tener en cuenta los posibles daños a la formación al seleccionar un fluido para perforar los intervalos productivos potenciales.

Algunos mecanismos más comunes causantes de daños a la formación son los siguientes:

- a) invasión de la matriz de la formación por el lodo o los sólidos de perforación, obturando los poros.
- b) Hinchamiento de las arcillas de la formación dentro del yacimiento, reduciendo la permeabilidad.
- c) Precipitación de los sólidos como resultado de la incompatibilidad entre el filtrado y los fluidos de la formación.
- d) Precipitación de los sólidos de filtrado del lodo con otros fluidos, tales como las salmueras o los ácidos, durante los procedimientos de completamiento o estimulación.
- e) Formación de una emulsión entre el filtrado y los fluidos de la formación, limitando la permeabilidad.

La posibilidad de los daños puede ser determinada a partir de los datos de pozos de referencia y del análisis de los núcleos de la formación para determinar la permeabilidad de retorno. Fluidos de perforación diseñados para minimizar un problema en particular, fluidos de perforación del yacimiento diseñados especialmente, o fluidos de rehabilitación y completamiento pueden ser usados para minimizar los daños a la formación.

Enfriar y lubricar la broca y la sarta de perforación. Las fuerzas mecánicas e hidráulicas generan una cantidad considerable de calor por fricción en la broca y en las zonas donde la columna de perforación rotatoria roza contra la tubería de revestimiento y el pozo. El lodo debe absorber ese calor y conducirlo hacia fuera. Cualquier lodo líquido desempeña esta función al circular.

El fluido de perforación también ejerce un efecto de lubricidad para el trépano, para la sarta y para el revestimiento durante el proceso de la perforación, reduciendo aun más el calor producido por la fricción.

Algunas partículas contenidas en el lodo no pueden ser tal vez consideradas propiamente como lubricantes; sin embargo, la facilidad con que se deslizan una al lado de la otra y su deposición sobre las paredes del pozo disminuyen a la fricción y la abrasión.

Las brocas, los motores de fondo y los componentes de la columna de perforación fallarían más rápidamente si no fuera por los efectos refrigerantes y lubricantes del fluido de perforación.

La lubricidad de un fluido de perforación es medida por su Coeficiente de fricción (COF), y algunos lodos proporcionan una lubricación más eficaz que otros.

Por ejemplo los lodos de base aceite y sintético lubrican mejor que la mayoría de los lodos base agua, pero éstos pueden ser mejorados mediante la adición de lubricantes. En cambio, los lodos base agua proporcionan una mayor lubricidad y capacidad refrigerante que el aire o el gas.

El coeficiente de lubricación proporcionado por un fluido de perforación varia ampliamente y depende del tipo y de la cantidad de sólidos de perforación y

materiales densificantes, además de la composición química del sistema (pH, salinidad y dureza). La modificación de la lubricidad del lodo no es una ciencia exacta. Aun cuando se ha realizado una evaluación exhaustiva, teniendo en cuenta todos los factores pertinentes, es posible que la aplicación de un lubricante no produzca la reducción anticipada del torque y del arrastre.

Altos valores de torque y arrastre, un desgaste anormal, y el agrietamiento por calor de los componentes de la columna de perforación constituyen indicios de una lubricidad deficiente.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que estos problemas también pueden ser causados por grandes patas de perro y problemas de desviación, embolamiento de la broca, ojo de llave, falta de limpieza de agujero y diseño incorrecto del conjunto de fondo.

Aunque un lubricante pueda reducir los síntomas de estos problemas, la causa propiamente dicha debe de ser corregida para solucionar el problema.

Ayudar a sostener el peso de la tubería, mediante el empuje ascendente. El peso de la sarta de perforación o de la sarta de revestimiento puede exceder 200 toneladas. Un peso tal puede causar una gran tensión o esfuerzo sobre el equipo de superficie. Sin embargo, esas tuberías están parcialmente sostenidas por el empuje ascendente del lodo (principio de Arquímedes), de la misma manera que el empuje flotante del océano mantiene flotando a un buque de acero. Las presiones ascendentes (sustentación hidráulica) dependen de la presión ejercida por el fluido y de la sección transversal sobre la que esta presión se ejerce.

Cuando se introducen largas y pesadas tuberías de revestimiento, se puede usar la flotabilidad para proporcionar una ventaja importante. Cuando se usa la

flotabilidad, es posible introducir tuberías de revestimiento cuyo peso excede la capacidad de carga del gancho de un equipo de perforación.

Si la tubería de revestimiento no está completamente llena de lodo al ser introducida dentro del agujero, el volumen vacío dentro de la tubería de revestimiento aumenta la flotabilidad, reduciendo considerablemente la carga del gancho a utilizar. Este proceso se llama “introducción por flotación” (“floating in”) de la tubería de revestimiento.

Transmisión de la energía hidráulica a las herramientas y a la broca. La energía hidráulica puede ser usada para maximizar la velocidad de penetración (ROP), mejorando la remoción de recortes en la broca. Esta energía también alimenta los motores de fondo que hacen girar la broca y las herramientas de medición al perforar (MWD) y registro al perforar (LWD). Los programas de hidráulica se basan en el dimensionamiento correcto de las toberas de la broca para utilizar la potencia disponible (presión y energía) de la bomba de lodo a fin de maximizar la caída de presión en la broca u optimizar la fuerza de impacto del chorro sobre el fondo del pozo. Los programas de hidráulica están limitados por la potencia disponible de la bomba, las pérdidas de presión dentro de la columna de perforación, la presión superficial máxima permisible y el caudal óptimo. Los tamaños de las toberas se seleccionan con el fin de aprovechar la presión disponible en la broca para maximizar el efecto del impacto de lodo en el fondo del pozo. Esto facilita la remoción de los recortes debajo de la broca y ayuda a mantener limpia la estructura de corte.

Las pérdidas de presión en la columna de perforación son mayores cuando se usan fluidos con densidades, viscosidades plásticas y contenidos de sólidos más altos. El uso de tuberías de perforación o juntas de tubería de perforación de pequeño diámetro interior (DI), motores de fondo y herramientas de MWD/LWD

reduce la cantidad de presión disponible en la broca. Los fluidos de perforación que disminuyen su viscosidad con el esfuerzo de corte, de bajo contenido de sólidos o los fluidos que tienen características reductoras de arrastre, son más eficaces para transmitir la energía hidráulica a las herramientas de perforación y a la broca.

En los pozos someros, la potencia hidráulica disponible es generalmente suficiente para asegurar la limpieza eficaz de la broca. Como la presión disponible en la columna de perforación disminuye a medida que se aumenta la profundidad del pozo, se alcanzará una profundidad a la cual la presión será insuficiente para asegurar la limpieza óptima de la broca. Se puede aumentar esta profundidad controlando cuidadosamente las propiedades del lodo.

Asegurar la evaluación adecuada de la formación. La evaluación correcta de la formación es esencial para el éxito de la operación de perforación, especialmente durante la perforación exploratoria. Las propiedades químicas y físicas del lodo afectan la evaluación de la formación.

Las condiciones físicas y químicas del agujero después de la perforación también afectan la evaluación de la formación. Durante la perforación, técnicos llamados registradores de lodo (Mud Loggers) controlan la circulación del lodo y de los recortes para detectar indicios de petróleo y gas. Estos técnicos examinan los recortes para determinar la composición mineral, la paleontología y detectar cualquier indicio visual de hidrocarburos. Esta información se registra en un registro geológico (mud log) que indica la litología, la velocidad de penetración (ROP), la detección de gas y los recortes impregnados de petróleo, además de otros parámetros geológicos y de perforación importantes.

Los registros eléctricos con cable son realizados para evaluar la formación con el fin de obtener información adicional. También se pueden obtener núcleos de pared usando herramientas transportadas por cable de alambre. Los registros con cable incluyen la medición de las propiedades eléctricas, sónicas, nucleares y de resonancia magnética de la formación, para identificar la litología y los fluidos de la formación.

Herramientas LWD están disponibles para obtener un registro continuo mientras se perfora el pozo. También se perfora una sección cilíndrica de la roca (un núcleo) en las zonas de producción para realizar la evaluación en el laboratorio con el fin de obtener la información deseada. Las zonas productivas potenciales son aisladas y evaluadas mediante la realización de Pruebas de Intervalo (FT) o Pruebas de Potencial de la Formación (DST) para obtener datos de presión y muestras de fluido.

Todos estos métodos de evaluación de la formación son afectados por el fluido de perforación. Por ejemplo, si los recortes se dispersan en el lodo, el geólogo no tendrá nada que evaluar en la superficie. O si el transporte de los recortes no es bueno, será difícil para el geólogo determinar la profundidad a la cual los recortes se originaron. Los lodos a base petróleo, lubricantes, asfaltos y otros aditivos ocultarán los indicios de hidrocarburos en los recortes. Ciertos registros eléctricos son eficaces en fluidos conductores, mientras que en otros lo son en fluidos no conductores. Las propiedades del fluido de perforación afectarán la medición de las propiedades de la roca por las herramientas eléctricas de cable. El filtrado excesivo puede expulsar el petróleo y el gas de la zona próxima al agujero, perjudicando los registros y las muestras obtenidas por las pruebas FT o DST. Los lodos que contienen altas concentraciones iónicas de potasio perjudican el registro de la radioactividad natural de la formación.

La alta salinidad o variedad del filtrado puede dificultar o impedir la interpretación de los registros eléctricos.

Las herramientas de registro con cable deben ser introducidas desde la superficie hasta el fondo, y las propiedades de la roca se miden a medida que las herramientas son retiradas del pozo. Para un registro con cable óptimo, el lodo no debe ser demasiado denso y debe mantener la estabilidad del pozo y suspender cualesquier recortes o derrumbes.

Además, el pozo debe mantener el mismo calibre desde la superficie hasta el fondo, visto que el ensanchamiento excesivo del diámetro interior y/o los revoques gruesos pueden producir diferentes respuestas al registro y aumentar la posibilidad de bloqueo de la herramienta de registro.

La selección del lodo requerido para perforar un núcleo está basada en el tipo de evaluación a realizar. Si se extrae un núcleo solamente para determinar la litología (análisis mineral), el tipo de lodo no es posible. Si el núcleo será usado para estudios de inyección de agua y/o humectabilidad, será necesario usar lodo "suave" a base de agua, de pH neutro, sin agentes tensoactivos o diluyentes. Si el núcleo será usado para medir la saturación de agua del yacimiento, se suele recomendar un lodo suave a base aceite con una calidad mínima de agentes tensoactivos y sin agua o sal. Muchas operaciones de extracción de núcleos especifican un lodo suave con una cantidad mínima de aditivos.

Control de corrosión. Los componentes de la columna de perforación y tubería de revestimiento que están constantemente en contacto con el fluido de perforación están propensos a varias formas de corrosión.

Los gases disueltos tales como el oxígeno, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno pueden causar graves problemas de corrosión, tanto en la superficie como en el fondo del pozo. En general, un pH bajo agrava la corrosión. Por lo tanto, una función importante del fluido de perforación es mantener la corrosión a un nivel aceptable. Además de proteger las superficies metálicas contra la corrosión, el fluido de perforación no debería dañar los componentes de caucho o elastómero.

Cuando los fluidos de la formación y/o otras condiciones de fondo lo justifican, metales y elastómeros especiales deberían ser usados. Muestras de corrosión deberían ser obtenidas durante todas las operaciones de perforación para controlar los tipos y las velocidades de corrosión.

La aireación del lodo, formación de espumas y condiciones de oxígeno ocluido pueden causar graves daños por corrosión en poco tiempo.

Los inhibidores químicos y secuestradores son usados cuando el riesgo de corrosión es importante. Los inhibidores químicos deben ser aplicados correctamente. Las muestras de corrosión deberían ser evaluadas para determinar si está usando el inhibidor químico correcto y si la cantidad es suficiente. Esto mantendrá la velocidad de corrosión a un nivel aceptable.

El sulfuro de hidrógeno puede causar una falla rápida y catastrófica de la columna de perforación. Este producto también es mortal para los seres humanos, incluso después de cortos periodos de exposición y en bajas concentraciones. Cuando se perforan en ambientes de alto contenido de H₂S, se recomienda usar fluidos de alto pH, combinados con un producto químico secuestrador de sulfuro, tal como el zinc.

Facilitar la cementación y el completamiento. El fluido de perforación debe producir un pozo dentro del cual la tubería de revestimiento puede ser introducida y cementada eficazmente, y que no dificulte las operaciones de completamiento. La cementación es crítica para el aislamiento eficaz de la zona y el completamiento exitoso del pozo. Durante la introducción de la tubería de revestimiento, el lodo debe permanecer fluido y minimizar el suabeo y pistoneo, de manera que no se produzca ninguna pérdida de circulación inducida por las fracturas.

Resulta más fácil introducir la tubería de revestimiento dentro de un pozo liso de calibre uniforme, sin recortes, derrumbes o puentes. El lodo debería tener un revoque fino y liso. Para que se pueda cementar correctamente la tubería de revestimiento, todo el lodo debe ser desplazado por los espaciadores, los fluidos de limpieza y el cemento. El desplazamiento eficaz del lodo requiere que el pozo tenga un calibre casi uniforme y que el lodo tenga una baja viscosidad y bajas resistencias de gel no progresivas. Las operaciones de completamiento tales como la perforación y la colocación de filtros de grava también requieren que el pozo tenga un calibre casi uniforme y pueden ser afectadas por las características del lodo.

Minimizar el impacto sobre el medio ambiente. Con el tiempo, el fluido de perforación se convierte en un desecho y debe ser eliminado de conformidad con los reglamentos ambientales locales. Los fluidos de bajo impacto ambiental que pueden ser eliminados en la cercanía del pozo son los más deseables.

La mayoría de los países han establecido reglamentos ambientales locales para los desechos de fluidos de perforación. 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.

1.2. TIPOS DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN¹

Básicamente existen tres tipos de fluidos de perforación: Lodos base agua, base aceite y neumáticos. A continuación se describen algunos pertenecientes a lodos base agua y neumáticos; teniendo en cuenta que el enfoque de esta investigación está en los lodos base aceite, en el siguiente capítulo se hace una descripción detallada del mismo.

Lodos de Agua Salada. Un lodo se considera lodo de agua salada cuando contiene más de 10.000 ppm de sal y no ha sido convertido a otro tipo de lodo. Los lodos de agua salada 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:

- a. Lodos saturados de sal (315.000 ppm de sal o más)
- b. Lodos salados (más de 10.000 ppm de sal, pero no saturados).

¹ Guía de Laboratorio de Lodos y Cementos **Autor:** Eliserio Rodríguez Bermúdez

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

Lodos Dispersos. Este tipo de lodo se utiliza en las operaciones de perforación según lo requiera las condiciones del lodo. Se denominan dispersos puesto que usan materiales dispersantes para corregir las propiedades como viscosidad y pérdidas de filtrado debido a la contaminación del lodo durante la perforación, la cual no es posible controlar con tratamiento químico o este se hace muy costoso. Este tipo de lodos soporta una mayor cantidad de sólidos en suspensión, siendo los apropiados para ser utilizados en lodos de alta densidad.

Lodos No Dispersos. La rata de penetración es un factor importante en el costo de perforar un pozo. La experiencia ha demostrado que con los otros factores iguales, cuanto más baja es la concentración de sólidos en el lodo, mayor es la velocidad de penetración.

Las partículas de arcilla y los sólidos perforados del tamaño de arcilla parecen ser particularmente perjudiciales para la velocidad de penetración. Los dispersantes aumentan la tolerancia de los lodos a los sólidos perforados y aumenta la cantidad de sólidos coloidales en el lodo. Por lo tanto un lodo de sólidos mínimo implica un lodo no disperso.

Hay consideraciones reológicas que diferencian los lodos dispersos de los no dispersos. El punto de cedencia (yield point Y_p) es un parámetro que está muy relacionado con la capacidad de un lodo para mantener en suspensión los recortes (cuttings) y la barita, y para mantener las características de flujo laminar. Las viscosidad plástica V_p es principalmente un indicador de la consistencia del lodo que fluye hacia abajo a lo largo de la sarta, donde la viscosidad no es un

indicador significativo. La reología normal de los lodos dispersos, con la viscosidad plástica que es el triple del punto de cedencia es claramente contraria a los objetivos para los no dispersos. Un lodo típico no disperso, de baja densidad, posee una reología invertida, es decir, caracterizada porque el punto de cedencia es igual o excede a la viscosidad plástica.

El incremento de sólidos pueden espesar los lodos no dispersos hasta el punto en que se hace necesario añadir dispersantes. Un control continuo y efectivo de los sólidos es absolutamente esencial si se quiere mantener un lodo no disperso.

Lodos base Calcio. Cuando se agrega calcio a un lodo de arcilla-agua, se produce un intercambio de bases ya que el catión calcio (Ca^{2+}), el cual tiene una energía de enlace más alta, reemplaza el catión sodio (Na^+) en las arcillas, convirtiéndolas en arcillas a base de calcio. Este intercambio de bases causa la deshidratación parcial de las partículas de arcilla hidratadas, reduciendo el tamaño de la capa de agua alrededor de las partículas de arcilla. La reducción del tamaño de la capa de agua permite que las partículas de arcilla hagan contacto entre sí, resultando la floculación. La floculación causa un aumento del punto cedente y de los esfuerzos de gel. Si no se usa ningún desfloculante, el tamaño de los flóculos de arcilla aumentará con el tiempo y éstos pueden precipitarse, resultando en una reducción gradual de la viscosidad plástica.

Si se usa un dispersante, las arcillas aún tendrán una capa de agua reducida, pero los flóculos de arcilla se dispersarán. Este fenómeno se produce cuando ocurre la contaminación de calcio durante la perforación y es posteriormente tratada, o cuando se convierte un fluido (se cambia el tipo de fluido) en un fluido de perforación a base de calcio.

Dependiendo de la fuente de calcio existen tres tipos de lodos: calados, de yeso y de cloruro de calcio y se utilizan para perforar este tipo de formaciones.

Lodos con Materiales Poliméricos. Son aquellos agua dulce o salada, que tienen incorporados compuestos químicos de cadena larga y peso molecular alto, que pueden contribuir: al control de pérdidas de filtrado y de propiedades reológicas, a la estabilidad térmica, a la resistencia ante contaminantes, a la protección de zonas potencialmente productoras, a mantener la estabilidad de las formaciones atravesadas, a dar lubricación a la sarta, prevenir pegas y corrosión, a mejorar la perforabilidad, a mantener un ambiente limpio, etc.

Entre los materiales poliméricos más usados están: el almidón, la gomas de “Guar”, “Xanthan” y de algarrobo, CMC, el lignito, la celulosa polianiónica, los poliacrilatos, el copolímero de vinil amida/vinil sulfonato, la poliacrilamida parcialmente hidrolizada, los ácidos poliaminados y la metilglucosa, entre otros.

La desventaja relativa más prominente de los lodos con materiales poliméricos parece ser su alto costo siendo superados en costo por lodos base aceite y base material sintético.

Lodos cuya fase continua es “Material Sintético (producido por síntesis química)”. Esta nueva clase de lodos denominados “lodos basados en pseudo-aceite” poseen la mayoría de propiedades de los lodos con fase continua aceitosa y con su uso se podrían disminuir los grandes problemas de contaminación causados, pero muchos de ellos presentan toxicidad acuática. Una así, algunos autores recomiendan estos nuevos lodos como una alternativa al uso de lodos cuya fase continua es aceite. Otras desventajas son: el costo (varios cientos de dólares por barril, situación que se agravaría con la presencia de pérdidas de circulación) y su poca estabilidad a altas temperaturas. Entre los materiales sintéticos más empleados se encuentran:

Ester, Éter, Poli-alfa-olefina, Alquil-benceno-lineal y Alfa-olefina lineal.

Fluidos de Gas-Aire. Usando como fluido de perforación aire, gas natural, gases inertes o mezclas con agua, se han obtenido grandes ventajas económicas en secciones de rocas consolidadas donde difícilmente se encontrarían grandes cantidades de agua, pues un aporte adicional de líquido contribuiría a formar lodo, embotando la sarta, especialmente la broca; el aire o gas seco proveen la mayor tasa de penetración de los diferentes fluidos de perforación, los cortes son usualmente reducidos a polvo al mismo tiempo que se dirigen a la superficie, al ser bombardeados a alta velocidad contra los tool joints. El transporte de los recortes depende de la velocidad en el anular, al no poseer propiedades que garanticen por sí mismas la suspensión de los cortes o sólidos transportados; siendo no recomendable su uso ante paredes de pozo inestables, formaciones productoras de agua, formaciones de alta presión de poro y adversos factores económicos. En general el uso de este tipo de fluidos resulta en una tasa de perforación más rápida, mayor footage para la broca, mayor posibilidad para tomar pruebas de las formaciones, limpieza de los corazones, mejores trabajos de cementación y mejores completamientos.

Se usa Mist drilling o perforación de niebla cuando una pequeña cantidad de agua entra al sistema, eventualmente agentes espumantes son inyectados en la corriente por tanto disminuyen la tensión interfacial entre el agua, dispersándola dentro del gas, lo cual incrementa la habilidad de eliminar el agua producida por la formación. Agentes anticorrosión normalmente no son usados pero cuando ocurre o se encuentra agua, un inhibidor tipo amina sirve para proteger la sarta.

Lodos Espumosos. Preparados mediante la inyección de agua y agentes espumantes dentro de una corriente de aire o gas creando una espuma estable y viscosa o mediante la inyección de una base gel conteniendo un agente

espumante, su capacidad de acarreo es dependiente más de la viscosidad que de la velocidad en el anular. En cuanto a los lodos aireados en una base gel, tiene el propósito de reducir la cabeza hidrostática y prevenir pérdidas de circulación en zonas de baja presión, además de incrementar la rata de penetración.

Últimos lodos propuestos como alternativas a los fluidos neumáticos. En momentos en los cuales las técnicas de perforación, de bajo balance de presión (underbalance) tienen gran aplicación en los Estados Unidos de América (más del 12% de los pozos allí perforados durante 1997 se planearon con este método), es así que se ha propuesto un nuevo sistema de lodos que han sido probados en campo con éxito y que se constituyen en una buena alternativa al uso de fluidos neumáticos, pues con ellos:

- Se pueden disponer de un lodo de muy baja densidad e incompresible.
- Se eliminan los grandes compresores requeridos por los fluidos neumáticos.
- Se pueden utilizar herramientas MWD.

Al igual que con los fluidos neumáticos, con estos nuevos lodos se pueden lograr ratas de perforación altas y disminuir los daños de formación y las pérdidas de circulación. La reducción de densidad en lodos convencionales incluso pueden lograrse agregando (en concentraciones de más del 20%, en volumen) esferas de vidrio huecas (gravedad específica de 0.37, diámetro promedio de 50 micrómetros y 3000 psi de resistencia al colapso) desarrolladas con el auspicio del Departamento de Energía de los Estados Unidos. De fácil remoción y reciclables.

2. LODOS BASE ACEITE

Los lodos base aceite forman parte de la gran gama de fluidos de perforación, nacieron para suprimir las deficiencias presentadas por los lodos base agua. Problemas como hidratación de arcillas, contaminaciones frecuentes, manejos de presiones y temperaturas, y muchos otros, contribuyeron para que la industria de la perforación los implementara.

En realidad estos lodos cumplen las mismas funciones que cualquier otro, con la particularidad de trabajar en lugares y condiciones especiales.

Un lodo base aceite no es más que una mezcla de sustancias con determinadas propiedades que se agregan a una emulsión en donde la fase dispersa corresponde al agua y la fase continua al aceite (petróleo crudo o diesel) a este tipo de lodo se le denomina de emulsión inversa.

El aceite no solamente es utilizado para crear este tipo de emulsiones, también existen otros tipos de lodos en donde el aceite juega un papel muy importante, los cuales son denominados lodos de aceite en agua (de emulsión normal). Estos lodos utilizan el diesel o el aceite crudo para formar sobre una base acuosa (fase continua) y en compañía de un emulsificante o tensoactivo (lignosulfonatos, lignitos), una emulsión lo suficientemente fuerte que le permita permanecer estable y con una apariencia homogénea. Este tipo de lodos pueden aprovecharse para conseguir beneficios tales como aumento en la rata de penetración, disminución de la torsión en la sarta de perforación, lubricación entre la sarta que rota y las paredes del hueco y disminución en la pérdida de filtrado debido al taponamiento que hacen los glóbulos aceitosos en los espacios porosos de la torta.

Entre otras ventajas secundarias se cuentan el aumento de la vida útil de la broca a causa de la disminución de la torsión y el mejoramiento de la lubricación, la uniformidad del diámetro del pozo y la protección de la zona productiva (gracias a la disminución de la tensión superficial y reducción del filtrado).

El aceite agregado debe poseer un peso específico entre 28° y 36° API; tener un punto de anilina elevado, de 135 o más, con el propósito de prevenir el deterioro prematuro de equipos con empaques o partes de goma; un alto punto de inflamación y bajo punto de congelación, lo que reduce el riesgo de accidentes, además que permite su utilización en ambientes de extremo frío y calor.

Generalmente se ha utilizado como aceites el mismo crudo producido y el diesel, pero se han venido haciendo investigaciones para el uso de aceite menos contaminantes.

El petróleo crudo utilizado debe tener un bajo peso específico, ausencia de contaminantes, y como se menciono anteriormente un punto de anilina de 135 o más.

La preparación del lodo de emulsión normal se realiza mediante la conversión de un lodo base agua inicial. Al sistema original, que se debe encontrar en buenas condiciones de dispersión, se debe agregar una cantidad predeterminada de aceite (entre 1 y 2 lb/bbl) teniendo en cuenta una buena agitación para garantizar su homogenización.

Una vez terminado el proceso se deben revisar las nuevas propiedades reológicas y fisicoquímicas y realizar las correcciones que sean necesarias.

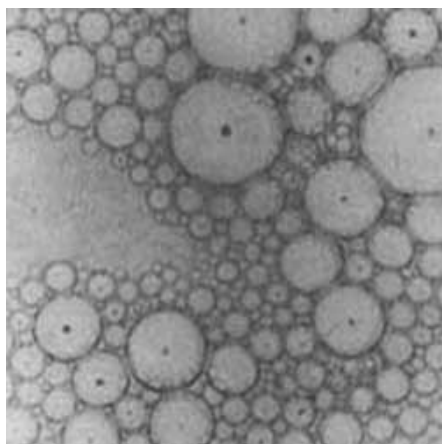
Lo más probable después de una conversión es que la densidad disminuya y la viscosidad aumente, factores que pueden corregirse fácilmente con adición de barita y agua, respectivamente.

Los lodos salados también se pueden convertir pero a causa de su difícil emulsificación con aceite, se deben tratar previa o simultáneamente con aditivos especiales para emulsiones de agua salada.

2.1. EMULSIÓN

La emulsión es una dispersión de dos líquidos inmiscibles entre sí, como por ejemplo, agua y aceite en presencia de un emulsificante. La emulsión puede ser normal si el aceite está disperso en el agua, o invertida si el agua es la fase dispersa y el aceite es la fase continua. En la figura 1 podemos apreciar las gotas de aceite en agua.

Figura 1. Emulsión de gotas de aceite en agua



Fuente: www.minera-net.com.ar

Para probar la estabilidad de la emulsión se puede utilizar dos métodos: el probador de emulsiones y la filtroprensa de alta presión y temperatura (HPHT).

El probador de emulsiones es un quipo que genera una diferencia de potencial o voltaje entre dos electrodos que se encuentran sumergidos en el lodo. Cuando la concentración de agua es elevada, el tamaño de las gotas es grande y su dispersión es baja. Se necesita una diferencia de potencial pequeña (< 400 voltios)² para que el equipo registre un flujo de corriente determinado. Una lectura de este tipo indica que la emulsión presente es inestable y necesita fortalecerse. Por el contrario una lectura de voltaje alta (> 400 voltios) sugiere una emulsión buena y estable.

La prueba de filtroprensa HPHT reafirma el concepto de estado de la emulsión. Si en el filtrado aparecen trazas de agua quiere decir que la emulsión se está rompiendo y necesita ser estabilizada con un emulsificantes. Mantener una emulsión estable y fuerte debe ser el primer objetivo de todo lodo base aceite, de ello depende el buen funcionamiento y regularidad de sus propiedades reológicas y fisicoquímicas.

2.1.1. Evolución de los lodos de emulsión inversa.

La invasión del agua en las formaciones productoras causa daños irreparables, los primeros indicios vienen de pozos de baja presión en donde no se ha podido recuperar la formaciones aún después de transcurrido el tiempo de limpieza.

La experiencia en laboratorio del análisis de corazones de formaciones invadidas por agua creó la necesidad de cambiar el fluido de perforación por uno compatible con la naturaleza de los estratos productores, es así como se introduce el aceite

² Manual de lodos Baroid

como fase continua del lodo de perforación, luego, buscando la reducción del filtrado a cero se trataron los lodos con aditivos especiales para obtener las propiedades deseadas.

El aceite utilizado para tal fin es el petróleo crudo de pozos cercanos, pero la diferencia de propiedades entre un campo y otro llegó a la unificación del aceite diesel en reemplazo de este.

Las legislaciones ambientales, principalmente en operaciones a mar abierto, llevan al estudio de fluidos con buenas propiedades para un lodo de perforación pero que no sean tan contaminantes. El diesel por tener alto contenido de compuestos aromáticos se convierte en un problema para cumplir con las leyes ambientales y acelera la investigación de otras alternativas. Entre esas alternativas tenemos³:

- Ester: Elaborado por la reacción de un ácido graso con un alcohol.
- Di-Eter: Hecho de la condensación y oxidación parcial de alcoholes.
- Poli-alfa-olefinas: Cadenas largas de hidrocarburos no aromáticos elaborado por la polimerización del etileno. Existen dos versiones, olefinas y parafinas.
-
- Alkilato detergente: También llamado alfil benceno lineal por ser un compuesto del benceno que se le ha añadido un hidrocarburo saturado.

En la tabla 1 se presenta las principales propiedades de los aceites más utilizados

³ IADC/SPE 27450

Tabla 1. Propiedades típicas de los aceites y líquidos sintéticos

Fluido Base	Gravedad Especifica	Viscosidad (CST a 104 °F)	Punto de Inflamación (°F)	Punto de Fluidez (°F)	Punto de Anilina (°F)
Aceite Diesel	0.85	3 – 4	150	14	149
Aceite mineral con contenido ultra-bajo de brea	0.81	3.5	>239	-10	-190
Aceite mineral	0.80	2 – 3	212	-0.4	169
Éster	0.85	5 - 7	354	-22	77
Polialfaolefina (PAO)	0.80	5 – 7	347	-85	225
Éter	0.83	5 – 6	330	14	104
Alfaolefina Lineal (Lao)	0.78	2 - 3	237 – 295	10 – 32	156 – 178
Olefina Interna (IO)	0.78	2 – 3	279	-11	-180
Parafina Lineal (LP)	0.77	2.5	>212	14	>200

Fuente: M-I Drilling Fluids Engineering Manual

2.1.2. Ventajas y desventajas de lodos base aceite.

En la tabla 2 se presenta las principales ventajas y desventajas del uso de lodos base aceite.

Tabla 2. Ventajas y desventajas del uso de lodos base aceite.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Buenas propiedades reológicas a temperaturas superiores a 500°F. • Son más inhibidos que los lodos base agua inhibida. • Disminuyen los problemas de corrosión. • Características de lubricación superiores. • Permite densidades bajas del lodo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto costo inicial. • Requiere control para evitar problemas de contaminación ambiental. • Reduce la efectividad en la lectura de algunas herramientas de registros. • El tratamiento para remediar las pérdidas de circulación es más difícil. • Dificulta la detección de patadas de gas debido a la solubilidad de este en el aceite.

Fuente: Applied Drilling Engineerig

2.2. COMPONENTES DEL LODO BASE ACEITE

Los componentes básicos de un fluido de perforación base aceite son: Aceite mineral, emulsificante, agua fresca, cloruro de calcio, controlador de filtrado y un viscosificante.

2.2.1. El aceite y sus características.

El aceite agregado debe poseer las siguientes características:

- Un peso específico entre 28° y 36° API
- Tener un punto de anilina elevado, de 135 o más, con el propósito de prevenir el deterioro prematuro de equipos con empaques o partes de goma.
- Un alto punto de inflamación (> 180°F)
- Bajo punto de congelación, lo que reduce el riesgo de accidentes, además que permite su utilización en ambientes extremos de frío y calor.

El aceite base utilizado a lo largo de muchos años es el diesel. Sin embargo este presenta muchos problemas de toxicidad debido a su alto contenido de aromáticos. Actualmente existen otros tipos de aceites que están siendo utilizados tales como ésteres, éteres, polialfaolefinas y alquilatos detergentes.

Los ésteres sintéticos tienen una estructura molecular similar a la de los aceites vegetales, pero presenta mayor estabilidad. Los éteres sintéticos son similares en su peso molecular a los ésteres, pero no son tan polares, son más estables térmicamente y son menos biodegradables.

2.2.2. Agua.

Esta es adicionada al lodo hasta en un 50 % en volumen para mejorar sus propiedades reológicas. Por lo general, son incorporadas sales como cloruro de calcio o cloruro de sodio, a la fase acuosa para controlar la actividad química de esta, que incurrirá en una hidratación o deshidratación de las arcillas perforadas, hecho que se produce básicamente por el fenómeno osmótico, que ocasiona la migración de agua de la zona de menor concentración a la de mayor concentración a través de una membrana semipermeable ubicada entre ellas.

2.2.3. Emulsificante.

Para emulsificar el agua en el aceite, debe existir la suficiente cantidad de emulsificante a fin de evitar formar una película alrededor de las gotas de agua previniendo que estas partículas coalescan y cambien la estabilidad de la emulsión. Un tamaño uniforme de las gotas proporcionará que la emulsión se haga más estable, para esto se necesita bastante agitación que pueda ser suministrada por las boquillas de la broca, las bombas de lodo por agitadores. Los emulsificantes están constituidos molecularmente por dos grupos que químicamente poseen afinidad tanto por el agua como por el aceite.

En el caso de fluidos de perforación de emulsión inversa, el grupo del emulsificante compatible con el agua puede ser un alcohol, una amina, un ácido o una sal. La compatibilidad por el aceite se logra con un grupo graso.

Normalmente son usados ácidos grasos con cadenas de hidrocarburos entre 12 y 20 como emulsificantes en conjunto con hidróxido de calcio.

Existen emulsificantes principal y secundario.

2.2.4. Controlador de filtrado.

Son utilizados coloides orgánicos dispersos en aceite para obtener bajas tasas de filtrado.

2.2.5. Viscosificante.

Estos son arcillas bentónicas en las cuales los cationes inorgánicos intercambiables, tales como sodio, calcio o magnesio han sido reemplazados por aminas cuaternarias grasas promoviendo así su dispersión en aceite, esta arcilla

organofílica imparte viscosidad y suspensión de sólidos tanto propios del lodo como los provenientes de la perforación.

2.2.6. Surfactante.

Los sistemas base aceite contiene ciertos surfactantes los cuales alteran el ángulo de contacto de las interfaces sólido-líquido-líquido (mojabilidad). Estos materiales causarán que un sólido llegue a ser preferencialmente mojado por agua, totalmente mojado por agua o en el caso contrario por aceite.

2.2.7. Densificante.

La barita y el carbonato de calcio son los agentes más utilizados para suministrar densidad al lodo.

2.2.8. Inhibidores de corrosión.

Su función principal es evitar el deterioro de los sistemas de tubería a causa de la alta concentración iónica del agua emulsionada.

2.2.9. Secuestrante de Oxígeno.

Además de requerir un alto punto de inflamación del aceite, conviene reducir el contenido de oxígeno disuelto en el lodo por acción de los agitadores para prevenir incendios o evitar la oxidación del acero de la tubería.

2.2.10. Fuente de Alcalinidad.

A fin de evitar problemas de corrosión el lodo debe tener un pH preferencialmente básico, para esto se utiliza la cal (Ca(OH)_2) Hasta tener un pH mayor de 9. También hace parte del proceso de saponificación de los emulsionantes.

2.2.11. Fuente de Salinidad.

Es el electrolito (cloruro de sodio o de calcio) que se incorpora en la fase dispersa para que sirva como electrolito para controlar la actividad de las arcillas hinchables. Dado que el CaCl_2 es más soluble que el NaCl , puede obtenerse con el primero una salinidad más alta. Esto determina a su vez una menor actividad de lodo, lo que puede ser necesario para ciertas secciones de lutita. El CaCl_2 ofrece al operador la posibilidad de ajustar la salinidad (o actividad) dentro del rango adecuado, mediante adiciones de CaCl_2 en polvo. Esta sal es hidroscópica y penetrará a través de la fase oleosa continua hasta el interior de la fase acuosa dispersa, en condiciones en que el NaCl no lo haría.

2.3. PROPIEDADES FISICOQUIMICAS DE LOS FLUIDOS DE PERFORACION

2.3.1. Densidad.

Es el peso de un volumen de fluido y se define como la relación de masa dividida por el volumen. Las unidades comunes de densidad del campo petrolífero son las libras por galón (lb/gal) o libras por barril (lb/bbl),

Esta propiedad define la capacidad del lodo de ejercer una contrapresión en las paredes de la perforación, controlando de este modo las presiones litostática e

hidrostática existentes en las formaciones perforadas y no exceder el gradiente de fractura.

Se determina pesando en una balanza un volumen conocido.

2.3.2. Reología.

Es la ciencia del flujo y la deformación de la materia.

Al tomar ciertas medidas en un fluido, es posible determinar la manera en que dicho fluido fluirá bajo diversas condiciones, incluyendo la temperatura, la presión y la velocidad de corte.

La Reología relacionada con los esfuerzos cortantes generados por el lodo mientras este fluye y el comportamiento del mismo en la suspensión de los cortes hasta la superficie y la generación de esfuerzos estáticos de gel para suspender los sólidos cuando se detiene la circulación.

A continuación vamos a ver las diferentes propiedades reológicas de los fluidos de perforación.

- **Viscosidad de embudo (seg/qt o seg/l):** la viscosidad de embudo se mide usando el viscosímetro de Marsh y esta viscosidad se usa como indicador relativo de la condición del fluido. No proporciona suficiente información para determinar las propiedades reológicas o las características de flujo de un fluido.

- **Esfuerzo de corte (τ) y velocidad de corte (g):** otros términos para la viscosidad se puede describir como la relación del esfuerzo de corte (τ) a la velocidad de corte (g). Por definición:

$$\text{Viscosidad } (\mu) = \text{Esfuerzo de Corte } (\tau) / \text{Velocidad de Corte (g)}$$

Dentro de un sistema de circulación, la velocidad de corte depende de la velocidad media del fluido en la geometría en que está fluyendo. Por lo tanto, las velocidades de corte son mayores en las geometrías pequeñas (dentro de la columna de perforación) y menores en las geometrías grandes (como la tubería de revestimiento y los espacios anulares).

- **Viscosidad efectiva (cP o mPa.seg):** la viscosidad efectiva (μ_e) de un fluido es la viscosidad de un fluido bajo condiciones específicas. Estas condiciones incluyen la velocidad de corte, la presión y la temperatura
- **Viscosidad aparente (cP o mPa.seg):** la viscosidad aparente (VA) es una medida relativa a la resistencia del fluido a circular. Por efectos de adhesión y cohesión proporcionado por la atracción entre las moléculas y el comportamiento de las partículas, suspendidas en el fluido de perforación. La viscosidad aparente está indicada por la indicación del viscosímetro de lodo a 300 ROM ($\theta 300$) o la mitad de la indicación del viscosímetro a 600 RPM ($\theta 600$).

$$V_a = \theta 600 / 2$$

- **Viscosidad plástica (cP o MPa.seg):** la viscosidad plástica (VP) se describe generalmente como la parte de la resistencia al flujo que es causada por la fricción mecánica. La viscosidad plástica es afectada principalmente por: la concentración de sólidos, la viscosidad de la fase fluida, la presencia de

algunos polímeros de cadena larga, las relaciones aceite-agua (A/A) o Sintético-Agua (S/A) en los fluidos de emulsión inversa.

$$VP = \theta 600 - \theta 300$$

- **Punto cedente (YP):** es el segundo componente de la resistencia al flujo en un fluido de perforación, es una medida de las fuerzas electroquímicas o de atracción en un fluido. Estas fuerzas son el resultado de las cargas negativas y positivas ubicadas en o cerca de la superficie de las partículas. El punto cedente es una medida de estas fuerzas bajo las condiciones de flujo, y depende de: (1) las propiedades superficiales de los sólidos del fluido, (2) la concentración volumétrica de los sólidos, y (3) el ambiente eléctrico de estos sólidos (concentración y tipos de iones en la fase fluida del fluido).

$$YP \left[\frac{lb}{100 ft^2} \right] = (2x\theta 300) - \theta 600$$

$$YP \left[\frac{lb}{100 ft^2} \right] = \theta 300 - VP$$

- **Esfuerzo cedente (YS):** es la fuerza requerida para iniciar el flujo; el valor calculado del esfuerzo cortante cuando la velocidad de corte es cero; es independiente del tiempo, pero se considera una resistencia gel en un tiempo cero.

Se ha determinado que para perforación de desviación controlada, de alcance extendido y horizontal, los valores de viscosidad a baja velocidad de corte (6 y 3 RPM) tienen un mayor impacto sobre la limpieza del pozo que el punto

cedente, además de proporcionar la suspensión de barita bajo condiciones tanto dinámicas como estáticas.

$$YS \left[\frac{lb}{100 ft^2} \right] = (2x\theta 3) - \theta 6$$

- **Esfuerzo de gel:** estos esfuerzos nos proporcionan una medida de la capacidad que tiene un fluido a formar una estructura de gel cuando está estático, y luego regresar al estado de fluido cuando se aplica un esfuerzo de corte. La resistencia del gel formado depende de la cantidad y del tipo de sólidos en suspensión, del tiempo, de la temperatura y del tratamiento químico. Es decir, que cualquier cosa que fomenta o impide el enlace de las partículas, aumentará o reducirá la tendencia a gelificación de un fluido.

La magnitud de la gelificación, así como el tipo de esfuerzo de gel, es importante en la suspensión de los recortes y del material Densificante. No se debe permitir que la gelificación alcance un nivel más alto del necesario para cumplir estas funciones.

Las indicaciones de esfuerzo de gel son leídas con el viscosímetro a intervalos de 10 segundos y 10 minutos, y a intervalos de 30 minutos para las situaciones críticas.

Estos esfuerzos se miden en lb/100 pies² o Pa.

2.3.3. Perdida de filtrado.

Los fluidos de perforación son lechadas que se componen de una fase líquida y partículas sólidas. La filtración se refiere a la acción mediante la cual la presión diferencial generada cuando la presión hidrostática ejercida por la columna de fluido en el pozo es mayor que la presión de formación hace entrar a la fase líquida del lodo de perforación dentro de una formación permeable. Durante este proceso, las partículas sólidas son filtradas, formando un revoque. Si la fase líquida también contiene un líquido inmiscible tal como una salmuera en un lodo base aceite, entonces las gotas del líquido inmiscible también se depositarán en el revoque o torta (cake) y contribuirán al control de filtración.

La filtración ocurre bajo condiciones tanto dinámicas como estáticas, durante las operaciones de perforación. La filtración estática ocurre cuando el lodo está en reposo (durante las conexiones, los viajes o cuando el fluido no está circulando) y el espesor de la torta aumenta con el tiempo. La filtración bajo condiciones dinámicas ocurre mientras el fluido de perforación está circulando, la torta es más delgada pero la pérdida de fluido es mayor.

Existen cinco factores que afectan principalmente la filtración: el tiempo, la diferencia de presión – compresibilidad del revoque, viscosidad, permeabilidad del revoque y composición y orientación de los sólidos.

Se tiene varios métodos para determinar el filtrado de un fluido de perforación el filtrado API a presiones moderadas de presión (100 psi) y temperatura ambiente. El filtrado de alta presión alta temperatura HPHT (APAT) a condiciones de 500 psi y 250 °F o más el filtrado PPT a condiciones de 100 psi o más y el FANN 90 que es una filtración dinámica a alta presión y alta temperatura.

Una medida de la estabilidad de la emulsión es mediante la prueba HPHT, en donde el filtrado debe ser solo aceite, presencia de agua (incluso trazas) es señal de rompimiento de la emulsión.

2.3.4. El pH.

El valor de pH se usa para describir la acidez basicidad de las soluciones. El valor de pH se define como logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno. Bajos valores de pH corresponden a una acidez creciente y altos valores de pH corresponden a una alta basicidad. Un cambio de una unidad de pH corresponde a un aumento de diez veces la concentración de iones hidrógeno.

En general los lodos de perforación deben ser alcalinos con pH que oscilen entre 8 y 13 para prevenir la corrosión en la tubería, preservar y activar los aditivos del lodo y mantener las propiedades reológicas.

2.3.5. Alcalinidad.

Las valoraciones de alcalinidad determinan las concentraciones de OH^- , HCO_3^- Y CO_3^{2-} midiendo la cantidad de ácido requerida para reducir el pH. Los boratos, silicatos, fosfatos, sulfatos y ácidos orgánicos (como el lignito) también pueden entrar en la valoración y/o los cálculos de tratamiento, en base a los valores de alcalinidad. La alcalinidad es la potencia de combinación de una base, medida por la cantidad de ácido que puede reaccionar para formar una sal.

La alcalinidad de fenolftaleína (P_{OM}) de un lodo base aceite o sintético es una medida del exceso de cal. Los sistemas convencionales de emulsión inversa usan

el emulsificante primario y el calcio de la cal para formar jabones de calcio para emulsiones. El exceso de cal puede ser calculado de la siguiente manera:

$$\text{Exceso de cal (lb/bbl)} = P_{OM} \times 1.295$$

La P_{OM} de los sistemas convencionales debería ser mantenida por encima de 2.5 cm^3 de ácido sulfúrico 0.1 N, con valores típicos comprendidos entre 5 y 10. Si la P_{OM} de un sistema convencional cae a menos de 2.5 por mucho tiempo, la emulsión puede volverse inestable. En general, una alta alcalinidad produce una emulsión de agua en aceite más estable.

2.3.6. Estabilidad de la emulsión.

La Estabilidad Eléctrica (ES) constituye una indicación relativa de la estabilidad de la emulsión. Se trata de una medida de voltaje requerido para romper la emulsión y permitir que las gotas de agua emulsionada se conecten (se fusionen), permitiendo la transmisión de la corriente eléctrica.

Las emulsiones fuertes requieren altos voltajes para fusionar las gotas de agua y romper la emulsión. La estabilidad eléctrica: contenido de agua, sólidos humectados por agua, emulsificación, temperatura y tipo de sólidos.

2.4. LODOS DE EMULSIÓN INVERSA

Comercialmente existen muchos lodos de emulsión inversa, cuyo nombre generalmente corresponde al emulsificante principal.

Los lodos de emulsión inversa (Base aceite) se clasifican en 4 categorías.

2.4.1. 100% Aceite.

Los sistemas 100% base aceite o con un contenido de agua mínimo son generalmente usados para las operaciones de extracción de núcleos donde se desea evitar la invasión del fluido de perforación que contiene agua emulsionada o cambios de la humectabilidad causados por altas concentraciones de emulsificantes y agentes humectantes. También son utilizados para perforar en condiciones de altas presiones y altas temperaturas.

2.4.2. Filtrado relajado.

Son lodos los cuales tiene bajas concentraciones de emulsificantes y de agentes controladores de filtrado. El aumento de filtrado promueve unas tasas de perforación más altas que los sistemas de emulsión apretadas. El volumen de filtrado en el lodo HT-HP es de 15-20 cc. Y son estables a temperaturas menores de 325 °F (163C).

2.4.3. De alto contenido de agua.

Llamados también sistemas de 50/50 (relación agua-aceite) o de alto contenido de agua. Estos fluidos fueron desarrollados 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. Este sistema es aplicable a temperaturas menores a 250 °F.

2.4.4. Emulsión firme.

Estos sistemas usan una alta concentración de emulsificantes y de agentes controladores de filtrado para asegurar una máxima estabilidad de la emulsión y

una mínima pérdida de filtrado. El volumen de filtrado en la prueba HT-HP es normalmente menor de 15cc, y debe contener solo aceite. Ofrecen estabilidad de la emulsión a altas temperaturas y tolerancia a los contaminantes. Se aplica principalmente en formaciones con alta temperatura (hasta 500 °F).

2.5. PREPARACIÓN DE LODOS DE EMULSIÓN INVERSA.

Es indispensable seguir rigurosamente el procedimiento en la mezcla de sus componentes para conseguir una preparación del lodo de emulsión inversa muy eficiente. Este procedimiento es descrito a continuación⁴:

Paso 1. Agregar a la cantidad de aceite (según relación agua/aceite) el controlador de filtrado, agitar durante mínimo 15min.

Paso2. En un recipiente separado agregar la sal (CaCl_2) al agua y agitar durante 15 min.

Paso3. Agregar el agente emulsificante principal, al aceite (paso 1), y agitar durante mínimo 15 min.

Paso4. Agregar la salmuera a la muestra anterior, agitar durante mínimo 15 min.

Paso5. Agregar a la muestra anterior el emulsificante secundario y agitar durante mínimo 15 min.

Paso6. Agregar a la mezcla anterior la Cal y agitar durante mínimo 15 min.

⁴ Guías de Procedimiento de preparación lodos base aceite – Msc. Emiliano Ariza

Paso7. Agregar el material pesante y agitar durante mínimo 15 min.

3. BIODIESEL

El Biodiesel es un aceite que se obtiene a partir de una gran variedad de materias primas agrícolas (aceites vegetales y/o grasas animales) y metanol.

La obtención de Biodiesel es sencilla y no requiere de una infraestructura avanzada, se parte de un aceite vegetal que se somete a un proceso de transesterificación en la cual reaccionan el aceite o las grasas con un alcohol monohídrico (metanol) en presencia de un catalizador, al finalizar este proceso podemos obtener el Biodiesel que sustituirá al Diesel convencional, fomentando un desarrollo sostenible, debido a que es renovable y amigable con el medio ambiente.

3.1. CARACTERISTICAS DEL BIODIESEL

El biodiesel es un combustible ecológico de origen renovable, biodegradable y amigable con el medio ambiente, disminuye en un 90% la cantidad de hidrocarburos totales no quemados y entre el 75% - 90% en los hidrocarburos aromáticos, con un contenido de 11% de oxígeno en peso y un 0% de azufre.

Los componentes básicos de los aceites y grasas son los triglicéridos, los cuales provienen tanto de ácidos grasos saturados como insaturados. Dependiendo de estas y otras características del origen de los triglicéridos se obtendrá un biodiesel con unas cualidades u otras.

En la tabla 3 se presenta las diferentes composiciones de ácidos grasos de diferentes orígenes.

Tabla 3. Diferentes composiciones de ácidos grasos de diferentes orígenes.

Ácidos Grasos	C14:0 Mirístico	C16:0 Palmitico	C16:1	C17:0 Magárico	C18:0 Esteárico	C18:1 Oléico	C18:2 Linoléico	C18:3 Linolénico	C20:0	C20:1	C22:0	C22:1
SME		12.9/9.9			5.2/3.8	23.8/1 9.1	46.6/55.6	7.8/10.2	0.3	0.2	0.3	
HySEE		10.3			15	24.6	48.6		0.3			
SEE		10			3.8	18.9	55.7	10.2		0.2	0.3	
SE		10.98			3.79	20.35	55.89	8.99				
TME	3	23.3			17.9	38						
TEE	3.38	26.97	2.29	1.22	24.56	39.06	2.53					
TIE	3.4	27.09	2.39	1.26	24.31	39	2.55					
GEE	0.72	14.33	1.33		9.22	47.01	25.27	2.32				
MP	1.3	97.5			1.2							
IP	1.1	96.2			2.8							
ME		1.6			97.2				1.2			
IE		1.2			97.7				1.1			
MO		0.8			2.9	91.9	4.5					
HO-SFME							0.57					

Ácidos Grasos	C14:0 Mirístico	C16:0 Palmitico	C16:1	C17:0 Magárico	C18:0 Esteárico	C18:1 Oléico	C18:2 Linoléico	C18:3 Linolénico	C20:0	C20:1	C22:0	C22:1
SFME		6.6			2.4	13.4	77.1	0.2	0.3			
LME		5.3			3.1	18.7	16.7	56.2				
RME		2.2			0.9	12.6	12.1	8		7.4	0.7	49.5
REE		2.6			0.9	12.8	11.9	7.7		7.3	0.7	49.5
CME		4			2.4	65	17.3	7.8		1.3	0.4	0.1
CEE		4			2.4	65.1	17.4	7.6		1.3	0.4	0.2
MWF		10.1			3.8	20.5	56.1	8.8				
CACAH UETE		9.0			3.3	64.8	17.7		1.3		2.6	
MAIZ		10.1			2.0	27.1	58.7	0.4	0.2		0.1	
SESAM O		9.2			6.3	44.4	39.4		0.5		0.2	
NUEZ		7.2			2.7	17.2	60.1	11.6		0.1		
SEMILL A UVA		7.2	0.1		3.9	19.9	67.3	0.1		0.1		

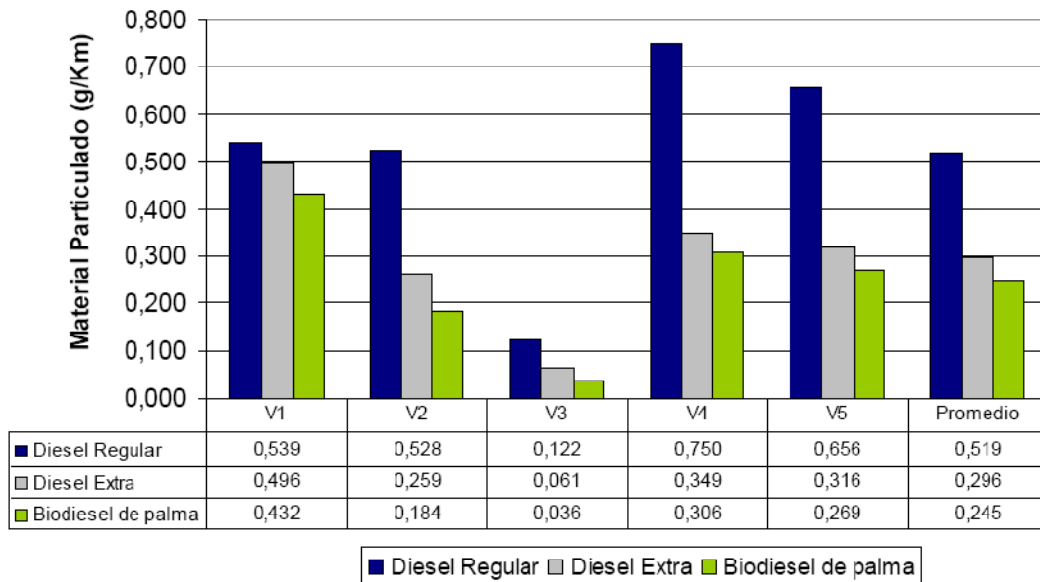
SME	Ester metílico de la soja	MO	Metil Oleato
HySEE	Ester etílico Hidrogenado de la soja	HO-SFME	Ester metílico del girasol de alto Oleico
SEE	Ester Etílico de la soja	SFME	Safflower Metil Ester
SIE	Ester Isopropílico de la soja	LME	Lindseed Metil Ester
TME	Ester Metílico del sebo de vaca	RME	Ester metílico de la Colza
TEE	Ester etílico del sebo de vaca	REE	Ester etílico de la Colza
TIE	Ester Isopropilico del sebo de vaca	CME	Ester metílico Del Nabo Francés
GEE	Ester Etílico de la grasa	CEE	Ester Etílico del Nabo Francés
MP	Metil Palmitato	MWF	Midwest Biofuel
IP	Isopropil	ME	Metil Estearato

Fuente: J. Ignacio Ciria www.wearcheckiberica.es

3.2. ASPECTO AMBIENTAL

Los estudios que se realizan en varios países han confirmado la disminución en las emisiones de gases efecto invernadero en comparación con el combustible diesel. Su efecto se evidencia principalmente en la reducción de emisiones de material particulado, monóxido de carbono e hidrocarburos totales. A continuación podemos observar en la figura 2 las comparaciones entre diesel y biodiesel en emisiones de material particulado.

Figura 2. Comparación de las emisiones de material particulado entre los combustibles diesel y el biodiesel de palma



Fuente: Convenio Copetrol-ICP, Cenipalma

Todos los combustibles fósiles son contaminantes del medio ambiente a través de los gases que salen del escape. El gasoil mineral, no escapa a esta regla.

1. Uno de los contaminantes más importantes es el azufre. El azufre sale por el conducto de escape como óxido de azufre (SOx), el cual con la humedad del aire se convierte en ácido sulfúrico, contribuyendo a la generación de lluvia ácida. Existe una tendencia mundial a reducir el contenido de azufre permitido en los combustibles. En Estados Unidos se está regulando desde el año 2006 todo gasoil que se expenda y que debe tener 0 de azufre. En Europa se va por el mismo camino. Los fabricantes de motores diesel también están muy interesados en que se reduzca debido a que el azufre ocasiona un fuerte ataque químico en la bomba inyectora, válvula de escape, colector de gases de escape, turbina, etc., sobre todo en los motores con turbo-inyección.
2. Otro contaminante es el nitrógeno. Sin embargo es justo reconocer que en los gases de escape el contenido de óxidos nitrosos es levemente superior cuando se usa biodiesel (un 10 %) que en los humos de un motor que está utilizando diesel mineral. Los óxidos nitrosos también son precursores de la lluvia ácida (generan ácido nítrico), pero en el balance general al comparar la suma de los efectos de SOx y NOx del 100 % de biodiesel (B100) con 100% de diesel, vemos que el biodiesel es menos contaminante.
3. Ahora bien, en los otros contaminantes, el biodiesel es francamente menos contaminante. No tiene aromáticos polinucleares. El contenido de combustible no quemado y el monóxido de carbono presente en los gases de escape son menores y también las partículas y los aldehídos.

Hay que decir que no se puede hacer una comparación absoluta de si es mejor o es peor el biodiesel que el diesel convencional. En líneas generales se puede decir que es similar, a veces mejor, otras no tanto. Depende de que biodiesel se use para realizar la comparación y con qué diesel se le compare.

La calidad del biodiesel depende de dos factores importantes.

- Tipo de aceite de origen.
- Calidad de fabricación.

El gasoil también posee diferentes calidades en función del proceso realizado en la refinería y si en la misma el diesel fue aditivado para mejorar el índice de cétano. Las normas exigen que el índice cetano mínimo sea 40. Generalmente el diesel que se expende en el mercado tiene por encima de 50, y en algunos casos en los que se ha utilizado un buen aditivo supera los 50 e incluso los 55. El biodiesel tiene en general más de 50, pero también depende del aceite con que se ha fabricado.

Otro aspecto, que afecta al consumo específico, es el poder calorífico, el cual es un algo inferior al del diesel. Respecto al motor en el cual se va a utilizar el biodiesel, en general no requieren grandes modificaciones, salvo cambios de ciertos metales que se disuelven con el biodiesel (Cu) y de juntas poco resistentes por unas de mejor material (Vitón). Esto es debido al alto poder solvente del metil éster. Debido a estas capacidades solvente y detergente tan altas, el biodiesel elimina toda la suciedad y a veces algo de pintura de los tanques y conductos de combustible, en aquellos motores que han usado tradicionalmente diesel y de pronto comienzan a usar biodiesel. Esto obliga en un principio a limpiezas periódicas de los filtros de combustible. Por ser un producto de mayor peso molecular y mayor temperatura de ebullición promedio, suele haber pequeñas cantidades que se escurren por las paredes y pasan al cárter. No afecta mayormente al lubricante, debido a que el biodiesel tiene un muy buen poder lubricante, pero la disminución de la viscosidad podría ocasionar cambios más frecuentes del aceite. Siempre conviene consultar al fabricante.

A la hora de usar biodiesel se deben considerar varios aspectos: Uno es el punto de vista de la menor contaminación, en el cual el biodiesel se impone.

Hay otro aspecto importante, que es el del costo del biodiesel comparado con el diesel. Este es un tema complejo y cambiante, donde intervienen varios factores, como ser los costos de fabricación, los impuestos, la materia prima, etc.

Emisiones Contaminantes. El biodiesel produce combustiones más eficaces debido a la presencia del oxígeno de las moléculas del éster en el núcleo del spray:

- mejora el rendimiento de la combustión.
- Una importante disminución en la cantidad de partículas emitidas (menor opacidad en los humos). Esto se ve influenciado por el mayor NC.
- Una menor emisión de CO y HC sin quemar.
- El biodiesel está compuesto por cadenas largas de carbono similares a las parafinas del diesel. De esta manera se diluye el contenido en aromáticos reduciendo las partículas.
- Balance en emisiones de CO₂ nulo debido a que se origen es biológico.

Impacto ambiental. El Biodiesel puro (B 100) comparando con el Diesel, reduce las emisiones de todos los contaminantes, incluyendo materias particuladas, excepto el NO_x En el balance general se reduce el *smog* potencial Se reducen los niveles de hidrocarburos poliaromáticos (cancerígenos) en un 75% El benzo(a) antraceno se reduce en un 50%.

3.3. ASPECTO ECONÓMICO

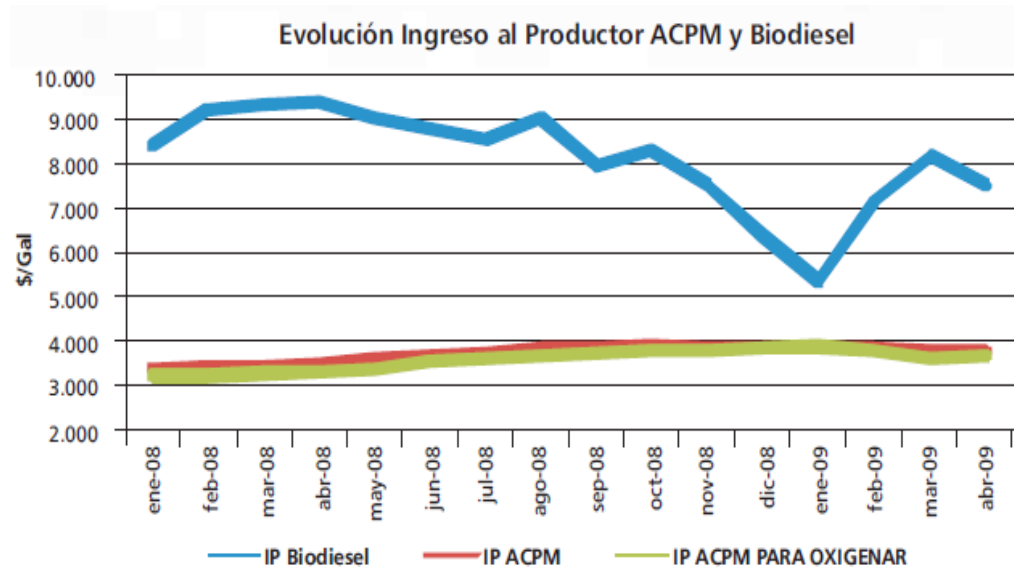
En Colombia, la producción industrial de biodiesel inició en enero de 2008 y se optó por la utilización del aceite de palma como materia prima, dados los desarrollos alcanzados en este sector. En este sentido, Colombia tiene una posición privilegiada frente a muchos otros países al ser el mayor productor de aceite de palma en Latinoamérica y el quinto en el mundo. El aceite de palma es uno de los principales aceites vegetales y ha llegado a convertirse en el de mayor producción a nivel mundial. Es el cultivo oleaginoso que mayor cantidad de aceite produce por unidad de área sembrada y por lo tanto, es la materia prima que ofrece mejores posibilidades para su producción a nivel nacional.

El precio actual del biodiesel es \$ 8360,21 fijado para el mes de enero de 2010, y el precio del diesel promedio para Colombia en estación de servicio es de \$ 5,968.05 lo que significaría un aumento en costo por materia prima del 28.66%.

Teniendo en cuenta que la utilización de biodiesel requiere algunas variaciones en el sistema de circulación, en los equipos de tratamiento y adecuación del lodo para desecharlo, es conveniente decir que la viabilidad económica requeriría un estudio técnico y avanzado que contemple un modelo global de implementación en campo adicionando todos y cada uno de los factores que influyen en repercusiones económicas para poder establecer un factibilidad desde el punto de vista netamente económico.

Como nos muestra la figura 3 la diferencia de los precios entre diesel y biodiesel generaría un notorio incremento en el costo de la preparación del lodo.

Figura 3. Diferencia de precios entre Diesel y Biodiesel



Fuente: UPME

3.4. PRINCIPALES DIFERENCIA ENTRE DIESEL Y BIODIESEL

De la comparación entre el Biodiesel y el Diesel se puede sacar las siguientes conclusiones:

- La densidad y la viscosidad cinemática aumentan notablemente respecto al Diesel.
- El punto de fusión es más favorable para el diesel frente al biodiesel. Esto es sobre todo importante en las regiones frías.
- El índice cetano, que tiene que ver con el funcionamiento de los motores es superior en el metil éster respecto del diesel. Esta diferencia se hace más notable en aquellos metilésteres con mayor cantidad de ácidos grasos saturados y se constituyen en buenos aditivos para mejorar el índice de cetano.

- La destilación en general no está tomada en cuenta en las normas de especificación, porque el Metiléster (en realidad una mezcla de metil ésteres) tiene un rango muy estrecho.
- El Punto de inflamación es muy superior al del diesel, por lo que le garantiza mayor seguridad en el manipuleo y almacenaje.
- El azufre no está presente.
- El poder calorífico no se modifica notablemente, aunque es menor en el Biodiesel.

3.5. PROBLEMAS DEL BIODIESEL FRENTE AL DIESEL

a) Incompatibilidad a bajas temperaturas.

Uno de los mayores problemas que se encuentran a la hora de decidir el uso de Biodiesel como combustible es el de las malas propiedades que posee a bajas temperaturas. Generalmente, tanto los Puntos de Congelación (PC), Puntos de Nube (PN), como el Punto de Obstrucción por Filtros Fríos (POFF) son desde ligeramente superiores a muy superiores dependiendo del origen del éster (aceite de maíz, oliva, etc.)

Para un Biodiesel procedente de un aceite residual el POFF está entre -7 y 0°C , lo cual es insuficiente para invierno. Utilizando un Biodiesel de origen animal el POFF es todavía superior.

b) Mayor Viscosidad.

Debido a que el biodiesel tiene una viscosidad mayor que el diesel pueden existir problemas de pérdidas de flujo a través de los filtros e inyectores.

c) Ataque al Cu y Pb

El Pb se desgasta muy rápido en presencia del Biodiesel. El Cu también parece que es atacado por el Biodiesel.

d) Presencia de Medio Microbiano

La presencia de microbios provoca la corrosión del sistema y una colmatación de los filtros prematura. Podría usarse aditivos anti-microbianos. El contenido en agua acelera la presencia de microbios.

e) Problemas de Estabilidad

- Posee menor estabilidad a la oxidación que el diesel debido a que posee dobles enlaces y oxígeno en su molécula. Esto es importante a la hora de almacenar durante mucho tiempo el biodiesel.
- El uso de recipientes acero o aluminio para almacenar el biodiesel no afecta negativamente a su estabilidad.
- La utilización de recipientes que contengan cobre, cinc, plomo o alguna combinación de estos tres afecta de manera muy negativa a la estabilidad ya que forma gran cantidad de sedimentos.

En conclusión el biodiesel por sus características puede ser una excelente opción para reemplazar al diesel como fase continua en lodos base aceite.

4. PROPUESTA PARA USO DEL BIODIESEL COMO FASE CONTINUA DE LOS LODOS BASE ACEITE

Este estudio de la utilización del biodiesel surge como la continuación de estudios realizados previamente con la finalidad de encontrar un sustituto a la fase continua amigable para el medio ambiente, entre estos posibles sustitos han sido analizados en investigaciones anteriores en la Escuela de Ingeniería de Petróleos en la Universidad Industrial de Santander aceites vegetales tales como el aceite de palma y la glicerina. A nivel internacional se conocen estudios con diversos aceites vegetales como la soya el ajonjolí y otros más cuya tendencia es el mismo objeto de nuestro estudio.

4.1. ANTECEDENTES SOBRE EL USO DE ACEITE VEGETALES PARA LODOS

Como se mencionó anteriormente, se han realizado dos estudios:

ESTUDIO DE LA FACTIBILIDAD DEL USO DEL ACEITE DE PALMA COMO FASE CONTINÚA EN LODOS DE PERFORACION DE EMULSION INVERSA

Autores: ACOSTA GONZALES Sergio y RUEDA VARGAS Germán

Este proyecto fue realizado en el año de 2002 bajo la dirección de Msc. Emiliano Ariza León cuyas respuestas a sus estudios se ve reflejada en las siguientes conclusiones escritas por sus autores:

- La viscosidad del lodo preparado con aceite de palma resulta ser excesivamente viscoso.

- La viscosidad para los tipos de lodos aumenta cuando la cantidad de agua en la fase dispersa es mayor. El agua, al estar emulsificada y sus partículas tener tamaño miscelar, se comporta como un sólido.
- El aceite de palma es compatible con la mayoría de los aditivos para lodos base aceite, sin embargo, la incompatibilidad con la cal no hace factible su utilización en lodos de perforación debido que hasta el momento no se conoce un producto comercial que reemplace la cal en la formulación del lodo base aceite.
- La solidificación progresiva del aceite de palma con el paso del tiempo hace pensar que el almacenamiento del lodo para su utilización en la perforación de otros pozos no es recomendable.

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DEL USO DE LA GLICERINA COMO FASE CONTINÚA EN FLUIDOS DE PERFORACIÓN DE EMULSIÓN INVERSA

Autores: BERNA ARTEAGA Tatiana y ILIAS MEGAREJO Ibis

Este proyecto fue llevado a cabo en el año de 2008 bajo la dirección de Msc. Emiliano Ariza cuyas respuestas a sus estudios se ve reflejada en las siguientes conclusiones escritas por sus autores.

- Técnicamente, no es factible el uso de la glicerina cruda, producto del proceso de transesterificación del aceite de palma para la obtención de biodiesel, como fase continua en fluidos de perforación de emulsión inversa.
- En los análisis de viscosidad las formulaciones preparadas con glicerina resultan ser excesivamente viscosas.
- Los filtrados obtenidos en las pruebas de HPHT son muy altos, independientemente de la cantidad y del controlador de filtrado empleado.

- La glicerina es compatible con la mayoría de los aditivos para lodos base aceite, sin embargo, la cantidad de aire que queda atrapada dentro de los lodos que se preparan con dichos aditivos no hace factible su uso en fluidos de perforación, debido a que ningún antiespumante empleados fue capaz de eliminar tal cantidad de aire.

OTRAS INVESTIGACIONES CONOCIDAS

- En 1993 la SPE publicó “Biodegradable Muds: An Attractive Answer to Environmental Legislations Around Offshore Drilling” donde abre el camino para las investigaciones y deja en claro las ventajas muy seductoras del uso de materiales biodegradables en comparación con el uso del diesel normal que en esa fecha era usado⁵.
- En 1997 en el 15 congreso mundial de petróleo se destaco la capacidad de los aceites vegetales como aditivos en lodos base agua y base pseudo-aceite en la publicación “Potential of New Drilling Formulations” donde se destaca las altas temperaturas de operación y el aumento de la rata de penetración debido a los cambio efectuados por estos aditivos⁶.
- La SPE en el año de 2005 publico: “Physio-Chemical Characterisation of Vegetable Oils and Preliminary Test Results of Vegetable Oil-based Muds”, donde provee una caracterización y resalta los aceites vegetales como fase continua para lodos de perforación sin cambios sustanciales en la reología y con una seguridad para ser usado en la operaciones a alta temperatura⁷.

⁵ Paper Number 26737-MS Authors Degouy, Didier, Argillier, J-F., Inst. Francais du Petrole; Demoulin, Andre, Velghe, Firmin, Fina Research

⁶ Paper Number 28258 Authors A. Audibert, J-F. Argillier and J. Lecourtier, (Institute Français du Petrole, France); A. Demoulin, (Fina Chemicals, Belgium)

⁷ Paper Number 97008-MS Authors Md. Amanullah, SPE, CSIRO Petroleum

- Especialistas de Pdvsa-Intevep desarrollaron, con resultados muy positivos, en el año de 2005 un aceite a base de soya para formular fluidos de perforación, a partir de derivados de aceite vegetal, reduciendo al mínimo el impacto ambiental. Los expertos en el área de Fluidos de Perforación del brazo tecnológico de PDVSA, aseguran que el fluido no es tóxico y es biodegradable. Además, a diferencia de otros sistemas convencionales, los ripios o recortes de perforación pueden ser descargados al mar, lo cual se traduce en un significativo ahorro por concepto de transporte y tratamiento de los mismos, pues no hace falta llevarlos a tierra para su posterior disposición. Cabe destacar que el empleo de la soya, como elemento predominante en la elaboración del fluido, podría dar paso al uso de otros insumos, tales como aceites de maíz o de ajonjolí e, incluso, aceites de ceje o estropajo.

4.2. CARACTERIZACIÓN DEL BIODIESEL Y DIESEL

Dentro del presente trabajo de investigación primeramente fueron caracterizados los aceites biodiesel (de palma) y diesel, los resultados se presentan en la Tabla 4. Estas pruebas fueron realizadas en el laboratorio de fluidos de la Escuela de Ingeniería de Petróleos de la UIS y es importante resaltar que se realizaron dos repeticiones por cada prueba y se tomó el valor medio.

Tabla 4. Caracterización del BIODIESEL Y DIESEL

PROPIEDAD	BIODIESEL	DIESEL	% DE DESVIACION
Temperatura Ambiente	82.5 °F	82.5	0
Gravedad °API	31.8 ° API	34.3 °API	7.3
Densidad	0.867 g/cc	0.853 g/cc	1.6
Punto de Relampagueo	344 °F	184°F	87
Punto de Fuego	378 °F	192 °F	97
Punto de Anilina	> 200 °F	154.6 °F	---

Las propiedades del biodiesel cumplen con las exigencias de los aceites para ser utilizado en fluidos de perforación.

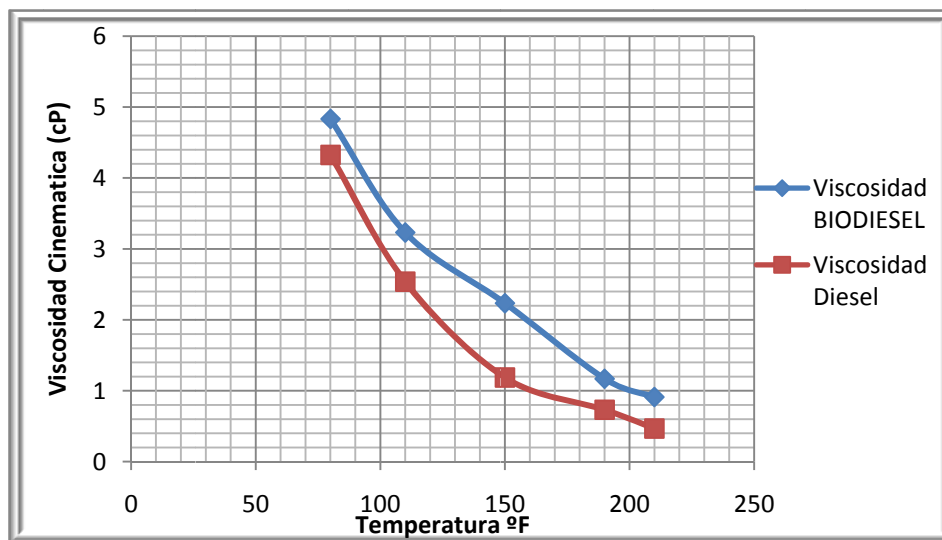
También se evaluó el comportamiento de la viscosidad del diesel y biodiesel con la temperatura utilizando el viscosímetro Saybolt que se basa en el principio de flujo por gravedad de un volumen determinado de líquido que pasa a través de un orificio calibrado. También se hizo repetitividad y se tomo el promedio; Los resultados se muestran en la Tabla 5 y figura 3.

Tabla 5. Viscosidad del Biodiesel y Diesel a diferentes temperaturas con el valor medio

TEMPERATURA (°F)	VISCOSIDAD BIODIESEL (cP)	VISCOSIDAD DIESEL (cP)	% DE VARIACION
80	4,83	4,33	11.5
110	3,23	2,54	27.2
150	2,23	1,19	87.4
190	1,17	0,73	60.3
210	0,91	0,47	93.6

En la figura 4 podemos observar la variación de la viscosidad del BIODIESEL y del DIESEL con la temperatura.

Figura 4. Variación de la viscosidad del Biodiesel y el Diesel a diferentes temperaturas



A pesar de que las viscosidades del biodiesel son superiores a las del diesel, son bajas y brindan una buena opción para ser utilizado en el lodo base aceite.

5. FORMULACION DE LOS LODOS DE EMULSIÓN INVERSA USANDO BIODIESEL COMO FASE CONTINUA

El biodiesel por sus características técnicas, ambientales y económicas brinda una opción importante para ser utilizado en lodos.

En La preparación de lodos se utilizaron los aditivos comerciales para lodos base aceite y la formulación fue la misma en cada caso cambiando solamente la base: diesel por biodiesel. Se midieron las propiedades y compararon sus resultados. Estas pruebas fueron realizadas en el laboratorio de fluidos de la Escuela de Ingeniería de Petróleos de la UIS

5.1. DISEÑO EXPERIMENTAL

5.1.1. Reconocimiento y formulación del problema.

En la industria petrolera, los fluidos de perforación base aceite generalmente emplean diesel como su fase continua, el presente trabajo de grado tiene como propósito fundamental, plantear una nueva opción basada en el estudio de la posibilidad de aprovechar el biodiesel, producto del proceso de transesterificación de aceites vegetales, como fase continua en fluidos de perforación de emulsión inversa.

El objetivo principal de este proyecto es identificar si existe o no viabilidad técnica para el uso de biodiesel como fase continua en lodos de perforación, identificando la similitud de las propiedades del lodo base biodiesel contra los de lodos base diesel.

Debido a que se involucran distintas variables según cada tipo de formulación que encontramos, es apropiado utilizar un diseño experimental para cada formulación y tomar el de sistema de lodo 100% aceite como una prueba de análisis.

5.1.2. Selección de los factores.

Debido que en el proceso de preparación de lodos base aceite, los aditivos que usaremos están bien definidos y proporcionan el incremento o decrementos de las propiedades para lo que son requeridos y asumiendo que no presentan problemas de compatibilidad, los aditivos son las variables de bloqueo y el biodiesel es la variable independiente proporcionando de esta forma un modelo unidimensional para cada tipo de preparación y tomando como variables de respuesta la comparación de las propiedades de cada preparación contra su similar en base de diesel.

Variable Independiente: El porcentaje de biodiesel que se emplea en cada formulación (relación agua/aceite) influirá en las propiedades del lodo. Por defecto el porcentaje de agua también será una variable independiente.

Variables dependientes: Serán las propiedades del lodo, las cuales serán afectadas por la variación en la concentración del aceite. Ellas son: Propiedades reológicas, pérdidas de filtrado, densidad, etc.

Variables de bloqueo: Puesto que la efectividad de los aditivos a emplear es comercial y por tanto está comprobada, el efecto de estos en la preparación del lodo será considerado como constante. Se utilizará la concentración promedio de los valores recomendados por el fabricante de los productos.

Además serán variables de bloqueo la temperatura y la presión, porque todas las pruebas se realizaran a las mismas medidas de estas variables.

Planteando el diseño en términos de parámetro medibles tendremos:

Concentración Biodiesel	Independiente
Concentración Agua	Independiente
Estabilidad de Emulsión	Dependiente
Tasa de filtración (HPHT)	Dependiente
Viscosidad	Dependiente
Densidad	Dependiente
Reología	Dependiente

Como el diseño seleccionado fue el modelo unidimensional⁸ no requerimos de un número de pruebas específico, solo es necesario repetitividad y comparación de los resultados para un correcto análisis. Manejaremos los variables dependientes en valore promedios para observar sus alcances de respuesta.

5.2. PRUEBAS DE COMPATIBILIDAD

Los aditivos para lodos de perforación de emulsión inversa fueron colocados individualmente en contacto con el BIODIESEL Para observar su grado de compatibilidad; esta prueba se realizó durante 44 días realizando observaciones periódicas.

Los aditivos genéricos utilizados fueron:

⁸ MONTGOMERY, Diseño y Análisis de Experimentos (2ª Ed. 2002) WILEY

- **Viscosificante.** Es una arcilla bentonítica tratada con un compuesto de aminas que desarrolla las propiedades de viscosidad y suspensión; requiere un aditivo polar (p.ej. Agua) para desarrollar máximo rendimiento; este producto fue desarrollado para crear más rápidamente capacidad de suspensión y de acarreo de los recortes en lodos de aceite, con menor corte y temperaturas más bajas
- **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.
- **Emulsificante No. 1.** Acido graso poliaminado, se utiliza para emulsificar agua en aceite en los fluidos de perforación base aceite. Se emplea para mejorar las características de humectación de aceite y fue ideado para aplicarlo en lodos base aceite con alto contenido de sales divalentes en la fase acuosa del fluido.
- **Emulsificante No. 2.** Es un emulsificante cuyo principal atributo es la disminución del filtrado HPHT, manteniendo una alta estabilidad y buen desempeño del lodo, con tan solo 2lpb este aditivo puede mantener filtrados HPHT por debajo de los 5 ml.
- **Alcalinizante:** Hidróxido de calcio Ca(OH)_2 utilizado como fuente de alcalinidad y para saponificar el emulsificante principal.
- **Cloruro de Calcio:** Utilizado para dar salinidad a la fase acuosa del lodo.

Las cantidades de cada aditivo agregado al biodiesel para la prueba de compatibilidad se observa a continuación en la tabla 6.

Tabla 6. Cantidad de aditivo y tiempo de agitación

Muestra	Tiempo de Agitación (Min)	Cantidad Biodiesel (ml)	Cantidad del Aditivo (gr)
Biodiesel		350	0
Biodiesel + Viscosificante	3	350	14
Biodiesel + Controlador de Filtrado	3	350	25
Biodiesel + Emulsificante Primario	15	350	8
Biodiesel + Emulsificante Secundario	15		8
Biodiesel + Cal	3	350	10
Biodiesel + CaCl ₂	2	350	1

Después de 40 días se revisaron las muestras y se encontraron como se muestras en la figura 5.

Figura 5. Pruebas de compatibilidad



De izquierda a derecha tenemos: Emulsificante #2, Alcalinizante, NaCl, Controlador de filtrado, Viscosificante, Emulsificante principal, CaCl_2

En la tabla 7 se muestra la tabla de resultados de la compatibilidad

Tabla 7. Resultados de compatibilidad

Muestra	BIODIESEL
Biodiesel + Viscosificante	Compatible
Biodiesel + Controlador de Filtrado	Compatible
Biodiesel + Emulsificante Primario	Compatible
Biodiesel + Emulsificante Secundario	Compatible
Biodiesel + Cal	Compatible
Biodiesel + CaCl ₂	Compatible

Se dice que la muestra es incompatible si se nota alguna reacción adversa entre las dos sustancias como formación y precipitación de sólidos de tamaño considerable, formaciones de gas, cambios en la viscosidad o fluidez de la muestra.

En nuestro caso no observamos ninguna alteración entre el aditivo y el biodiesel, siendo compatible con cada uno de ellos.

5.3. PREPARACIÓN DE LAS FORMULACIONES Y REALIZACIÓN DE PRUEBAS

5.3.1. Formulaciones con diesel y biodiesel.

Se prepararon lodos con diesel y biodiesel utilizando los cuatro tipos: emulsión firme, filtrado relajado, de alto contenido de agua y aceite 100%, Estas formulaciones se hicieron con la cantidad de aditivo promedia recomendada en cada caso por el fabricante, lo cual se muestra en las tablas 8, 9,10, y 11.

Es importante aclarar que este trabajo no se utilizó ningún material pesante.

EMULSION FIRME

Las relaciones O/W: 80/20; 60/40

Tabla 8. Formulación de Emulsión Firme

FUNCIÓN	CONCENTRACIÓN, Lb/bbl
Fase continua	Según Se Requiera O/W
Emulsionante principal	7
Fuente de alcalinidad	3.5
Agente de controlador de filtrado	7
Fase Discontinua	Según Se Requiera O/W
Viscosificante	1.75
Viscosificante Secundario	1.5
Fuente de salinidad	2

FILTRADO RELAJADO

Las relaciones O/W: 80/20; 60/40

Tabla 9. Formulación de Filtrado relajado

FUNCIÓN	CONCENTRACIÓN Lb/bbl
Fase Continua	Según Se Requiera O/W
Emulsificante	3
Fuente de Alcalinidad	4
Controlador de Filtrado	1.5
Fase Discontinua	Según Se Requiera O/W
Viscosificante	5
Emulsionante	1
Fuente de Salinidad	2

ALTO PORCENTAJE DE AGUA

Las relaciones O/W: 50/50; 40/60

Tabla 10. Formulación de Alto porcentaje de agua

FUNCIÓN	CONCENTRACIÓN lb /bbl
Fase Continua	Según Se Requiera O/W
Emulsionante Principal	1.5
Controlador de filtrado	6
Fuente de Alcalinidad	4
Fase Discontinua	Según Se Requiera O/W
Viscosificador	1.5
Emulsionante Secundario	6
Fuente de Salinidad	2

SISTEMAS DE LODO (100 % ACEITE)

Tabla 11. Formulación de Sistemas de perforación 100 % Aceite

FUNCIÓN	CONCENTRACIÓN lb /bbl
Fase Continua	100 %
Fuente de Alcalinidad (cal)	5.5
Emulsificante pasivo	1
Emulsificante	3
Controlador de Filtrado	10
Viscosificador	10

5.3.3. Pruebas

5.3.3.1. Prueba de Reología

Objetivo: Determinar las lecturas del viscosímetro para calcular las siguientes propiedades de un fluido de perforación:

- Viscosidad plástica (VP)
- Viscosidad Aparente (VA)
- Esfuerzo Cedente (YS)
- Punto cedente (YP)
- Resistencia del gel

5.3.3.2. Prueba de Filtrado APAT (Alta Presión / Alta Temperatura) o HPHT

Objetivo: Medir el volumen del filtrado y la costra de lodo de un fluido de perforación usando el método de alta presión/alta temperatura (APAT).

5.3.3.3. Densidad

Objetivo: Medir las densidades de un fluido de perforación.

Unidad: Densidad lpg

5.3.3.4. Filtrado API

Objetivo: Medir la cantidad de pérdida de filtrado para ser analizado posteriormente en las pruebas químicas y realizar el análisis de la torta o cake.

5.3.3.5. Pruebas químicas para lodos base aceite.

Objetivo: Determinar la alcalinidad, el contenido de cal, cloruros y calcios en un lodo base aceite.

Unidad:

- Cloruros y calcios: mg/L

Los resultados de las pruebas se presentan en las tablas 12 y 13.

Tabla 12. Resultado de pruebas con Biodiesel

Variables	Unidades	100% Aceite	Firme 80/20	Firme 60/40	Relajado 80/20	Relajado 60/40	% Agua 50/50	% Agua 40/60
Ø600	lb/100 ft ²	14	32.5	160	42	183	230	>300
Ø300	lb/100 ft ²	7	18	124	26	151	180	>300
Ø200	lb/100 ft ²	5	13	84	19	135	158	276
Ø100	lb/100 ft ²	2.5	8	42	14	116	128	230
Ø6	lb/100 ft ²	1	3	24	7	55	60	121
Ø3	lb/100 ft ²	1	2.5	16	4	28	41	75
Resistencia Gel 10"/10'		1/1	2/2.5	12/16	3/4	22/24	37/41	65/70
VP	cP	7	14.5	36	16	32	50	---
VA	cP	7	16.25	80	21	91.5	115	---
YP	lb/100 ft ²	0	3.5	88	10	119	130	---
YS	lb/100 ft ²	1	2	8	1	1	22	29
HPHT 300 °F y 500 psi	ml	2	2	2.6	2	2	6	4
Peso Lodo	lpg	7.5	6.1	7.2	7.5	7.65	7.45	7.9
CI	mg/L	6000	6000	5000	4000	5000	4000	3000
% Agua	% (vol)	0	20	36	15	38	48	58
% Aceite	%(vol)	88	52	50	63	44	40	24
% Sólidos	%(vol)	12	28	14	22	18	12	18
Cake	x/32"	4/32	No se Forma	<1/32	2/32	1/32	1/32	<1/32
		Consist.	No se Forma	Inconsist.	Inconsist.	Inconsist.	Inconsist.	Inconsist.
		Plástica	No se Forma	Quebradiza	Quebradiza	Quebradiza	Quebradiza	Plástica

Tabla 13. Resultado de pruebas con Diesel

Variables	Unidades	100% Aceite	Firme 80/20	Firme 60/40	Relajado 80/20	Relajado 60/40	% Agua 50/50	% Agua 40/60
∅600	lb/100 ft ²	15	33	86	37	150	150	260
∅300	lb/100 ft ²	9.5	19	61	21.5	101	104	191
∅200	lb/100 ft ²	6.5	13	50	16	77	91.5	165
∅100	lb/100 ft ²	4	8	38	11	54	69	130
∅6	lb/100 ft ²	1.5	3	18	5	14	33	69
∅3	lb/100 ft ²	1	2	16	3	10	29	65
Resistencia Gel 10"/10'		1/1	2/2	14/17	3/3	8/10	24/28	56/59
VP	cP	5.5	14	25	15.5	49	46	69
VA	cP	7.5	16.5	43	18.5	75	75	130
YP	lb/100 ft ²	4	5	36	6	52	58	122
YS	lb/100 ft ²	0.5	1	14	1	6	25	61
HPHT 300 °F y 500 psi	ml	1	1	1.2	4	2	2	2.4
Peso Lodo	lpg	7.35	<6	7.5	6.2	7.3	7.45	7.6
Cl	mg/L	3000	4000	4000	4000	3000	3000	3000
% Agua	%(vol)	0	15	18	15	36	42	54
% Aceite	%(vol)	85	53	44	51	35	30	22
% Sólidos	%(vol)	15	32	38	34	29	28	24
Cake		Película de Torta	Película de Torta	Inconsist.	Película de Torta	Inconsist.	Inconsist.	Inconsist.
		---	---	Plástica	---	Quebradiza	Quebradiza	Quebradiza
	x/32"	---	---	<1/32	---	2/32	<1/32	<1/32

A continuación se presenta los resultados detallados para cada formulación (Tablas 14-27) y sus respectivas figuras (figura 6-39)

Tabla 14. Formulación 100 % Aceite

Formulación	Unidades	BIODIESEL	DIESEL
Θ600	lb/100 ft ²	14	15
Θ300	lb/100 ft ²	7	9.5
Θ200	lb/100 ft ²	5	6.5
Θ100	lb/100 ft ²	2.5	4
Θ6	lb/100 ft ²	1	1.5
Θ3	lb/100 ft ²	1	1
Resistencia Gel 10"/10'		1/1	1/1
VP	cP	7	5.5
VA	cP	7	7.5
YP	lb/100 ft ²	0	4
YS	lb/100 ft ²	1	0.5
HPHT 300 °F y 500 psi	ml	2	1
Peso Lodo	lpg	7.5	7.35
Cl	mg/L	6000	3000
% Agua	%(vol)	0	0
% Aceite	%(vol)	88	85
% Sólidos	%(vol)	12	15
Cake	x/32"	4/32	Película de Torta
		Consist.	---
		Plástica	---

Tabla 15. Reología de Formulación 100 % Aceite

BIODIESEL				DIESEL			
RPM	v (1/s)	θ RPM (lb/100ft ²)	μ Efec (Cp)	RPM	v (1/s)	θ RPM (lb/100ft ²)	μ Efec (Cp)
600	1020	14	7	600	1020	15	7,5
300	510	7	7	300	510	9,5	9,5
200	340	5	7,5	200	340	6,5	9,75
100	170	2,5	7,5	100	170	4	12
6	10,2	1	50	6	10,2	1,5	75
3	5,1	1	100	3	5,1	1	100

Figura 6. Viscosidad efectiva vs. Velocidad de Corte 100 % Aceite

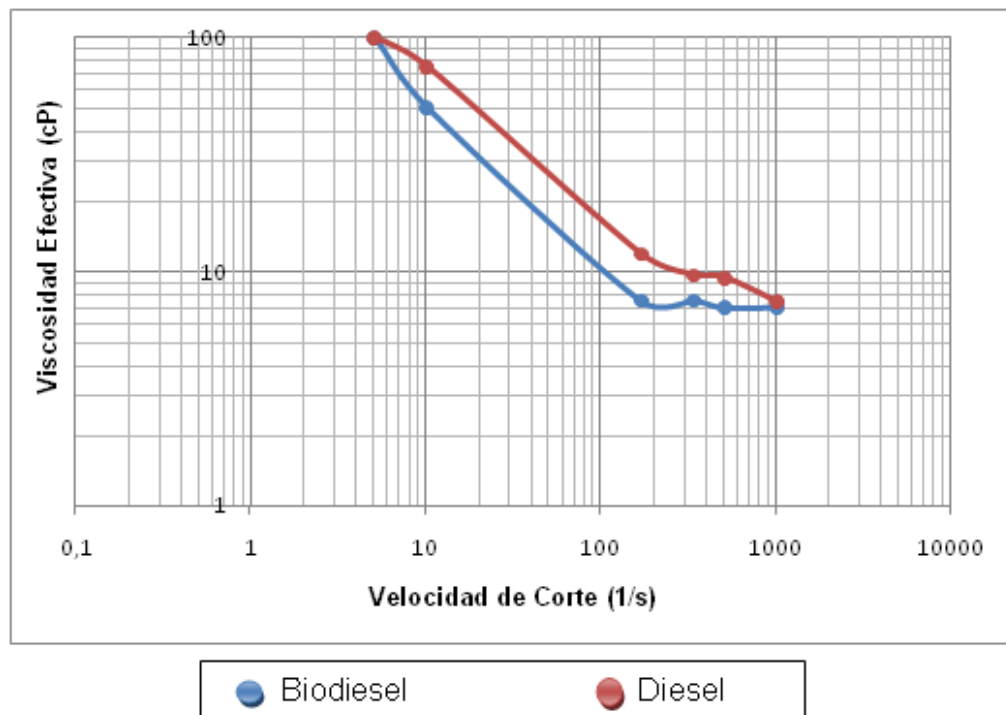
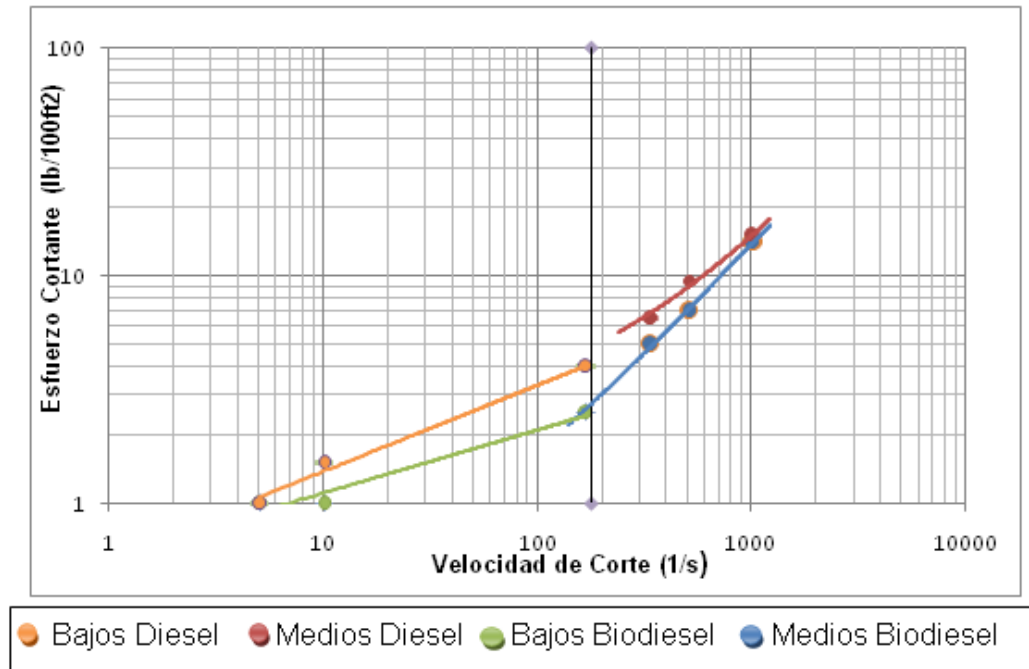


Figura 7. Esfuerzo de Corte vs. Velocidad de Corte 100 % Aceite



Ahora nosotros determinamos el índice “n” de la ley de la potencia indicándonos el grado de comportamiento no newtoniano de un fluido y el índice de consistencia “k”.

$$n = \frac{\log(R_1 / R_2)}{\log(v_1 / v_2)}$$

Donde:

R₁= lectura del dial a rpm₁

R₂= lectura del dial a rpm₂

V1 y V2 = Velocidad de corte en s⁻¹

nm= índice de la ley de la potencial de valores medios

nb= índice de la ley de la potencia de valores bajos

km= índice de consistencia de valores medios

kb= índice de consistencia de valores bajos

$$nm = 3.32 \log \frac{lect600rpm}{lect300rpm}$$

$$nb = 3.32 \log \frac{lect6rpm}{lect3rpm}$$

$$km = 1.07 x \frac{lect600rpm}{1020^{nm}}$$

$$kb = 1.07 x \frac{lect6rpm}{10.2^{nb}}$$

Aceite	nm	km	nb	kb
Biodiesel	0.99	0.016	Aprox. 0	1.07
Diesel	0.66	0.166	0.58	0.42

En estos resultados de 100 % aceite que se observa en la tabla 14 se tiene menor filtrado HPHT en lodos base Diesel lo que nos indican que estos lodos ejerce mas control de filtrado que el base Biodiesel, la prueba demostró que no existe

inestabilidad de la emulsión o pérdida anormal de filtrado, la pérdida estuvo muy por debajo del límite permisible y no se observó presencia de agua.

La resistencia de gel es igual, lo que nos muestra un comportamiento similar en el estado de suspensión de los ripios.

El contenido de sólidos es mayor en el lodo base Diesel lo que significa que algún aditivo está generando sólidos al reaccionar con la base, situación que no se presenta con el Biodiesel, hecho que fue demostrado en las pruebas de compatibilidad.

Entre los Cake encontramos una gran diferencia entre un Cake consistente, plástico de buen espesor que tiene el lodo base Biodiesel frente a una película de Cake que formó el base Diesel, lo que nos indica que proveería mejores propiedades de estabilidad de formación el lodo base Biodiesel.

La figura 6 de Viscosidad efectiva vs. Velocidad de corte nos muestran que para este caso es más efectivo el lodo base Diesel para operaciones de corazonamiento, sin embargo el lodo base Biodiesel puede hacer esta operación debido a que la diferencia de viscosidades no es muy alta.

En figura 6 de Viscosidad efectiva vs. Velocidad de corte se observa que el comportamiento pseudoplástico ideal en un lodo de perforación está muy bien definido en velocidades bajas en velocidades medias no se observa un cambio de viscosidades, pero se presenta en ambos tipos de base lo nos hace deducir que se debe a la falta de algún aditivo.

En la figura 7 de Esfuerzo cortante vs. Velocidad de corte y los resultados de n y k se puede interpretar que los índices de la ley de la potencia a velocidades bajas

para el lodo base Biodiesel presentan mejores características que los lodos base Diesel en velocidades bajas y para velocidades medias el Diesel presenta mejores características de disminuir su viscosidad al aumentar la velocidad a la vez que aumenta la eficiencia con la cual un fluido limpia el pozo y suspende los materiales densificantes y los recortes

FOTOS

Figura 8. Vaso 100% Biodiesel y Diesel respectivamente



Figura 9. Filtrado 100% Biodiesel y Diesel respectivamente



Tabla 16. Formulación de emulsión firme 80/20

Formulación	Unidades	BIODIESEL	DIESEL
Θ600	lb/100 ft ²	32.5	33
Θ300	lb/100 ft ²	18	19
Θ200	lb/100 ft ²	13	13
Θ100	lb/100 ft ²	8	8
Θ6	lb/100 ft ²	3	3
Θ3	lb/100 ft ²	2.5	2
Resistencia Gel 10"/10'		2/2.5	2/2
VP	cP	14.5	14
VA	cP	16.25	16.5
YP	lb/100 ft ²	3.5	5
YS	lb/100 ft ²	2	1
HPHT 300 °F y 500 psi	ml	2	1
Peso Lodo	lpg	6.1	<6
Cl	mg/L	6000	4000
% Agua	%(vol)	20	15
% Aceite	%(vol)	52	53
% Sólidos	%(vol)	28	32
Cake	x/32"	No se Forma	Película de Torta
		No se Forma	---
		No se Forma	---

Tabla 17. Reología de Formulación de emulsión firme 80/20

BIODIESEL				DIESEL			
RPM	v (1/s)	θRPM (lb/100ft ²)	μEfec (Cp)	RPM	v (1/s)	θRPM (lb/100ft ²)	μEfec (Cp)
600	1020	32,5	16,25	600	1020	33	16,5
300	510	18	18	300	510	19	19
200	340	13	19,5	200	340	13	19,5
100	170	8	24	100	170	8	24
6	10,2	3	150	6	10,2	3	150
3	5,1	2,5	250	3	5,1	1,5	150

Figura 10. Viscosidad efectiva vs. Velocidad de Corte Formulación Firme 80/20

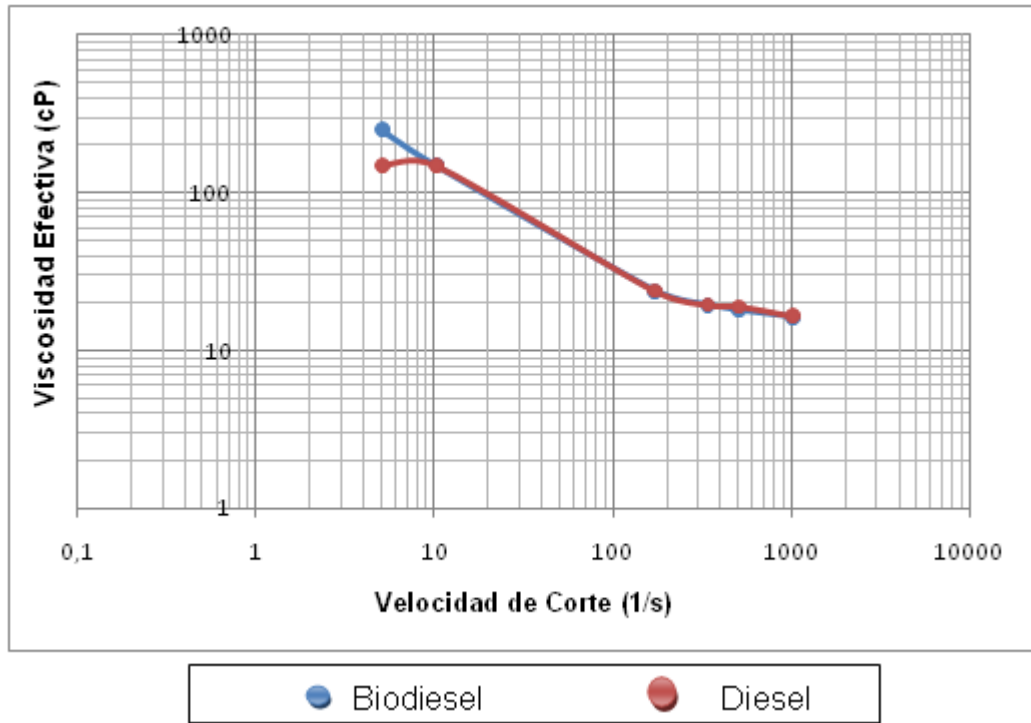
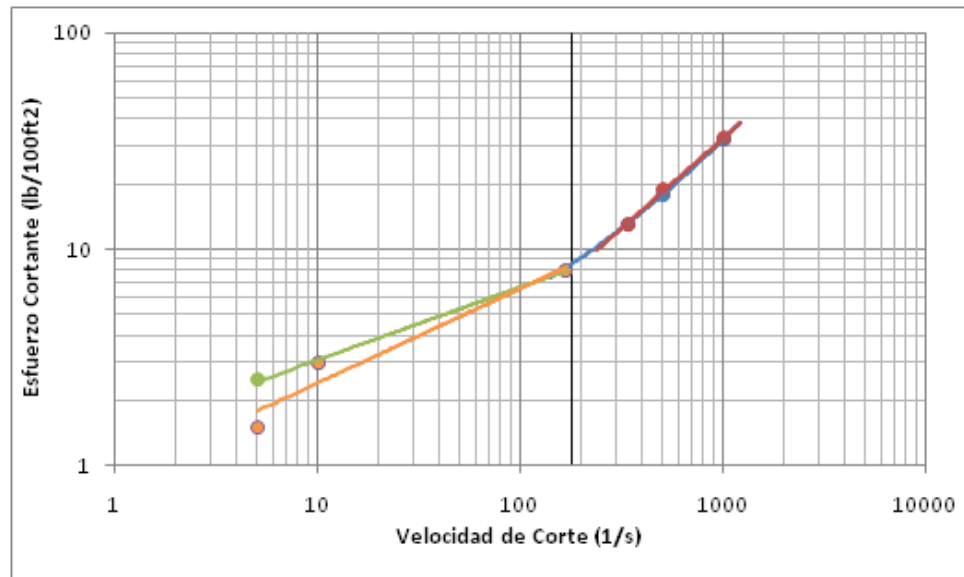


Figura 11. Esfuerzo de Corte vs. Velocidad de Corte Formulación Firme 80/20



Ahora nosotros determinamos el índice “n” de la ley de la potencia indicándonos el grado de comportamiento no newtoniano de un fluido y el índice de consistencia “k”.

Aceite	nm	km	nb	kb
Biodiesel	0.85	0.096	0.26	1.75
Diesel	0.79	0.14	0.99	0.32

FOTOS

Figura12. Vaso Formulación Firme 80/20 Biodiesel y Diesel respectivamente



Figura 13. Filtrado Formulación Firme 80/20 Biodiesel y Diesel respectivamente

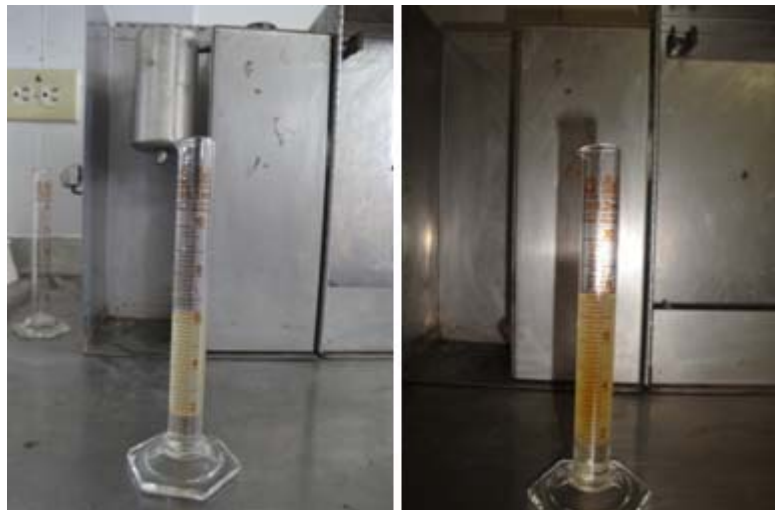


Figura 14. Cake Formulación Firme 80/20 Biodiesel y Diesel respectivamente

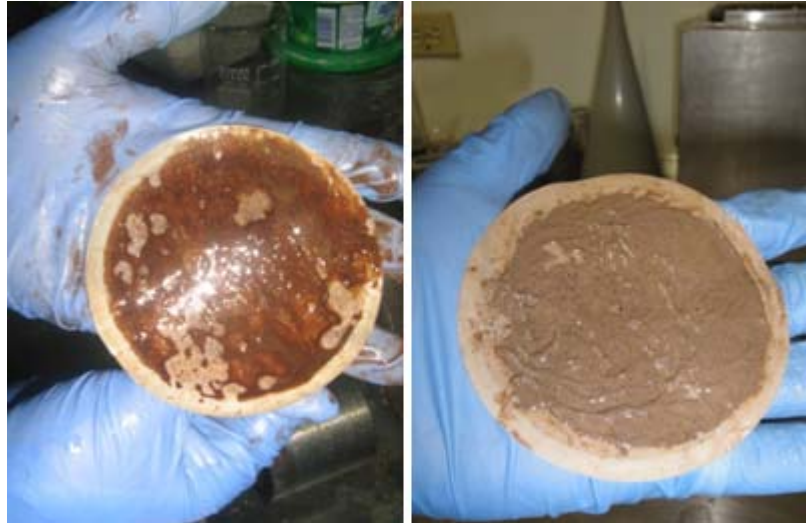


Tabla 18. Formulación firme 60/40

Formulación	Unidades	BIODIESEL	DIESEL
Ø600	lb/100 ft ²	160	86
Ø300	lb/100 ft ²	124	61
Ø200	lb/100 ft ²	84	50
Ø100	lb/100 ft ²	42	38
Ø6	lb/100 ft ²	24	18
Ø3	lb/100 ft ²	16	16
Resistencia Gel 10"/10'		12/16	14/17
VP	cP	36	25
VA	cP	80	43
YP	lb/100 ft ²	88	36
YS	lb/100 ft ²	8	14
HPHT 300 °F y 500 psi	ml	2.6	1.2
Peso Lodo	lpg	7.2	7.5
Cl	mg/L	5000	4000
% Agua	%	36	18
% Aceite	%	50	44
% Sólidos	%	14	38
Cake	x/32"	<1/32	Inconsist.
		Inconsist.	Plástica
		Quebradiza	<1/32

Tabla 19. Reología de Formulación de emulsión firme 60/40

BIODIESEL				DIESEL			
RPM	v (1/s)	θ RPM (lb/100ft ²)	μ Efec (Cp)	RPM	v (1/s)	θ RPM (lb/100ft ²)	μ Efec (Cp)
600	1020	160	80	600	1020	61	30,5
300	510	124	124	300	510	50	50
200	340	84	126	200	340	38	57
100	170	42	126	100	170	18	54
6	10,2	24	1200	6	10,2	16	800
3	5,1	16	1600	3	5,1	17	1700

Figura 15. Viscosidad efectiva vs. Velocidad de Corte Formulación Firme 60/40

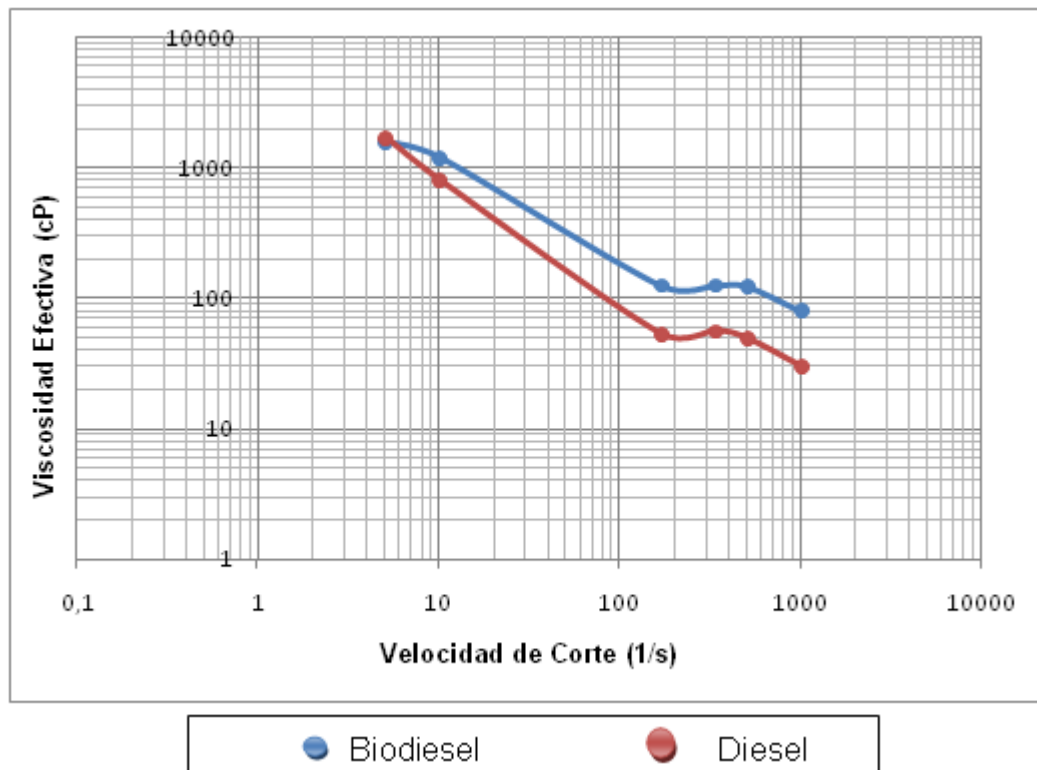
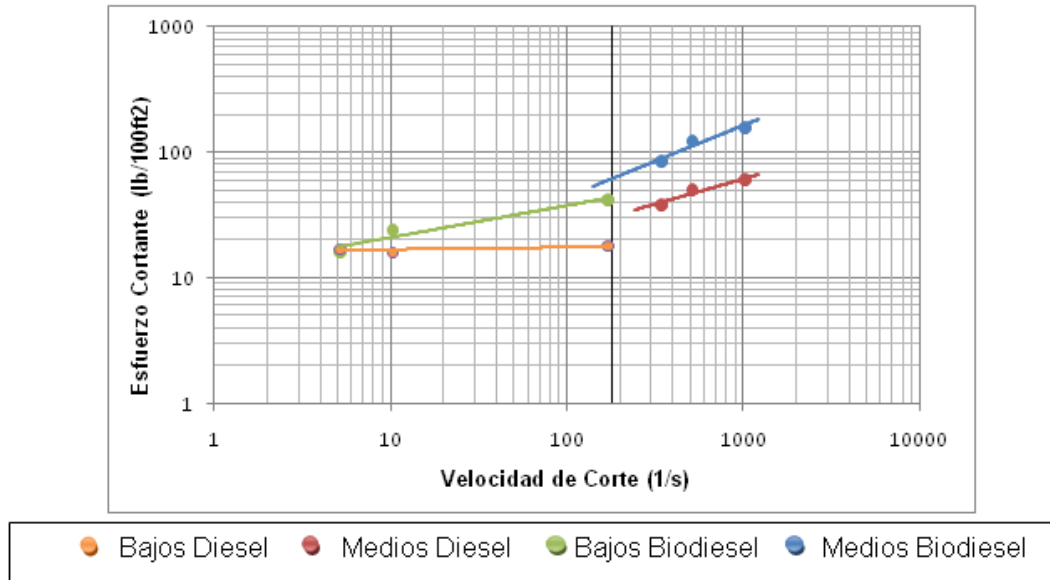


Figura 16. Esfuerzo de Corte vs. Velocidad de Corte Formulación Firme 60/40



Ahora determinamos el índice “n” de la ley de la potencia indicándonos el grado de comportamiento no newtoniano de un fluido y el índice de consistencia “k”.

Aceite	nm	km	Nb	kb
Biodiesel	0.36	14.13	0.58	6.67
Diesel	0.28	9.38	Aprox. 0	20.61

En los resultados de las de tablas 16 y 18 se puede observa que el filtrado HPHT de las formulaciones firmes es menor en los lodos base Diesel, ejerciendo más control en el filtrado a comparación con los lodos base Biodiesel, las perdidas estuvieron por debajo de lo permisible sin la inestabilidad de la emulsión y sin ninguna presencia de agua.

El comportamiento en la resistencia de gel es mejor en los lodos base Biodiesel, debido a que se ve un incremento en los resultados a los 10 minutos, lo cual nos

indica que su capacidad de suspensión de los ripios es mejor que los de lodos base Diesel.

Al igual que la formulación 100 % aceite el porcentaje de sólidos es mayor en los lodos diesel, donde algún aditivo está generando los sólidos al reaccionar con éste. En la formulación firme 60/40 a base biodiesel el porcentaje de sólidos es mucho menor que las demás formulaciones.

En los Cakes podemos observar una variación de todas las formulaciones, en la formulación 80/20 base Biodiesel no se formo el cake, mientras que en la base diesel lo que se obtuvo fue una película de torta, por su parte la torta que registro la formulación 60/40 base Biodiesel es inconsistente y quebradiza la cual difiere de la base Diesel en que es plástica.

En las figuras 10 y 15 de Viscosidad efectiva vs. Velocidad de corte podemos observar que la formulación 80/20 base Biodiesel y Diesel poseen un comportamiento igual, mientras que en la formulación 60/40 el comportamiento base Biodiesel es mayor lo cual favorece a tener un buen comportamiento como lodo de perforación para la limpieza del pozo y suspensión de ripios.

En las Figuras 11 y 16 de Esfuerzo cortante vs. Velocidad de corte podemos observar que los valores medios de las formulaciones son menores de 1 demostrando así un comportamiento no newtoniano, pero las formulaciones 60/40 poseen un valor de “n” más bajos que la formulación 80/20 lo cual quiere decir que el fluido disminuye su viscosidad con el esfuerzo de corte.

Referente al índice de consistencia “k” podemos observar en los cálculos que son mayores en las formulaciones 60/40 lo cual nos indica que la eficacia con que el fluido hace limpieza al pozo y la suspensión de ripios es mucho mejor que la

formulación 80/20. Al ver el comportamiento entre el biodiesel y el diesel en la formulación 60/40 podemos apreciar que posee un buen índice de consistencia el lodo base biodiesel, siendo este el que mejor características posee.

FOTOS

Figura 17. Vaso Formulación Firme 60/40 Biodiesel y Diesel respectivamente



Figura 18. Filtrado Formulación Firme 60/40 Biodiesel y Diesel respectivamente



Figura19. Cake Formulación Firme 60/40 Biodiesel y Diesel respectivamente



Tabla 20. Formulación relajado 80/20

Formulación	Unidades	BIODIESEL	DIESEL
Ø600	lb/100 ft ²	42	37
Ø300	lb/100 ft ²	26	21.5
Ø200	lb/100 ft ²	19	16
Ø100	lb/100 ft ²	14	11
Ø6	lb/100 ft ²	7	5
Ø3	lb/100 ft ²	4	3
Resistencia Gel 10''/10'		3/4	3/3
VP	cP	16	15.5
VA	cP	21	18.5
YP	lb/100 ft ²	10	6
YS	lb/100 ft ²	1	1
HPHT 300 °F y 500 psi	MI	2	4
Peso Lodo	Lpg	7.5	6.2
Cl	mg/L	4000	4000
% Agua	%(vol)	15	15
% Aceite	%(vol)	63	51
% Sólidos	%(vol)	22	34
Cake	x/32''	2/32	Película de Torta
		Inconsist.	---
		Quebradiza	---

Tabla 21. Reología de Formulación relajado 80/20

BIODIESEL				DIESEL			
RPM	v (1/s)	θ RPM (lb/100ft ²)	μ Efec (Cp)	RPM	v (1/s)	θ RPM (lb/100ft ²)	μ Efec (Cp)
600	1020	42	21	600	1020	37	18,5
300	510	26	26	300	510	21,5	21,5
200	340	19	28,5	200	340	16	24
100	170	14	42	100	170	11	33
6	10,2	7	350	6	10,2	5	250
3	5,1	4	400	3	5,1	3	300

Figura 20. Viscosidad efectiva vs. Velocidad de Corte Formulación Relajado 80/20

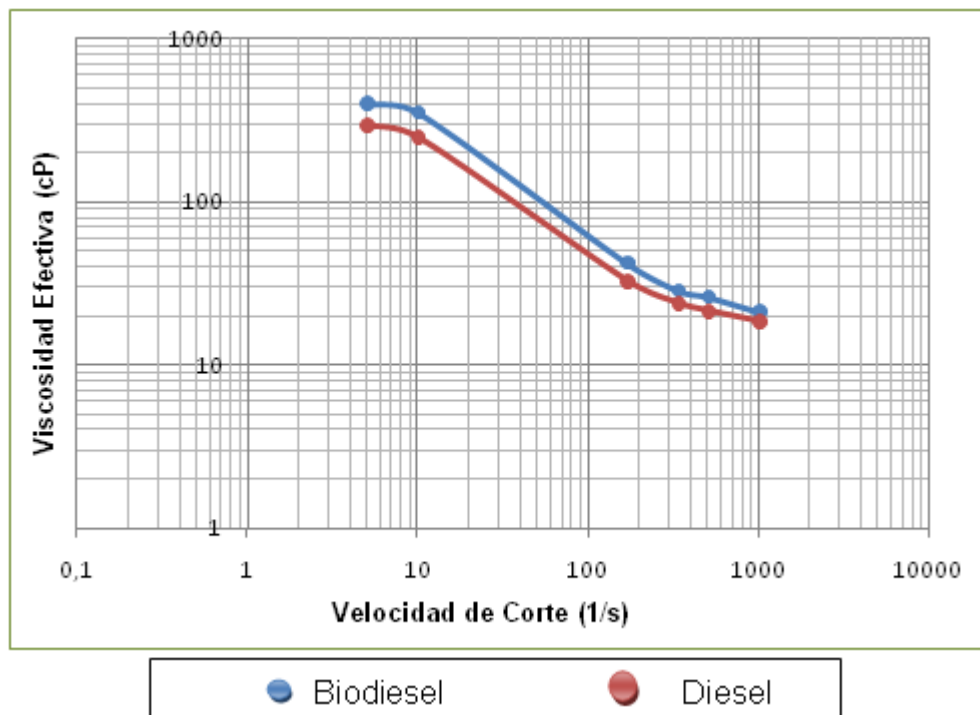
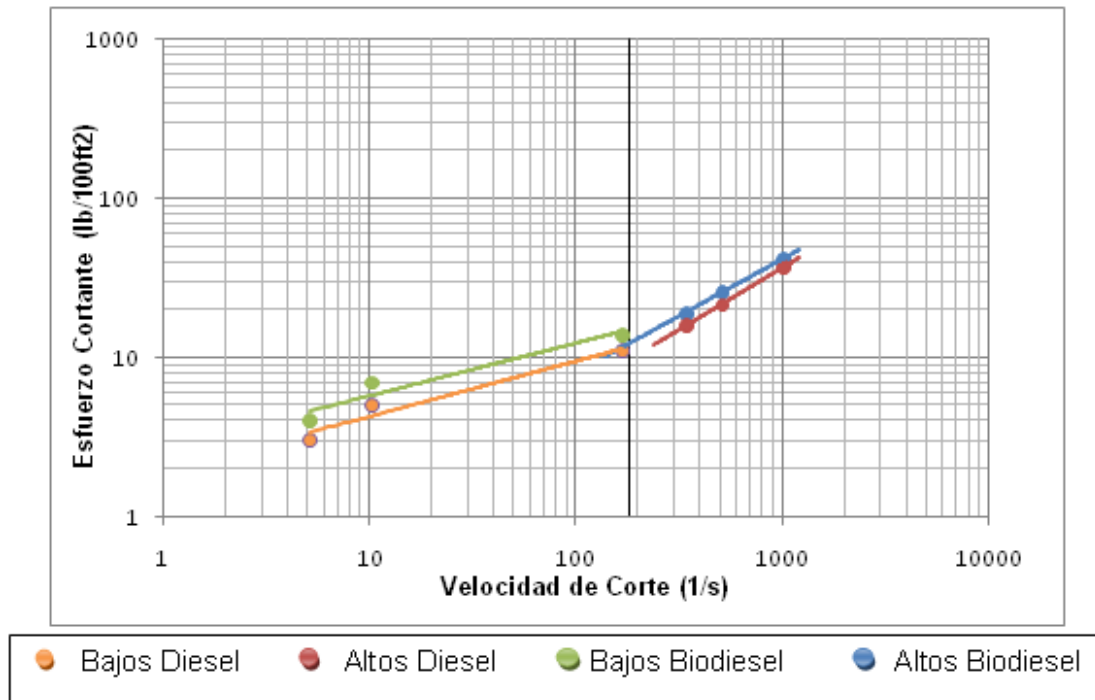


Figura 21. Esfuerzo de Corte vs. Velocidad de Corte Formulación Relajado 80/20



Ahora determinamos el índice “n” de la ley de la potencia indicándonos el grado de comportamiento no newtoniano de un fluido y el índice de consistencia “k”.

Aceite	nm	Km	Nb	kb
Biodiesel	0.69	0.37	0.80	1.16
Diesel	0.78	0.17	0.73	0.98

FOTOS

Figura 22. Vaso Formulación Relajado 80/20 Biodiesel y Diesel respectivamente



Figura 23. Filtrado Formulación Relajado 80/20 Biodiesel y Diesel respectivamente

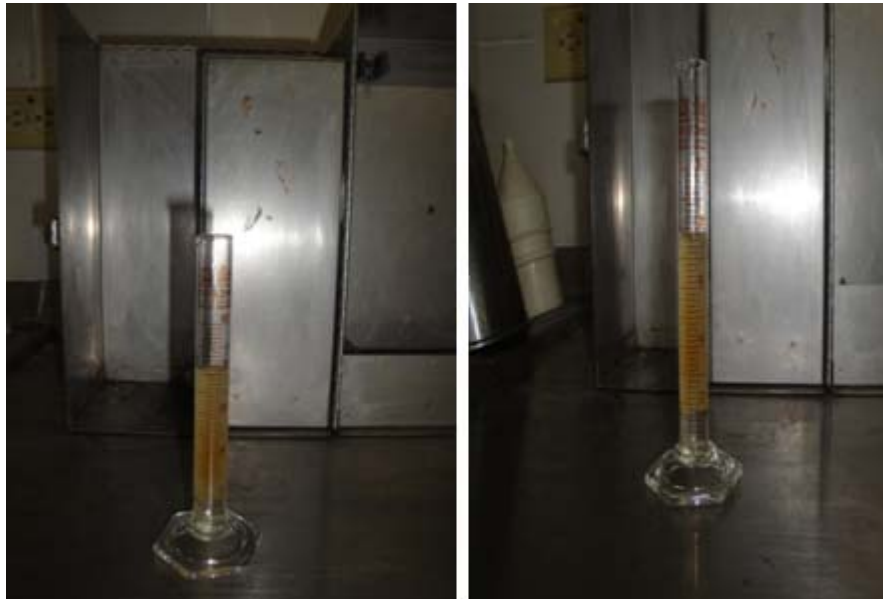


Figura 24. Cake Formulación Relajado 80/20 Biodiesel y Diesel respectivamente



Tabla 22. Formulación relajado 60/40

Formulación	Unidades	BIODIESEL	DIESEL
Ø600	lb/100 ft ²	183	150
Ø300	lb/100 ft ²	151	101
Ø200	lb/100 ft ²	135	77
Ø100	lb/100 ft ²	116	54
Ø6	lb/100 ft ²	55	14
Ø3	lb/100 ft ²	28	10
Resistencia Gel 10"/10'		22/24	8/10
VP	cP	32	49
VA	cP	91.5	75
YP	lb/100 ft ²	119	52
YS	lb/100 ft ²	1	6
HPHT 300 °F y 500 psi	ml	2	2
Peso Lodo	lpg	7.65	7.3
Cl	mg/L	5000	3000
% Agua	%(vol)	36	38
% Aceite	%(vol)	35	44
% Sólidos	%(vol)	29	18
Cake	x/32"	1/32	Inconsist.
		Inconsist.	Quebradiza
		Quebradiza	2/32

Tabla 23. Reología de Formulación relajado 60/40

BIODIESEL				DIESEL			
RPM	v (1/s)	θ RPM (lb/100ft ²)	μ Efec (Cp)	RPM	v (1/s)	θ RPM (lb/100ft ²)	μ Efec (Cp)
600	1020	183	91,5	600	1020	150	75
300	510	151	151	300	510	101	101
200	340	135	202,5	200	340	77	115,5
100	170	116	348	100	170	54	162
6	10,2	55	2750	6	10,2	14	700
3	5,1	28	2800	3	5,1	10	1000

Figura 25. Viscosidad efectiva vs. Velocidad de Corte Formulación Relajado 60/40

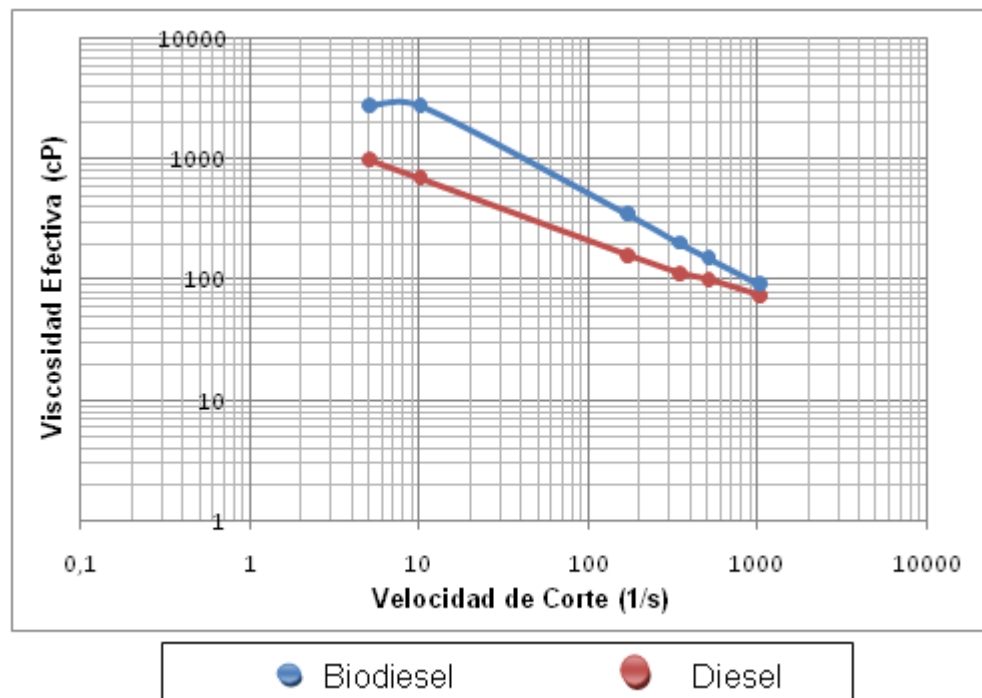
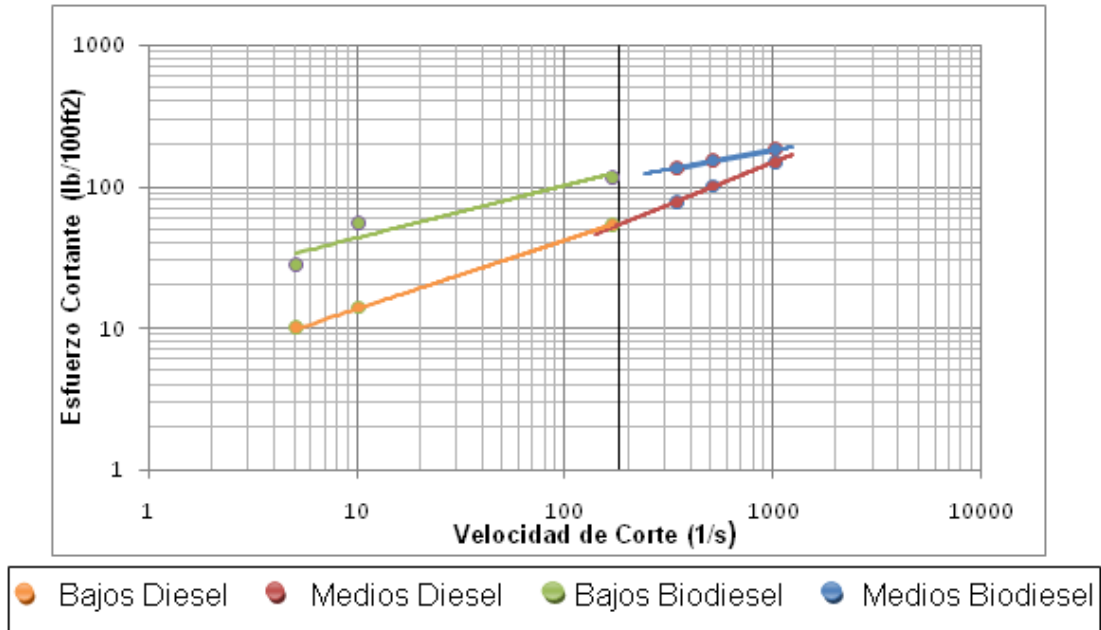


Figura 26. Esfuerzo de Corte vs. Velocidad de Corte Formulación Relajado 60/40



Ahora determinamos el índice “n” de la ley de la potencia indicándonos el grado de comportamiento no newtoniano de un fluido y el índice de consistencia “k”.

Aceite	nm	km	Nb	kb
Biodiesel	0.27	30.16	0.97	6.18
Diesel	0.57	3.09	0.48	4.91

En los resultados de las tablas 20 y 22 se observa que tiene menor filtrado HPHT el lodo base Biodiesel lo que nos indican que estos lodos ejerce mas control de filtrado que el base Diesel, la prueba demostró que no existe inestabilidad de la emulsión o perdida anormal de filtrado, la perdidas estuvo muy por debajo del límite permisible y no se observo presencia de agua.

La resistencia de gel es igual, lo que nos muestra un comportamiento similar en el estado de suspensión de los ripios.

El contenido de sólidos es mayor en lodo base Diesel lo que significa que algún aditivo está generando sólidos al reaccionar con la base, situación que no se presenta con el biodiesel, hecho que fue demostrado en las pruebas de compatibilidad.

Entre los Cake no encontramos una gran diferencia entre ambas bases pues ninguna mostro un cake satisfactorio, y no se aprecia gran diferencia entre los resultados.

Las figuras 20 y 25 de Viscosidad específica vs. Velocidad de corte se observa que el lodo base Biodiesel mantendrá el pozo más limpio, pues tiene mejores condiciones para transportar ripios aunque la velocidad de corte se verá un poco disminuida.

En las 20 y 25 de Viscosidad específica vs. Velocidad de corte se observa que el comportamiento pseudoplastico ideal en un lodo de perforación está muy bien definido en velocidades bajas y velocidades medias, y se observa una tendencia muy similar en ambas graficas.

En las figuras 21 y 26 de Esfuerzo cortante vs. Velocidad de corte al interpretar los índices de la ley de la potencia a velocidades bajas observamos que el lodo base Biodiesel presentan mejores características que los lodos base Diesel en velocidades bajas y para velocidades medias el diesel presenta mejores características de disminuir su viscosidad al aumentar la velocidad y el lodo base Biodiesel aumenta la eficiencia con la cual un fluido limpia el pozo y suspende los materiales densificantes y los recortes.

FOTOS

Figura 27. Vaso Formulación Relajado 60/40 Biodiesel y Diesel respectivamente



Figura28. Filtrado Formulación Relajado 60/40 Biodiesel y Diesel respectivamente



Figura 29. Cake Formulación Relajado 60/40 Biodiesel y Diesel respectivamente



Tabla 24. Formulación % agua 50/50

Formulación	Unidades	BIODIESEL	DIESEL
Θ600	lb/100 ft ²	230	150
Θ300	lb/100 ft ²	180	104
Θ200	lb/100 ft ²	158	91.5
Θ100	lb/100 ft ²	128	69
Θ6	lb/100 ft ²	60	33
Θ3	lb/100 ft ²	41	29
Resistencia Gel 10"/10'		37/41	24/28
VP	cP	50	46
VA	cP	115	75
YP	lb/100 ft ²	130	58
YS	lb/100 ft ²	22	25
HPHT 300 °F y 500 psi	MI	6	2
Peso Lodo	Lpg	7.45	7.45
Cl	mg/L	4000	3000
% Agua	%(vol)	48	42
% Aceite	%(vol)	40	30
% Sólidos	%(vol)	12	28
Cake	x/32"	1/32	Inconsist.
		Inconsist.	Quebradiza
		Quebradiza	<1/32

Tabla 25. Reología de Formulación % agua 50/50

BIODIESEL				DIESEL			
RPM	v (1/s)	θRPM (lb/100ft ²)	μEfec (Cp)	RPM	v (1/s)	θRPM (lb/100ft ²)	μEfec (Cp)
600	1020	230	115	600	1020	150	75
300	510	180	180	300	510	104	104
200	340	158	237	200	340	91,5	137,25
100	170	128	384	100	170	69	207
6	10,2	60	3000	6	10,2	33	1650
3	5,1	41	4100	3	5,1	29	2900

Figura 30. Viscosidad efectiva vs. Velocidad de Corte Formulación % Agua 50/50

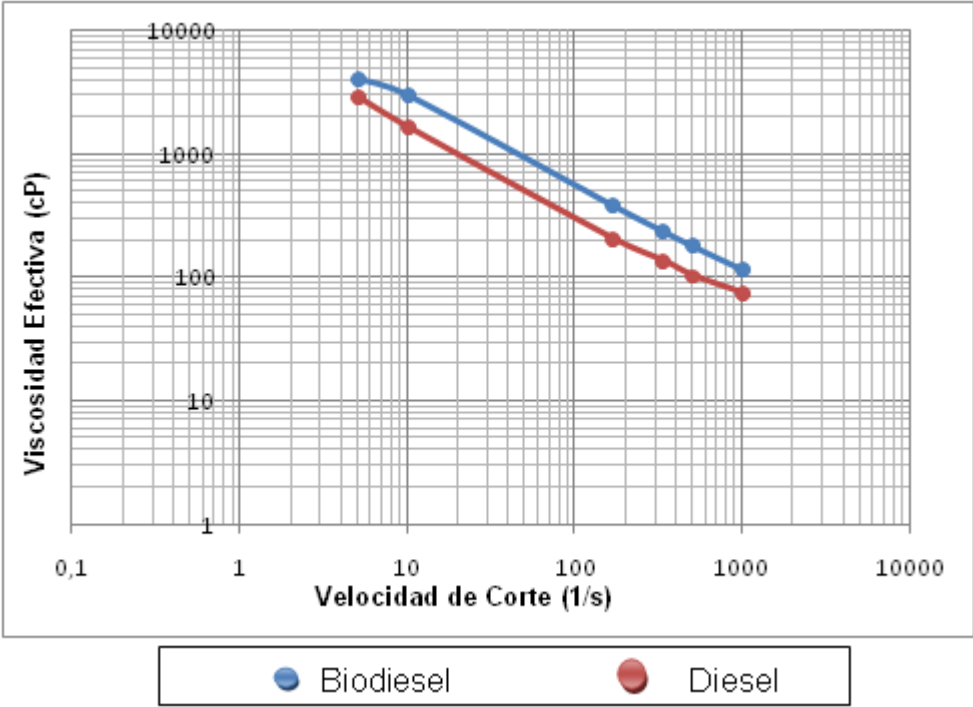
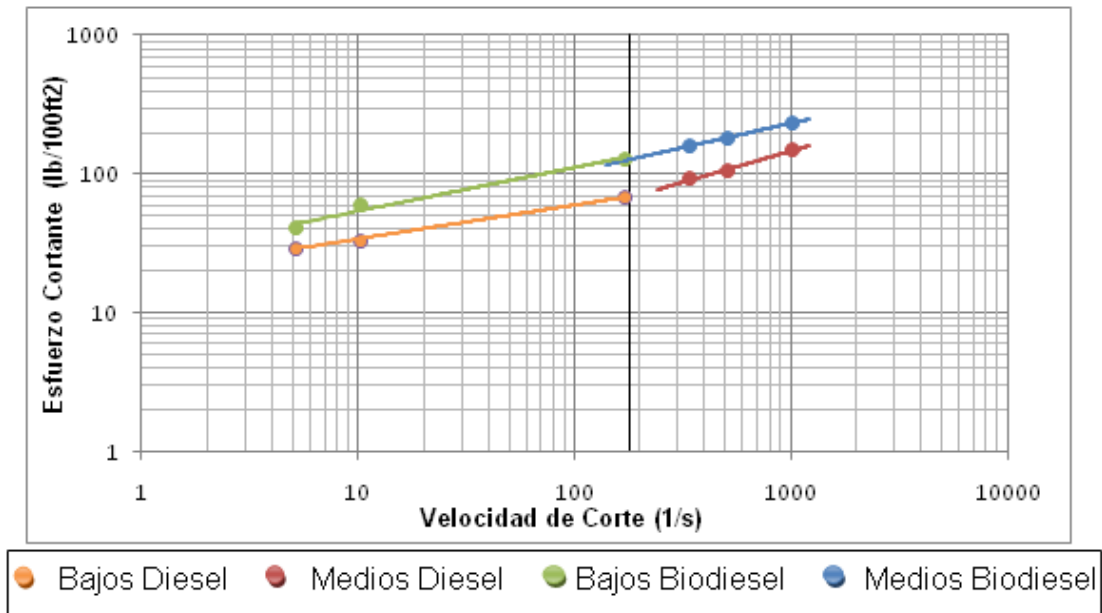


Figura 31. Viscosidad efectiva vs. Velocidad de Corte Formulación % Agua 50/50



Ahora determinamos el índice “n” de la ley de la potencia indicándonos el grado de comportamiento no newtoniano de un fluido y el índice de consistencia “k”.

Aceite	nm	Km	nb	kb
Biodiesel	0.35	21.78	0.54	18.31
Diesel	0,52	4.37	0,18	23.24

FOTOS

Figura 32. Vaso Formulación % Agua 50/50 Biodiesel y Diesel respectivamente



Figura 33. Filtrado Formulación % Agua 50/50 Biodiesel y Diesel respectivamente

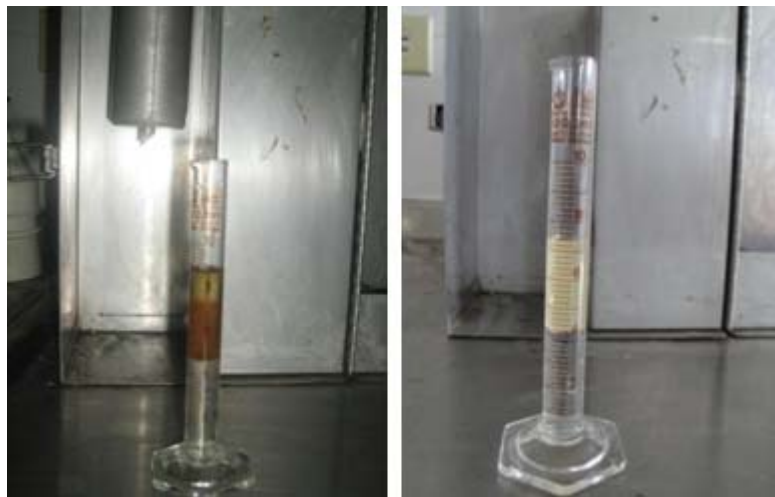


Figura 34. Cake Formulación % Agua 50/50 Biodiesel y Diesel respectivamente



Tabla 26. Formulación % agua 40/60

Formulación	Unidades	BIODIESEL	DIESEL
Ø600	lb/100 ft ²	>300	260
Ø300	lb/100 ft ²	>300	191
Ø200	lb/100 ft ²	276	165
Ø100	lb/100 ft ²	230	130
Ø6	lb/100 ft ²	121	69
Ø3	lb/100 ft ²	75	65
Resistencia Gel 10"/10'		65/70	56/59
VP	cP	---	69
VA	cP	---	130
YP	lb/100 ft ²	---	122
YS	lb/100 ft ²	29	61
HPHT 300 °F y 500 psi	ml	4	2.4
Peso Lodo	lpg	7.9	7.6
Cl	mg/L	3000	3000
% Agua	%(vol)	58	54
% Aceite	%(vol)	24	22
% Sólidos	%(vol)	18	24
Cake	x/32"	<1/32	Inconsist.
		Inconsist.	Quebradiza
		Plástica	<1/32

Tabla 27. Reología de Formulación % agua 40/60

BIODIESEL				DIESEL			
RPM	v (1/s)	θ RPM (lb/100ft ²)	μ Efec (Cp)	RPM	v (1/s)	θ RPM (lb/100ft ²)	μ Efec (Cp)
600	1020	300	150	600	1020	260	130
300	510	300	300	300	510	191	191
200	340	276	414	200	340	165	247,5
100	170	230	690	100	170	130	390
6	10,2	121	6050	6	10,2	69	3450
3	5,1	75	7500	3	5,1	65	6500

Figura 35. Viscosidad efectiva vs. Velocidad de Corte Formulación % Agua 40/60

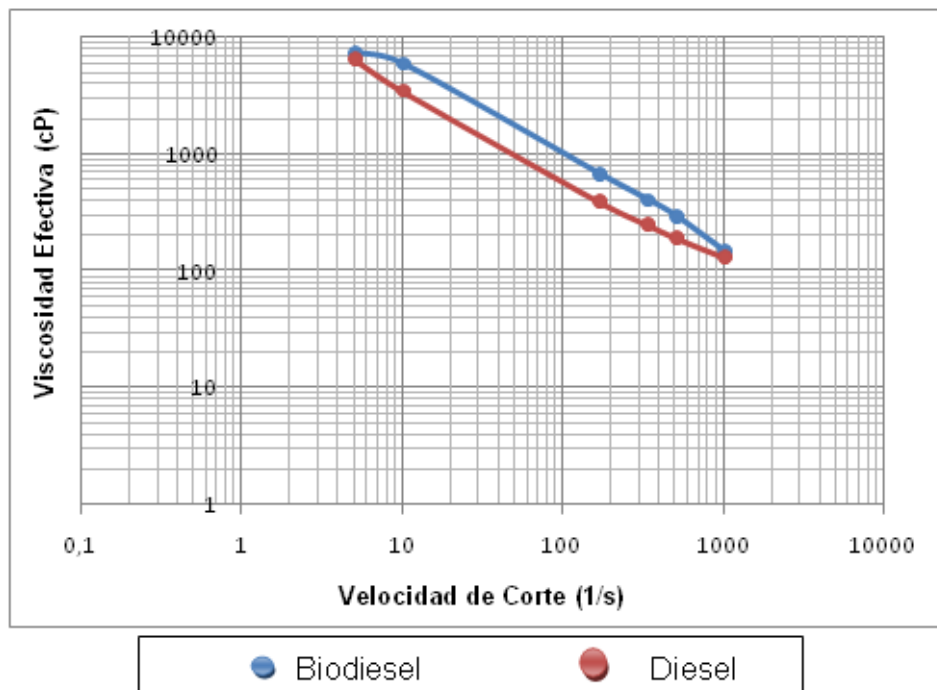
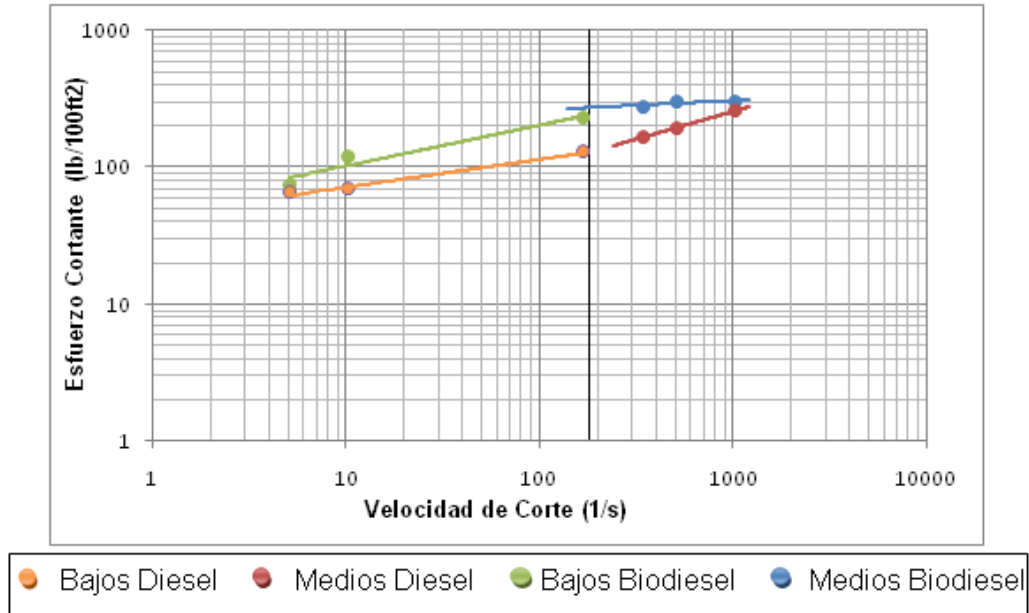


Figura 36. Viscosidad efectiva vs. Velocidad de Corte Formulación % Agua 40/60



Ahora determinamos el índice “n” de la ley de la potencia indicándonos el grado de comportamiento no newtoniano de un fluido y el índice de consistencia “k”.

Aceite	nm	km	nb	kb
Biodiesel	0	321	0,68	26.68
Diesel	0,44	13.1	0,08	61.31

En los resultados de las tablas 24 y 26 se observa que tiene menor filtrado HPHT el lodo base Biodiesel lo que nos indican que estos lodos ejerce mas control de filtrado que el base Diesel, la prueba demostró que no existe inestabilidad de la emulsión o perdida anormal de filtrado, la perdidas estuvo muy por debajo del límite permisible y no se observo presencia de agua aunque es notorio que el lodo base biodiesel genera más filtrado que el base diesel.

La resistencia de gel es mayor para el base biodiesel, esto es el reflejo del notorio aumento de viscosidad que tiene los lodos base biodiesel con mayor cantidad de agua frente a sus similares de base diesel.

El contenido de sólidos es mayor en lodo base Diesel lo que significa que algún aditivo está generando sólidos al reaccionar con la base, situación que no se presenta con el biodiesel, hecho que fue demostrado en las pruebas de compatibilidad.

Entre los Cake no encontramos una gran diferencia entre ambas bases pues ninguna mostro un cake satisfactorio, y no se aprecia gran diferencia entre los resultados.

Las figuras 30 y 35 de Viscosidad específica vs. Velocidad de corte se observa que el lodo base Biodiesel mantendrá el pozo más limpio, pues tiene mejores condiciones para transportar ripios aunque la velocidad de corte se verá un poco disminuida.

En las figuras 30 y 35 de Viscosidad específica vs. Velocidad de corte se observa que el comportamiento pseudoplástico ideal en un lodo de perforación está muy bien definido en velocidades bajas y velocidades medias, y se observa una tendencia muy similar en ambas graficas aunque se aprecia la mayor viscosidad de los lodos base biodiesel.

.En las figuras 31 y 36 de Esfuerzo cortante vs. Velocidad de corte al interpretar los índices de la ley de la potencia a velocidades bajas observamos que los lodos presentan similares características en velocidades bajas y para velocidades así que tendríamos el mismo comportamiento para ambos lodos.

FOTOS

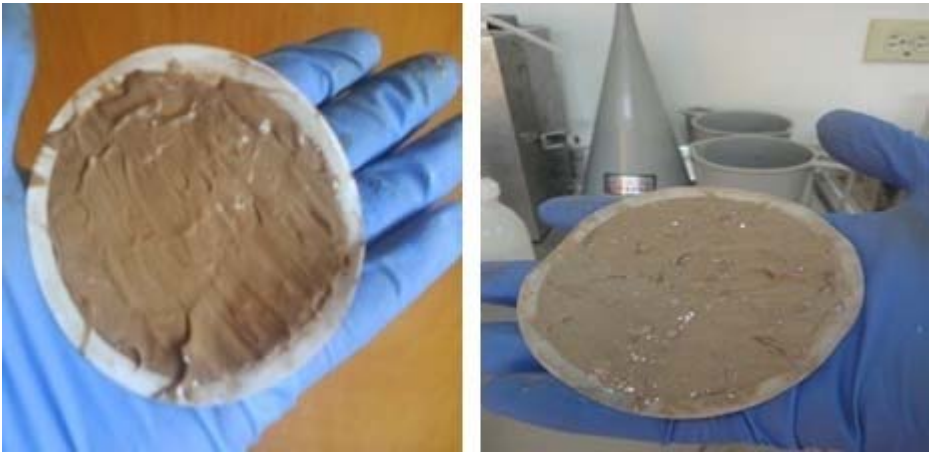
Figura 37. Vaso Formulación % Agua 40/60 Biodiesel y Diesel respectivamente



Figura 38. Filtrado Formulación % Agua 40/60 Biodiesel y Diesel respectivamente



Figura 39. Cake Formulación % Agua 40/60 Biodiesel y Diesel respectivamente



5.4. ANALISIS DE RESULTADOS

Debido a que la prueba de filtrado HPHT es la prueba fundamental para lodos de emulsión inversa, se observa que tiene menor filtrado HPHT los lodos base Diesel lo que nos indican que estos lodos ejercen mas control de filtrado que el base Biodiesel, la observación más importante es que ninguna prueba demostró inestabilidad de la emulsión o perdidas anormales de filtrado, todas las perdidas estuvieron muy por debajo del límite permisible y fueron 100% aceite.

La resistencia de gel es ligeramente mayor en lodos con base Biodiesel pero entre mayor contenido de agua presente en el lodo la resistencia de gel toma una diferencia considerable y mayor con respecto a los lodos base diesel, lo que nos indica que entre mayor contenido de agua posea un lodo base Biodiesel mantendrá los ripios en estado de suspensión por mayor tiempo que el lodo base Diesel.

El contenido de sólidos es mayor en lodos base Diesel lo que significa que algún aditivo está generando sólidos al reaccionar con la base, situación que no se presenta con el biodiesel, hecho que fue demostrado en las pruebas de compatibilidad.

El análisis de los Cakes no nos indican muchas diferencias, el único análisis importante nos lo otorga la formulación 100% aceite donde encontramos una gran diferencia entre un Cake consistente, plástico de buen espesor que tiene el lodo base Biodiesel frente a una película de Cake que formo el Base Diesel, lo que nos indica que proveería mejores propiedades de estabilidad de formación el lodo base Biodiesel.

Las graficas Viscosidad efectiva vs. Velocidad de corte nos muestran que para el caso 100% aceite es más efectivo el lodo base Diesel para operaciones de corazonamiento, sin embargo el lodo base Biodiesel puede hacer esta operación debido a que la diferencia de viscosidades no es muy alta.

Las demás graficas de viscosidad especifican vs. Velocidad de corte se observa que el lodo base Biodiesel mantendrá el pozo más limpio, pues tiene mejores condiciones para transportar ripios aunque la velocidad de corte se verá un poco disminuida.

En las graficas de viscosidad especifica vs. Velocidad de corte se observa que el comportamiento pseudoplastico ideal en un lodo de perforación está muy bien definido por los lodos de ambas bases con contenidos de agua mayores del 20% y que en concentraciones de agua menores el lodo base Biodiesel pierde sus propiedades pseudoplasticas con velocidades de corte superiores a 200 RPM. Aunque cabe anotar que el lodo base Biodiesel tiene el mismo comportamiento en este aspecto que el lodo base Diesel.

En las graficas de esfuerzo cortante vs. Velocidad de corte al interpretar los índices de la Ley de Potencia a velocidades bajas observamos que para composiciones de agua menores del 20% los lodos base Biodiesel presentan mejores características que los lodos base Diesel y que para composiciones mayores a 20% de agua su índice es aproximadamente igual en ambas bases lo que nos reafirma la excelente limpieza que ejercen los lodos base aceite.

El esfuerzo de corte en lodos cuya composición es menor del 40% de agua tiene características similares entre los dos tipos de bases, pero con alto contenido de agua y filtrado relajado 60/40 es mayor los lodos base Biodiesel, lo que indica que

se requiere mayor esfuerzo para iniciar la rotación en lodos base Biodiesel con alto contenido de agua.

6. CONCLUSIONES

- El lodo base Biodiesel desde el punto de vista ambiental es muy atractivo, lo que generaría para la industria enormes ahorros y mayor seguridad para ser utilizado costa fuera y en tierra.
- Desde el punto de vista técnico es factible emplear como fase continua en lodos de emulsión inversa el Biodiesel y aunque la viscosidad es mayor que la base Diesel, presenta buenas propiedades para lodos de perforación.
- El Biodiesel es compatible con todos los aditivos empleados en este proyecto, pues ninguno presenta precipitaciones o reacciones que demuestren lo contrario.
- La viscosidad para los dos tipos de lodos aumenta cuando aumenta la cantidad de agua en cada formulación, y este aspecto genera un comportamiento pseudoplastico ideal en los lodos con mayor cantidad de agua.
- Los lodos de emulsión inversa base Biodiesel presenta excelentes propiedades de limpieza de pozo, aún mejor que los lodos base Diesel, lo que nos genera una ventaja adicional.
- Se tiene un gran avance para cumplir con las legislaciones ambientales establecidas frente a la utilización de lodos de emulsión inversa, pues al utilizar lodos base Biodiesel se cumplen con todos los requerimientos legales y pasaríamos a tener una mejor relación entre el medio ambiente y la perforación con lodos base aceite.

7. RECOMENDACIONES

- Ampliar los estudios con la utilización de formulaciones standard base aceite en la industria, con la disponibilidad de los aditivos necesarios para dichas formulaciones para una correcta comparación de los resultados de las propiedades de dichos lodos.
- Emplear pruebas de envejecimiento, pruebas reológicas a altas T y P, estabilidad eléctrica, pruebas de pH para lodos base aceite, pruebas de compatibilidad a altas temperaturas para estudiar más afondo las ventajas y desventajas de los lodos base Biodiesel.
- Debido al carácter biodegradable del Biodiesel se recomienda hacer un estudio de almacenamiento del lodo para determinar los efectos que sufriría este con el paso del tiempo.
- Evitar mezclar de cualquier forma el Biodiesel con cobre o plomo, pues este presenta una reacción química con estos elementos que pueden modificar drásticamente los resultados.
- Es necesario implementar un estudio especializado para establecer la factibilidad económica puesto que influyen demasiados factores a nivel de capital de inversión y su respectiva implementación en campo.

BIBLIOGRAFIA

- A. Audibert, J-F. Argillier and J. Lecourtier, (Institute Français du Petrole, France); A. Demoulin, (Fina Chemicals, Belgium), "Potential of New Drilling Formulations". Paper WPC 28258
- BUSTOS DOMINGUEZ, Jorge Enrique y OSPINO ROJAS, Rafael Enc. Restauración teórico-práctica del laboratorio de lodos y cementos (Manual Práctico). UIS. Bucaramanga.1988.
- DEGOUY, DIDIER, ARGILLIER, J-F., Inst. Francais du Petrole; DEMOULIN, ANDRE, VELGHE, FIRMIN, "Research: Biodegradable Muds: An Attractive Answer to Environmental Legislations Around Offshore Drilling". Paper SPE 26737-MS
- DRILLING FLUIDS PROCESSING HANDBOOK. Elsevier. 2005
- HALLIBURTON, Conceptos y Practicas de Perforación, Entrenamiento Fase III para Ingenieros de Perforación. 1998.
- HALLIBURTON, Curso Basico de fluidos 2001.
- HALLIBURTON BAROID, Hojas Tecnicas de Productos, 2005.
- HALLIBURTON BAROID, Manual de fluidos de Baroid, 2005.

- Md. Amanullah, SPE, CSIRO Petroleum, “Physio-Chemical Characterisation of Vegetable Oils and Preliminary Test Results of Vegetable Oil-based Muds”. Paper SPE 97008-MS
- M-I & SWACO, 2001. Drilling Fluids Engineering Manual. Versión 2.0 Houston, Texas
- MONTGOMERY, Diseño y Análisis de Experimentos (2ª Ed. 2002) WILEY
- P.L. ACOSTA, C.A. OCHOA. Estudio de factibilidad para el uso del extracto de fique como viscosificante y controlador de filtrado en lodos de perforación. UIS. Bucaramanga. 2002.
- S. COSTA, G. RUEDA. Estudio de factibilidad para el uso del aceite crudo de palma africana en lodos de perforación de emulsion inversa. UIS. Bucaramanga. 2002.
- T.BERNA, I. ILIAS. Estudio de factibilidad para el uso de la glicerina como base en lodos de perforación. UIS. Bucaramanga 2008